



I PARADOSSI DELLA CLASSIFICAZIONE

Domenico Leone

fare sismica
 **APPUNTI**

I PARADOSSI DELLA CLASSIFICAZIONE

Domenico Leone

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

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

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

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

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

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

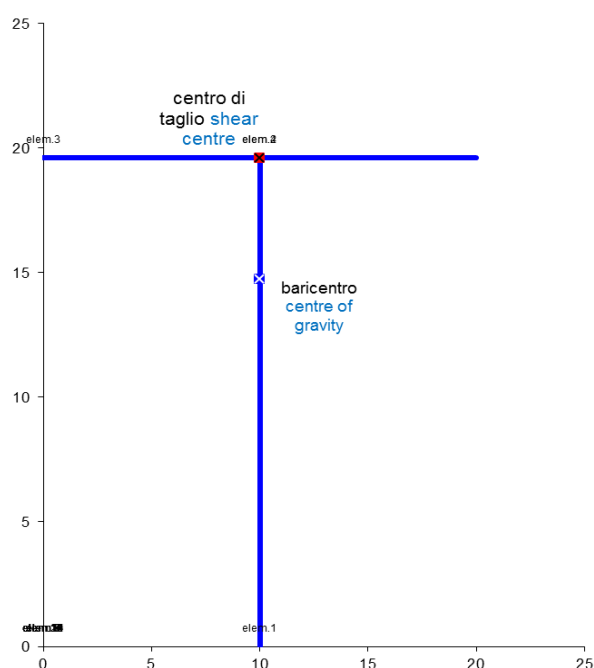
I PARADOSSI DELLA VERIFICA DELLE SEZIONI IN ACCIAIO DI CLASSE 3 e 4

Incongruenze della norma EN 1993-1-1 e EN 1993-1-5

Questo articolo approfondisce ma non completa un argomento già da me trattato in un precedente articolo relativo alla classificazione e calcolo della sezione efficace di elementi sottili in acciaio e alluminio presso-flessi pubblicato sul blog “faresismica”. Si dimostra nel seguito come, **a parità di sollecitazioni esterne** e utilizzando il criterio “conservativo” della norma, **incrementando di poco una parte compressa di una sezione di classe 3 questa diviene di classe 4** al variare del rapporto larghezza/spessore e **si ottiene paradossalmente una maggior resistenza**. Si evidenzia inoltre la fondamentale importanza della scelta del metodo di verifica per sezioni di classe 3 e 4 tra il “criterio conservativo” che utilizza i valori MINIMI dei moduli di resistenza indipendentemente dal punto della sezione oggetto della verifica tensionale e il criterio della “congruenza” sollecitazioni-resistenze che, utilizzando la sovrapposizione degli effetti in un punto preciso della sezione, determina il reale stato di tensione in quel punto.

Come già noto la classificazione di una sezione parte da una presunzione di comportamento plastico della stessa (completo snervamento) con l’individuazione della posizione dell’asse neutro plastico (coefficiente α) oppure da una **presunzione di comportamento elastico limite (snervamento della fibra compressa più esterna della sezione) con l’individuazione della posizione dell’asse neutro elastico (coefficiente ψ)**.

La sezione di seguito esaminata è un profilo a T laminato di spessore uniforme pari a 8 mm, di altezza totale 20 cm e larghezza totale 20 cm, soggetta a presso-flessione piana. Il calcolo è eseguito con il programma “CARGEO” (www.stadata.com)

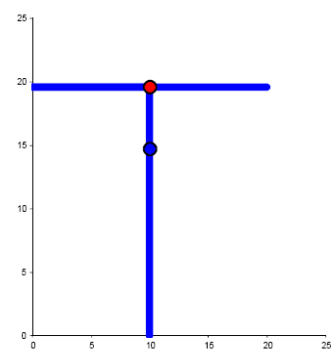


Le caratteristiche geometriche della sezione lorda sono di seguito riassunte :

COORDINATE DEL BARICENTRO :		COORDINATE CENTRO DI TAGLIO :	
$y_G =$	10,00 cm	$y_C =$	10,00 cm
$z_G =$	14,75 cm	$z_C =$	19,60 cm

MOMENTI DI INERZIA DELLA SEZIONE :		$J_y =$	1262,53 cm ⁴	
		$J_z =$	533,333 cm ⁴	
Momento di inerzia torsionale		$J_t =$	6,7584 cm ⁴	
$y_j =$	0,00 cm	Costante di distorsione	$J_w =$	0 cm ^b
$z_j =$	6,81 cm			

- LIVELLI DI CALCOLO CARATTERISTICHE RESISTENZIALI :**
- LIV. 0 = BORDI DEL PROFILO SUGLI ASSI DI RIFERIMENTO
 - LIV. 1 : 5 = LIVELLI DEFINITI DA INPUT LUNGO GLI ASSI Y E Z
 - LIV. 6 = LIVELLO BARICENTRICO**
 - LIV. 7 = DIMENSIONI MASSIME DEL PROFILO
 - LIV. 8 = LIVELLO ASSE NEUTRO PLASTICO PER FLESSIONE



MODULI DI RESISTENZA E COEFFICIENTI DI TAGLIO :

LIV.	hz	by	Wy	Wpl.y	kTz	hy	bz	Wz	Wpl.z	kTy
	cm	cm	cm ³	cm ³	cm ⁻²	cm	cm	cm ³	cm ³	cm ⁻²
0	0	0	86		0,00E+00	0	0	53		0,00E+00
1	0,00	0,80	85,66		0,00E+00	10,00	0,80	0,00		9,73E-02
2	0	0	86		0,00E+00	0	0	53		0,00E+00
3	0	0	86		0,00E+00	0	0	53		0,00E+00
4	0	0	86		0,00E+00	0	0	53		0,00E+00
5	0	0	86		0,00E+00	0	0	53		0,00E+00
6	14,75	0,8	=====		8,61E-02	10,00	0,8	=====		9,73E-02
7	20	0	241		0,00E+00	20	0	53		0,00E+00
	Zn	Ac	At	Wpl.y	k / I	Yn	Ac	At	Wpl.z	
8	19,22	15,80	= 15,80	148	0	10,00	15,90	= 15,80	80	

Il materiale del profilo è acciaio S 275 con $f_y = 275 \text{ N/mm}^2$ e valore di $\epsilon = 0,9244$.
 La sezione non è suscettibile di fenomeni distorsionali.
 Sono esaminati di seguito due casi di presso-flessione; il primo con momento positivo (compressione della flangia superiore) ed il secondo con momento negativo.

Caso 1 - **momento flettente positivo** (compressione della flangia superiore)

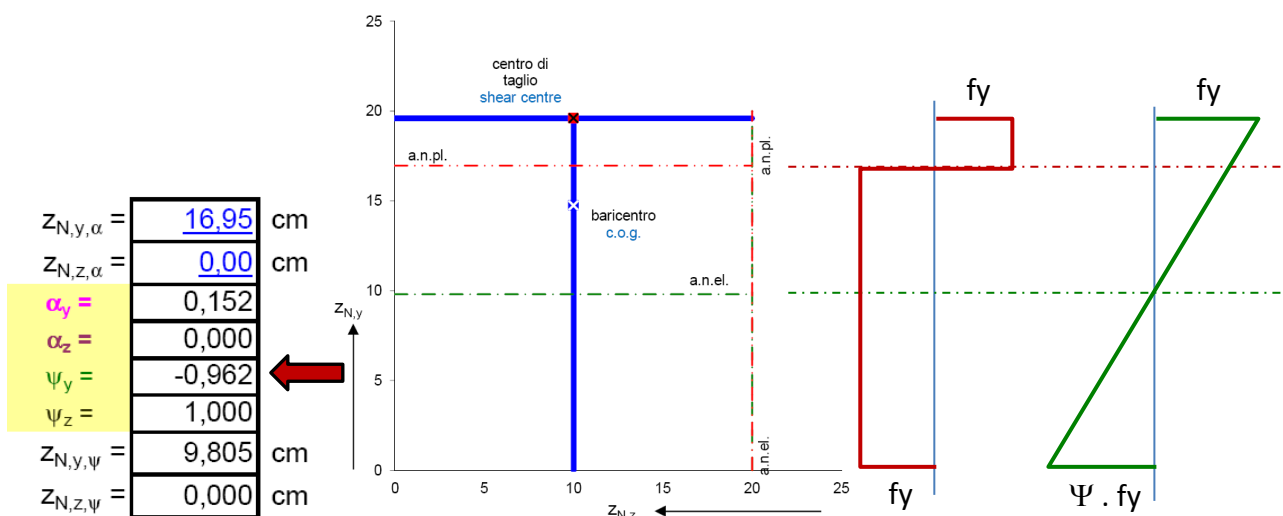
$f_y = 27,5$ kN/cm ²		
resistenza		stabilità
$M_{y,Ed} =$	700	kNcm
$M_{z,Ed} =$		kNcm
$N_{Ed} =$	100	kN
$V_{y,Ed} =$		kN
$V_{z,Ed} =$		kN

Lo stato tensionale conseguente allo **snervamento delle fibre compresse più esterne** (f_y) ed alla combinazione di progetto N-M è calcolato per ciascuna parte della sezione. Ciò consente di definire la classe delle singole parti e quindi quella dell'intera sezione presso-flessa come maggior valore rilevato.

RAPPORTI LARGHEZZA/SPESSORE						CLASSIFICAZIONE DEGLI ELEMENTI							
ELEM.	SPESSORE	LUNGH.	parti interne o sporgenti	l/s	l/s	comp. elastico		comp. plastico		classe	classe	classe	classe
i	s = cm	c = cm		parti int.	parti spor.	$\Psi_{c,y}$	$\Psi_{c,z}$	$\alpha_{c,y}$	$\alpha_{c,z}$	1	2	3	classe elem.
1	0,8	19,6	sporgente	0	24,5	-1,001	0	0,1352	0	167,41	186,01	94,757	1
2	0,8	10	sporgente	0	12,5	1	0	1	0	8,3197	9,2442	12,73	3
3	0	10	sporgente	0	0	0	0	0	0	8,3197	9,2442	25,311	1
4	0,8	10	sporgente	0	12,5	1	0	1	0	8,3197	9,2442	12,73	3

Si può notare che la sezione è definita di classe 3 per le due parti sporgenti della flangia uniformemente compressa essendo $l/s = 12,5 < 12,73$ ($\sim 14.\varepsilon$).

Posizione dell'asse neutro plastico ed elastico, insieme ai parametri tensionali α_y e ψ_y , sono calcolati e rappresentati nella figura seguente.



Si noti che per il comportamento elastico $\psi = -0,962$ e che l'anima è tesa al di sotto dell'asse neutro elastico ($Z_{N,y,\psi} = 9,8$ cm).

Il rapporto larghezza/spessore delle parti sporgenti della flangia è molto vicino al limite della classe 3 ($12,5 < 12,73$) per cui, a parità di sollecitazioni, una variazione geometrica minima che definisca una sezione di classe 4 con rapporto l/s prossimo al limite del rapporto della classe 3 (12,73) *dovrebbe produrre una verifica di resistenza con risultati molto vicini tra loro* ma vedremo che non è sempre così.

Seguiamo innanzitutto il criterio conservativo della norma.

Se ci fermassimo alla definizione di **classe 3** della nostra sezione la verifica di resistenza sarebbe eseguita in base alla seguente espressione "**conservativa**" applicabile in generale a sezioni di classe ≤ 3 (item 6.2.1 (7) EN 1993-1-1)

(7) As a conservative approximation for all cross section classes a linear summation of the utilization ratios for each stress resultant may be used. For class 1, class 2 or class 3 cross sections subjected to the combination of N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ and $M_{z,Ed}$ this method may be applied by using the following criteria:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (6.2)$$

where N_{Rd} , $M_{y,Rd}$ and $M_{z,Rd}$ are the design values of the resistance depending on the cross sectional classification and including any reduction that may be caused by shear effects, see 6.2.8.

NOTE For class 4 cross sections see 6.2.9.3(2).

Nella espressione, per N_{Ed} di compressione, $N_{Rd} = N_{c,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0}$ (& 6.2.4 (2))
in cui **A è la sezione lorda del profilo**

(2) The design resistance of the cross-section for uniform compression $N_{c,Rd}$ should be determined as follows:

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{for class 1, 2 or 3 cross-sections} \quad (6.10)$$

La resistenza di progetto a flessione della sezione $M_{y,Rd}$ è definita dalla norma in base alla seguente espressione per sezioni di classe 3 (item 6.2.5 (2) EN 1993-1-1)

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{for class 3 cross sections}$$

In cui si evidenzia il riferimento al **modulo di resistenza elastico minimo**.

La somma dei rapporti tra sollecitazioni di progetto e resistenze di progetto NON è quindi congrua ovvero non si riferisce necessariamente ad uno stesso punto della sezione dove la sovrapposizione degli effetti produrrebbe uno stato tensionale meno gravoso ma è semplicemente la somma dei rapporti tensionali massimi.

Nel nostro esempio, il modulo di resistenza minimo si ha al lembo inferiore della sezione dove il **momento flettente positivo** genera il più alto stato tensionale (di trazione). In quel punto però l'effetto della forza assiale di compressione riduce sensibilmente la tensione di trazione generata dal momento.

Se eseguiamo la verifica della sezione di **classe 3** con il criterio **“conservativo”** (che è proposto anche per le sezioni di classe 4 (item 6.2.9.3 (2)) come illustrato più avanti, otteniamo il seguente risultato :

COORDINATE DEL BARICENTRO

$$y'_G = 10,00 \text{ cm} \quad \text{step 1} \quad 10,00$$

$$z'_G = 14,75 \text{ cm} \quad \text{step 1} \quad 14,75$$

CARATTERISTICHE DELLA SEZIONE

$A_{c,eff} = 25,56 \text{ cm}^2$	step 1	31,68
$J_y = 1262,53 \text{ cm}^4$	step 1	1262,5
$J_z = 533,333 \text{ cm}^4$	step 1	533,33
$W_{eff,y,min} = 85,6 \text{ cm}^3$		
$W_{eff,z,min} = 53,3 \text{ cm}^3$		
$A_{v,y} = 16,00 \text{ cm}^2$	$W_{pl,y} = 148 \text{ cm}^3$	
$A_{v,z} = 15,68 \text{ cm}^2$	$W_{pl,z} = 80 \text{ cm}^3$	
$\rho_y = 0,000$	$V_{pl,Rd,y} = 242 \text{ kN}$	
$\rho_z = 0,000$	$V_{pl,Rd,z} = 237 \text{ kN}$	
	$(1 - \rho_y) = 1,000$	
	$(1 - \rho_z) = 1,000$	

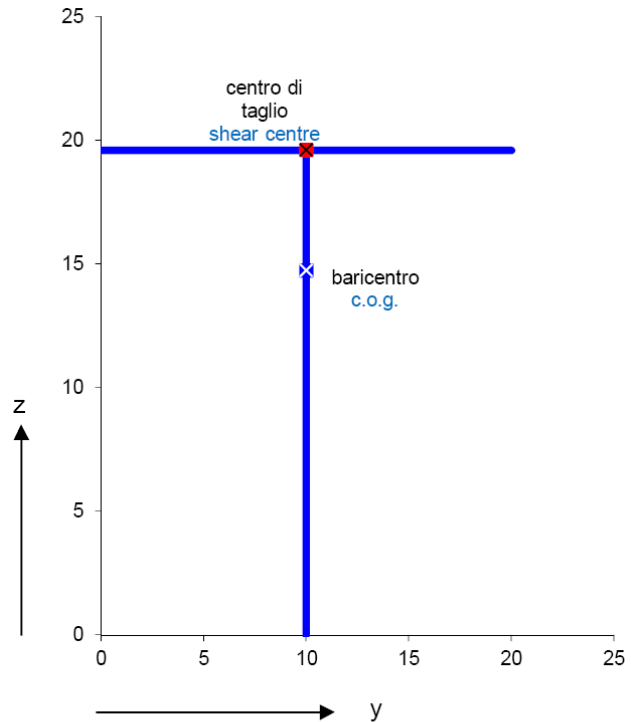
VERIFICA DI RESISTENZA

$$\gamma_{M0} = 1,05$$

spostamento z baricentro : $e_{Nz} = \text{cm} \quad 0,00$

spostamento y baricentro : $e_{Ny} = \text{cm} \quad 0,00$

$$\sigma_{max} = 11,33 \text{ kN/cm}^2 < 26,19$$



taglio di progetto <= 50% della resistenza a taglio

Si noti il valore dell'area efficace calcolata per compressione uniforme $A_{c,eff} < A$ ovvero $25,56 \text{ cm}^2 < 31,68 \text{ cm}^2$ dovuta alla riduzione delle parti compresse che però **non viene utilizzata per la verifica di sezioni di classe 3** (item 6.2.1 (7) EN 1993-1-1)

La tensione massima calcolata con il criterio conservativo è quindi data da :

$$\sigma_{max} = 100 / 31,68 + 700 / 85,6 = 11,33 \text{ kN/cm}^2$$

in cui l'effetto del momento flettente si riferisce **“teoricamente”** al lembo inferiore della sezione dove il modulo di resistenza elastico è minore.

Di seguito è riportato il calcolo della sezione efficace per effetto della sola compressione uniforme .

SEZIONE EFFICACE UNIFORMEMENTE COMPRESSA per sezioni di classe 4

COORDINATE DEL BARICENTRO

$$y''_G = 10,00 \text{ cm}$$

$$z''_G = 17,36 \text{ cm}$$

CARATTERISTICHE DELLA SEZIONE

$$A_{c,eff} = 25,562 \text{ cm}^2$$

$$J_y = 327,641 \text{ cm}^4$$

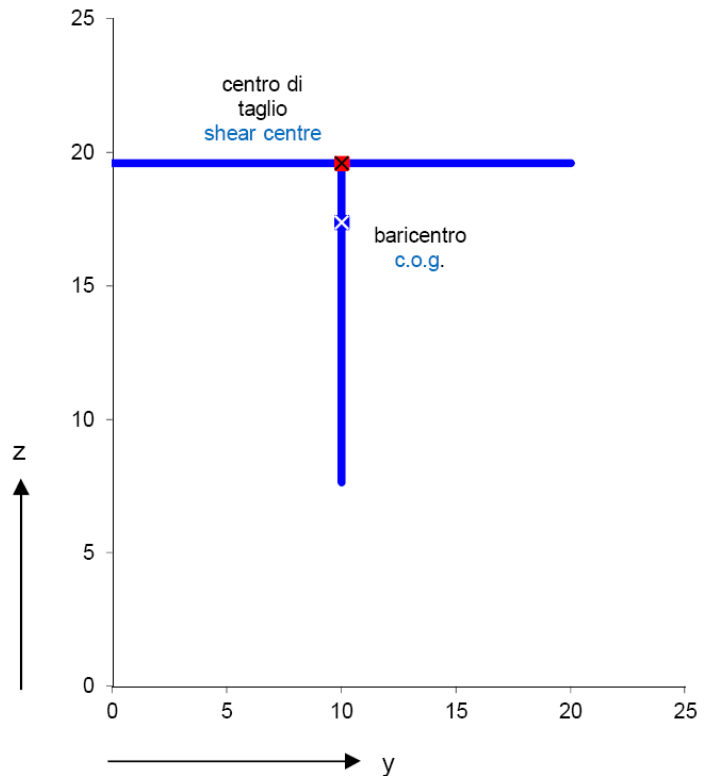
$$J_z = 533,333 \text{ cm}^4$$

$$W_{y,min} = 18,9 \text{ cm}^3$$

$$W_{z,min} = 53,3 \text{ cm}^3$$

spostamento z baricentro : $e_{Nz} = \text{cm} \quad -2,61$

spostamento y baricentro : $e_{Ny} = \text{cm} \quad 0,00$

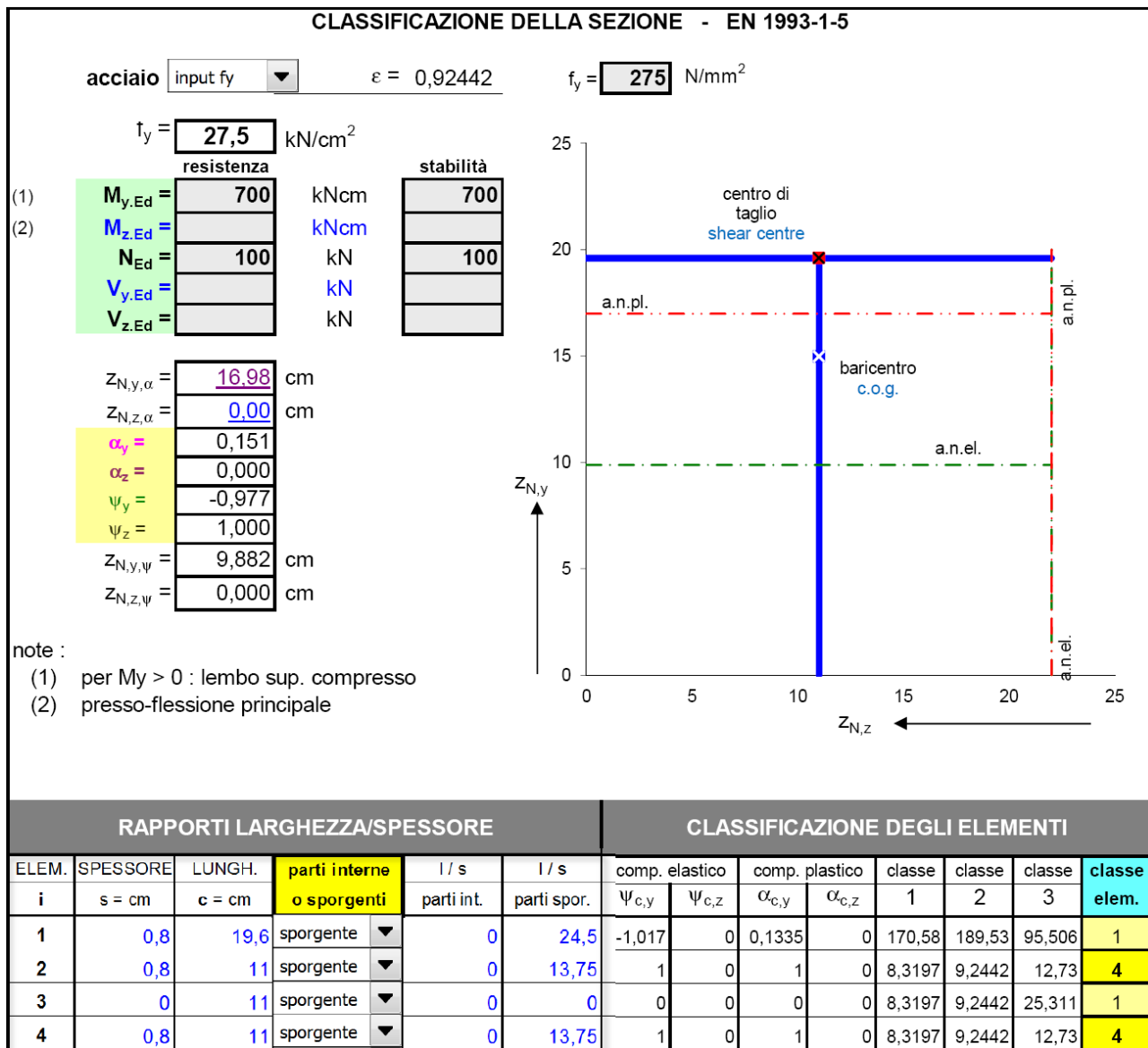


DATI GEOMETRICI					CALCOLO DELLE LUNGHEZZE EFFICACI								
ELEM.	SPESS.	LUNGH.	l / s	l / s	tensioni iniziali		parametri di stabilità					l eff.	l tesa
i	s = cm	c = cm	parti int.	parti spor.	σ_s	σ_d	ψ_i	$k_{\sigma,int}$	$k_{\sigma,spor}$	λ_p	ρ	$c_{eff} = \text{cm}$	$c_{rid} = \text{cm}$
1	0,8	19,6	0	24,5	3,1566	3,1566	1	0	0,43	1,42313	0,60985	11,953	0
2	0,8	10	0	12,5	3,1566	3,1566	1	0	0,43	0,72609	1	10	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,8	10	0	12,5	3,1566	3,1566	1	0	0,43	0,72609	1	10	0

Il fattore di riduzione della lunghezza dell'anima per compressione uniforme è 0,61.

Nel calcolo di verifica di sezioni di **classe 3** il momento aggiuntivo generato dallo spostamento del baricentro ($e = -2,61$ cm) della sezione efficace rispetto alla sezione lorda soggetta alla sola forza di compressione, **non viene tenuto in conto** secondo quanto stabilito dalla norma (item 6.2.1 (7) EN 1993-1-1).

Se incrementiamo di poco la sola larghezza della piattabanda da 20 cm a 22 cm, lasciando di segno positivo il momento, **la sezione diventa di classe 4** poiché il rapporto l/s della parte sporgente della flangia supera il rapporto limite per la classe 3 ($l/s = 13,75 > 12,73$) come rappresentato nel seguente foglio di calcolo :



Per una sezione di **classe 4** deve essere soddisfatto il seguente criterio “conservativo” (item 6.2.9.3 (2) EN 1993-1-1) basato sulla **somma dei rapporti tensionali massimi**

EN 1993-1-1: 2005 (E)

(2) The following criterion should be met:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1 \quad (6.44)$$

where A_{eff} is the effective area of the cross-section when subjected to uniform compression

$W_{eff,min}$ is the effective section modulus (corresponding to the fibre with the maximum elastic stress) of the cross-section when subjected only to moment about the relevant axis

e_N is the shift of the relevant centroidal axis when the cross-section is subjected to compression only, see 6.2.2.5(4)

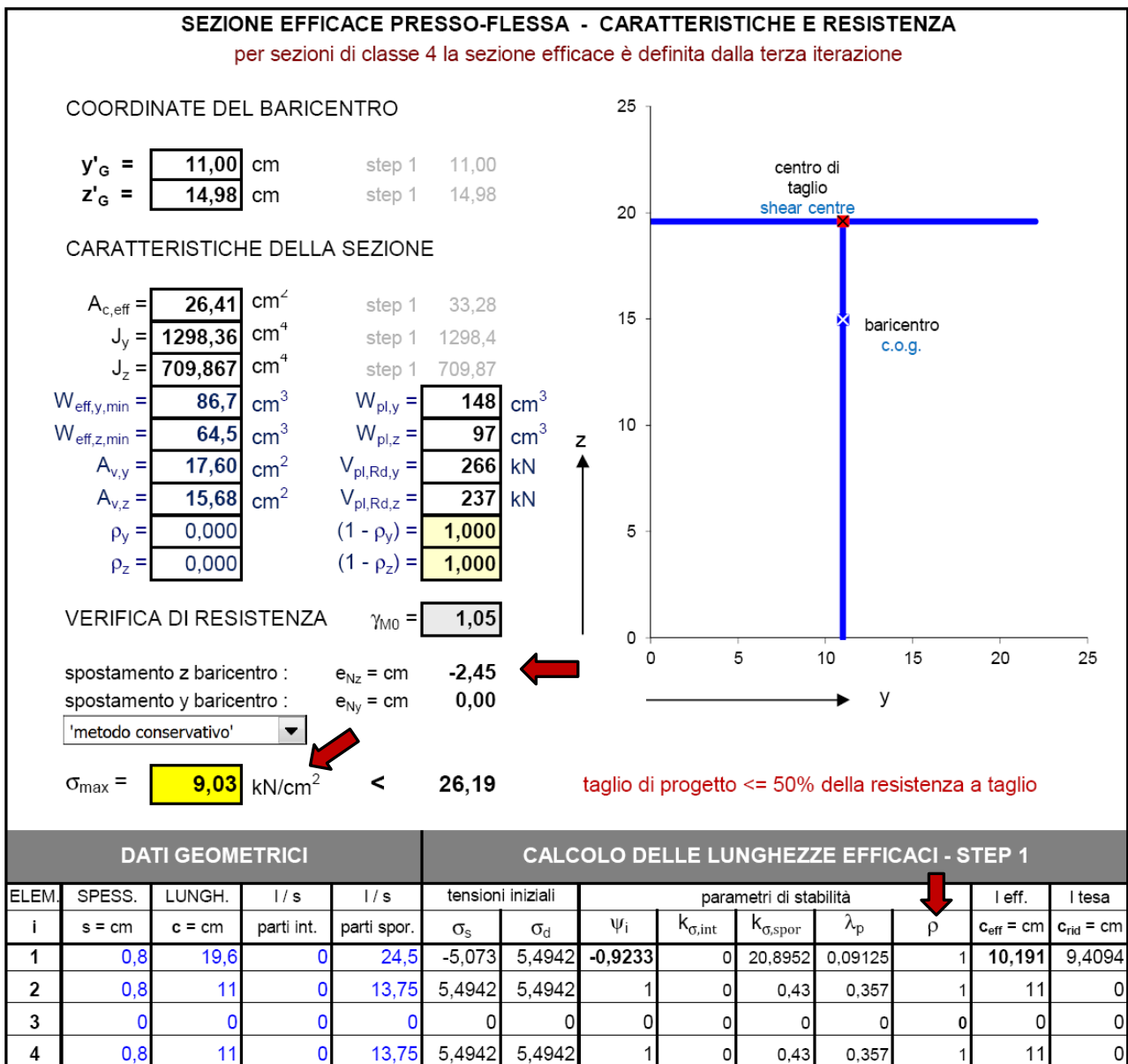
ovvero :

A_{eff} è l'area efficace della sezione soggetta a compressione uniforme

$W_{eff,min}$ è il modulo di resistenza della sezione efficace, **corrispondente alla fibra più sollecitata**, soggetta al solo momento intorno al relativo asse.

e_N è lo spostamento dell'asse baricentrico della sezione **soggetta a compressione uniforme**

La verifica di resistenza della sezione di **classe 4** produce il seguente risultato :



Si noti che nonostante la sezione sia definita di **classe 4** i fattori di riduzione delle parti compresse o presso-flesse ρ sono uguali a **1** essendo il parametro di stabilità $\lambda_p = 0,357 < 0,748$ per ciascuna parte sporgente della sezione ;

il comportamento sarebbe quindi equiparabile a quello di una sezione di classe 3.

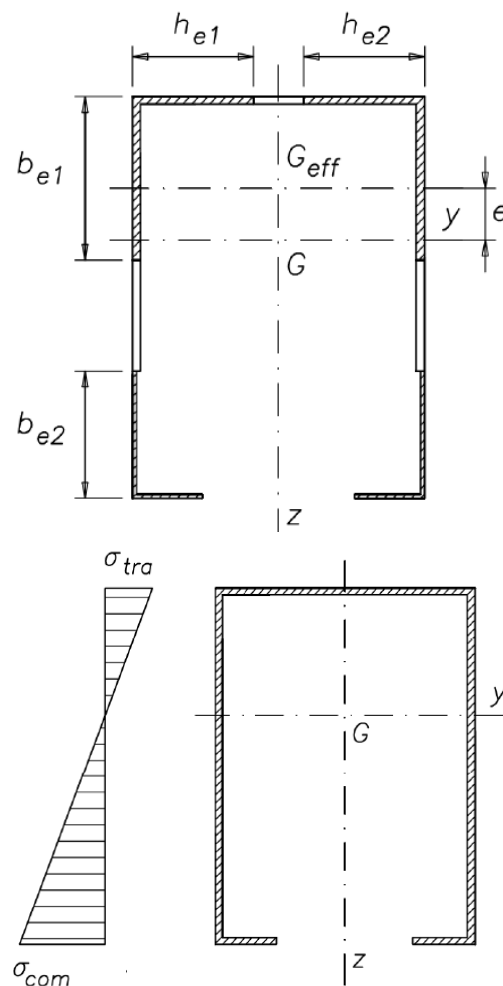
Seguendo alla lettera la norma bisogna però eseguire la verifica con l'espressione sopra riportata relativa a sezione di **classe 4** notando che, **pur con un'area efficace ridotta ed un modulo di resistenza minimo di poco incrementato**, la tensione di compressione al lembo superiore risulta **sensibilmente minore (9,03 kN/cm²)** di quella calcolata per la sezione di classe 3 (**11,33 kN/cm²**).

Ciò è dovuto allo spostamento del baricentro della sezione efficace verso l'alto **per effetto della sola compressione uniforme** e quindi alla nascita di un momento di trasporto di segno opposto al momento di progetto dato dalla seguente espressione :

$$\Delta M_{Ed} = - N_{Ed} \cdot e_N = - 245,35 \text{ kNcm}$$

$$\sigma_{max} = 100 / 26,41 + (700-245,35) / 86,7 = 9,03 \text{ kN/cm}^2$$

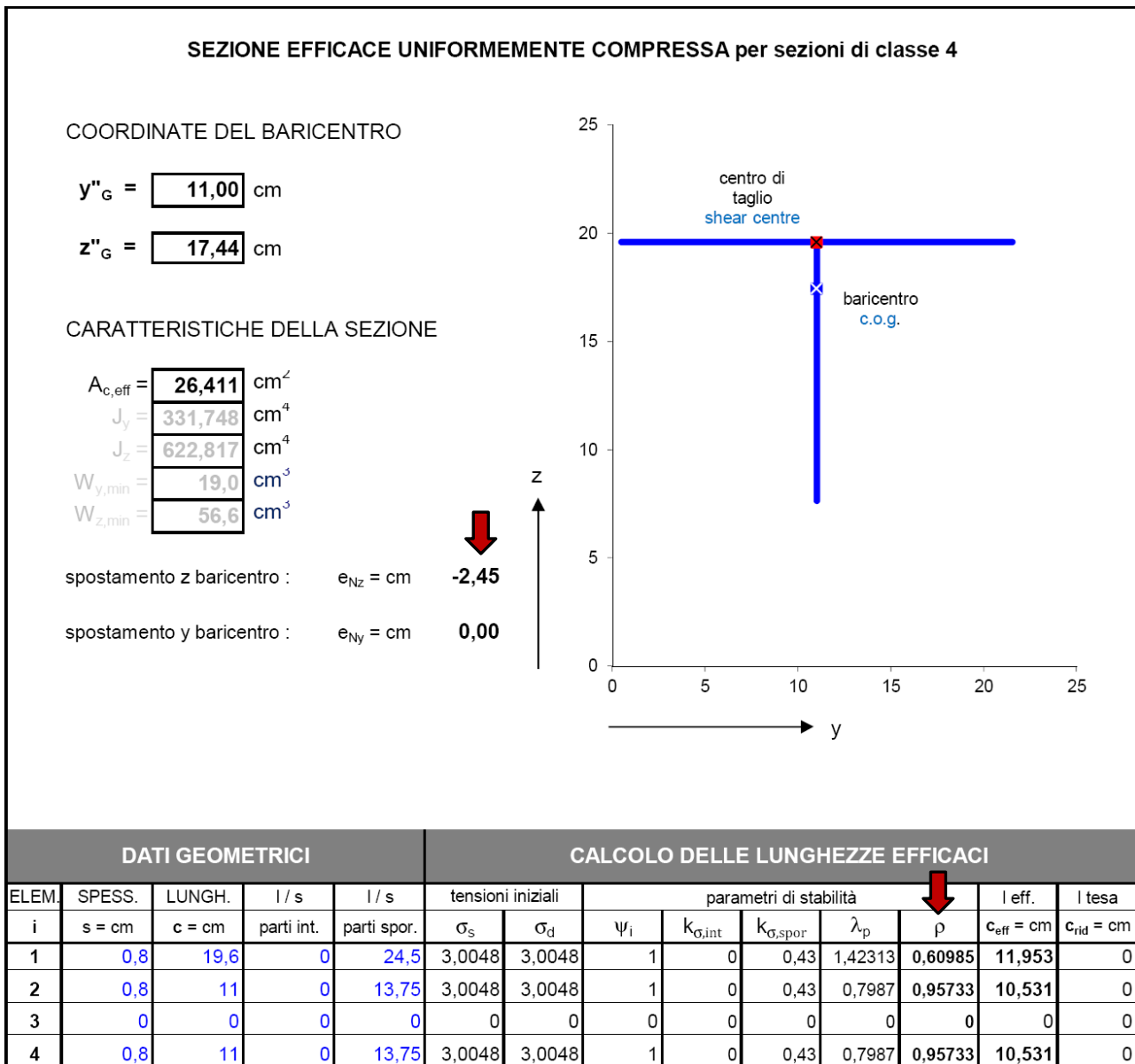
la seguente figura (generica) illustra l'effetto dello spostamento del baricentro :



Se eseguiamo la verifica come per sezione di classe 3 (vista la vicinanza geometrica tra le due sezioni ed i coefficienti di riduzione delle parti compresse = 1, avremmo il seguente risultato :

$$\sigma_{max} = 100 / 33,28 + 700 / 86,7 = 11,08 \text{ kN/cm}^2 \text{ (} \sim 11,33 \text{ della sezione } 20 \times 20 \text{)}$$

L'area efficace e lo spostamento del baricentro **per effetto della sola forza di compressione** sono di seguito riportati insieme al calcolo delle parti efficaci della sezione :



Utilizziamo ora il criterio di **"congruenza"** sollecitazioni-resistenze

Il criterio fornisce l'effettivo stato tensionale nel punto maggiormente sollecitato della sezione in base alla sovrapposizione degli effetti N-M con riferimento alla seguente generica espressione citata dalla norma sia per sezioni di classe 3 che per sezioni di classe 4.

6.2.9.2 Class 3 cross-sections

(1) In the absence of shear force, for Class 3 cross-sections the maximum longitudinal stress should satisfy the criterion:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.42)$$



where $\sigma_{x,Ed}$ is the design value of the local longitudinal stress due to moment and axial force taking account of fastener holes where relevant, see 6.2.3, 6.2.4 and 6.2.5

6.2.9.3 Class 4 cross-sections

(1) In the absence of shear force, for Class 4 cross-sections the maximum longitudinal stress $\sigma_{x,Ed}$ calculated using the effective cross sections (see 5.5.2(2)) should satisfy the criterion:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.43)$$

where $\sigma_{x,Ed}$ is the design value of the local longitudinal stress due to moment and axial force taking account of fastener holes where relevant, see 6.2.3, 6.2.4 and 6.2.5

Eseguiamo la verifica per la **sezione originaria di classe 3** (dimensioni **20 x 20 cm**) sempre nel caso di momento positivo con compressione della flangia superiore.

i **moduli elastici** di resistenza alle estremità della sezione hanno i seguenti valori :

$$W_{el,y,sup} = 240,46 \text{ cm}^3$$

$$W_{el,y,inf} = 85,6 \text{ cm}^3$$

Al lembo compresso si ha :

$$\sigma_c = 100 / 31,68 + 700 / 240,46 = 6,07 \text{ kN/cm}^2$$

Al lembo teso si ha :

$$\sigma_t = 100 / 31,68 - 700 / 85,6 = -5,02 \text{ kN/cm}^2$$

La tensione elastica massima è quindi **6,07** kN/cm²

Di seguito è riportato il calcolo col metodo “conservativo” della sezione (20 x 20 cm) con momento flettente invertito di segno :

SEZIONE EFFICACE PRESSO-FLESSA - CARATTERISTICHE E RESISTENZA

➔ per sezioni di classe 4 la sezione efficace è definita considerando separatamente gli effetti delle sollecitazioni

COORDINATE DEL BARICENTRO

$y'_G = 10,00$ cm step 1 10,00
 $z'_G = 15,60$ cm step 1 15,06

CARATTERISTICHE DELLA SEZIONE

➔ $A_{c,eff} = 25,56$ cm² step 1 31,00
 ➔ $J_y = 1262,53$ cm⁴ step 1 1119,8
 $J_z = 533,333$ cm⁴ step 1 533,33
 $W_{eff,y,min} = 80,9$ cm³ $W_{pl,y} = 148$ cm³
 $W_{eff,z,min} = 53,3$ cm³ $W_{pl,z} = 80$ cm³
 $A_{v,y} = 16,00$ cm² $V_{pl,Rd,y} = 242$ kN
 $A_{v,z} = 15,68$ cm² $V_{pl,Rd,z} = 237$ kN
 $\rho_y = 0,000$ $(1 - \rho_y) = 1,000$
 $\rho_z = 0,000$ $(1 - \rho_z) = 1,000$

VERIFICA DI RESISTENZA $\gamma_{M0} = 1,05$

spostamento z baricentro : $e_{Nz} =$ cm -2,61
 spostamento y baricentro : $e_{Ny} =$ cm 0,00

'metodo conservativo'

$\sigma_{max} = 15,79$ kN/cm² < 26,19 taglio di progetto <= 50% della resistenza a taglio

DATI GEOMETRICI					METODO CONGRUENTE - LUNGHEZZE EFFICACI - STEP 1								
ELEM.	SPESS.	LUNGH.	I / s		tensioni iniziali		parametri di stabilità				I eff.	I tesa	
i	s = cm	c = cm	parti int.	parti spor.	σ_s	σ_d	ψ_i	$k_{\sigma,int}$	$k_{\sigma,spor}$	λ_p	ρ	$c_{eff} =$ cm	$c_{rid} =$ cm
1	0,8	19,6	0	24,5	11,334	0,4672	0,0412	0	0,56146	0,79956	0,95661	18,75	0
2	0,8	10	0	12,5	0,4672	0,4672	1	0	0,43	0,09464	1	10	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,8	10	0	12,5	0,4672	0,4672	1	0	0,43	0,09464	1	10	0

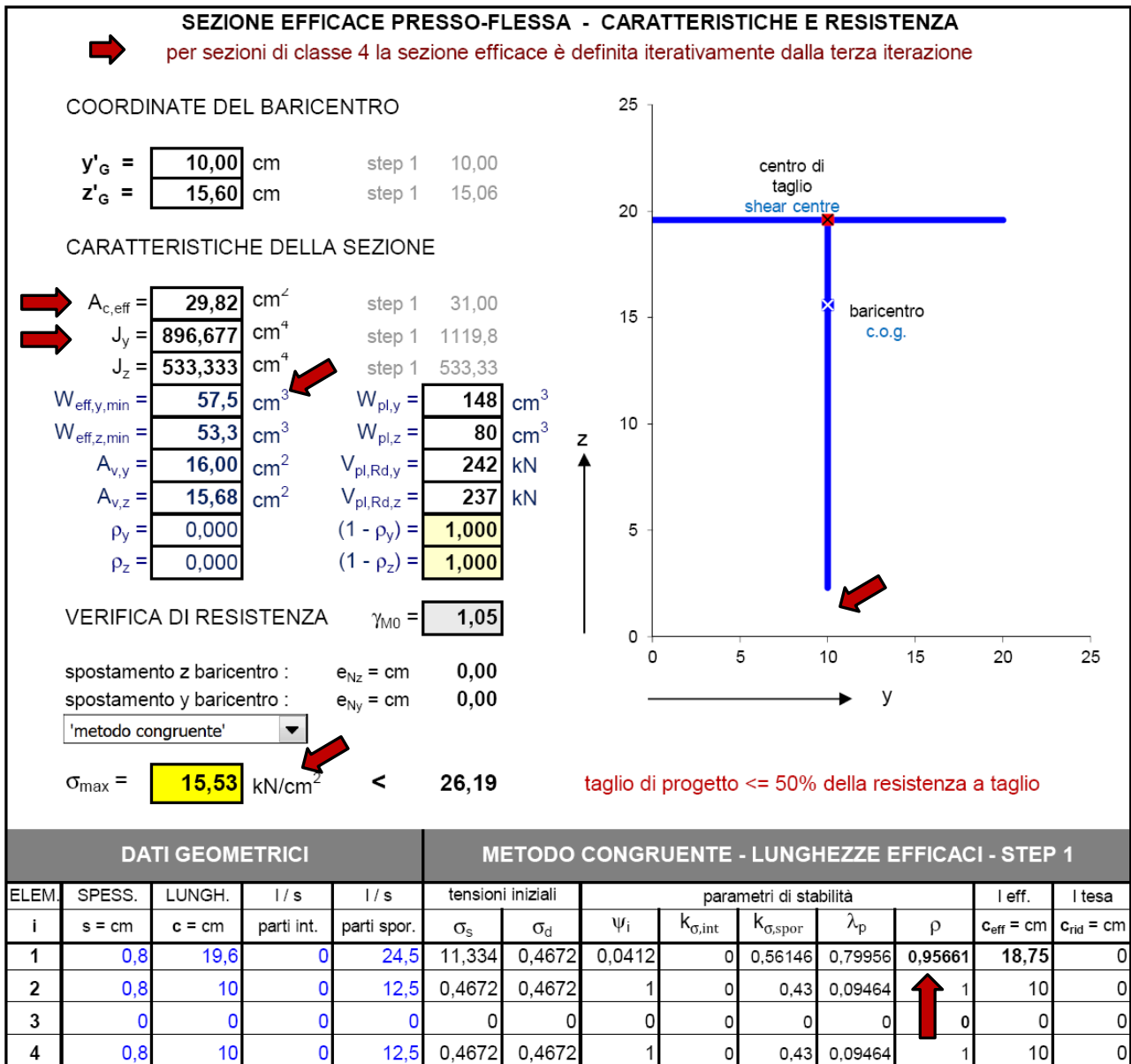
Il calcolo è eseguito applicando il criterio di verifica per sezioni di classe 4 ovvero :

$$\sigma_{max} = 100 / 25,56 + (700 + 100 \times 2,61) / 80,9 = 15,79 \text{ kN/cm}^2$$

Usando il metodo “conservativo” l’area efficace è calcolata per sola compressione mentre i momenti di inerzia e quindi i moduli di resistenza efficace sono calcolati per sola flessione al terzo step del processo di iterazione.

La verifica a flessione è eseguita utilizzando il momento resistente efficace minimo ($W_{eff,y,min}$) registrato al lembo inferiore (item 6.2.9.3 (2) EN 1993-1-1).

Se usiamo il **metodo "congruente"** si ottiene una tensione di compressione al lembo inferiore minore di quella ottenuta col metodo "conservativo" poiché sia l'**area efficace (A_{eff})** che il **modulo di resistenza efficace ($W_{eff,y}$)** sono calcolati **iterativamente in modo univoco tenendo implicitamente conto dello spostamento del baricentro (e_N)** in ogni passo di interazione.



Si noti il valore dell'area efficace ridotta dall'effetto combinato della compressione e flessione come pure il momento di inerzia ed il relativo modulo di resistenza. La verifica di resistenza è eseguita in base alla seguente espressione in cui non compare il prodotto della forza assiale per lo spostamento del baricentro in quanto già considerati nel calcolo iterativo delle caratteristiche geometriche della sezione efficace.

$$\sigma_{max} = 100 / 29,82 + 700 / 57,5 = 15,53 \text{ kN/cm}^2$$

Se eseguiamo il calcolo per la **sezione incrementata (20 x 22 cm) soggetta a momento negativo**, la sezione è sempre di **classe 4** ed il valore della tensione di compressione al lembo inferiore della sezione, ottenuta sia col metodo “conservativo” che col metodo “congruente”, è “confrontabile” con quella ottenuta, a parità di metodo, per la sezione originaria (20 x 20 cm)

Metodo “conservativo” (20x22 cm)				Metodo “congruente” (20x22 cm)			
COORDINATE DEL BARICENTRO				COORDINATE DEL BARICENTRO			
$y'_G =$	11,00 cm	step 1	11,00	$y'_G =$	11,00 cm	step 1	11,00
$z'_G =$	15,67 cm	step 1	15,24	$z'_G =$	15,67 cm	step 1	15,24
CARATTERISTICHE DELLA SEZIONE				CARATTERISTICHE DELLA SEZIONE			
$A_{c,eff} =$	26,41 cm ²	step 1	32,71	$A_{c,eff} =$	31,72 cm ²	step 1	32,71
$J_y =$	1298,36 cm ⁴	step 1	1173,5	$J_y =$	976,316 cm ⁴	step 1	1173,5
$J_z =$	709,867 cm ⁴	step 1	709,87	$J_z =$	709,867 cm ⁴	step 1	709,87
$W_{eff,y,min} =$	82,8 cm ³	$W_{pl,y} =$	148 cm ³	$W_{eff,y,min} =$	62,3 cm ³	$W_{pl,y} =$	148 cm ³
$W_{eff,z,min} =$	64,5 cm ³	$W_{pl,z} =$	97 cm ³	$W_{eff,z,min} =$	64,5 cm ³	$W_{pl,z} =$	97 cm ³
$A_{v,y} =$	17,60 cm ²	$V_{pl,Rd,y} =$	266 kN	$A_{v,y} =$	17,60 cm ²	$V_{pl,Rd,y} =$	266 kN
$A_{v,z} =$	15,68 cm ²	$V_{pl,Rd,z} =$	237 kN	$A_{v,z} =$	15,68 cm ²	$V_{pl,Rd,z} =$	237 kN
$\rho_y =$	0,000	$(1 - \rho_y) =$	1,000	$\rho_y =$	0,000	$(1 - \rho_y) =$	1,000
$\rho_z =$	0,000	$(1 - \rho_z) =$	1,000	$\rho_z =$	0,000	$(1 - \rho_z) =$	1,000
VERIFICA DI RESISTENZA $\gamma_{M0} =$ 1,05				VERIFICA DI RESISTENZA $\gamma_{M0} =$ 1,05			
spostamento z baricentro :		$e_{Nz} =$ cm	-2,45	spostamento z baricentro :		$e_{Nz} =$ cm	0,00
spostamento y baricentro :		$e_{Ny} =$ cm	0,00	spostamento y baricentro :		$e_{Ny} =$ cm	0,00
<input type="text" value="'metodo conservativo'"/>				<input type="text" value="'metodo congruente'"/>			
$\sigma_{max} =$	15,20 kN/cm ²	<	26,19	$\sigma_{max} =$	14,39 kN/cm ²	<	26,19

Di seguito il calcolo di verifica della sezione (20x22 cm) col metodo “conservativo” :

$$\sigma_{max} = 100 / 26,41 + (700 + 100 \times 2,45) / 82,8 = 15,20 \text{ kN/cm}^2$$

confrontabile col valore della tensione **15,79** kN/cm² calcolata per la sezione originaria 20 x 20 cm

Di seguito il calcolo di verifica della sezione (20x22 cm) col metodo “congruente” :

$$\sigma_{max} = 100 / 31,72 + 700 / 62,3 = 14,39 \text{ kN/cm}^2$$


confrontabile col valore della tensione **15,53** kN/cm² calcolata per la sezione originaria 20 x 20 cm


A complicare il quadro esposto si aggiungono i criteri di calcolo di sezioni composte da piatti sottili riportati nella norma **EN 1993-1-5** che definisce nel seguente modo la “sezione efficace” :


4.3 Effective cross section

(1) In calculating longitudinal stresses, account should be taken of the combined effect of shear lag and plate buckling using the effective areas given in 3.3.

(2) The effective cross sectional properties of members should be based on the effective areas of the compression elements and on the effective^s area of the tension elements due to shear lag.

(3)  The effective area A_{eff} should be determined assuming that the cross section is subject only to stresses due to uniform axial compression. For non-symmetrical cross sections the possible shift e_N of the centroid of the effective area A_{eff} relative to the centre of gravity of the gross cross-section, see Figure 4.1, gives an additional moment which should be taken into account in the cross section verification using 4.6.

(4)  The effective section modulus W_{eff} should be determined assuming the cross section is subject only to bending stresses, see Figure 4.2. For biaxial bending effective section moduli should be determined about both main axes.

 **NOTE:** As an alternative to 4.3(3) and (4) a single effective section may be determined from N_{Ed} and M_{Ed} acting simultaneously. The effects of e_N should be taken into account as in 4.3(3). This requires an iterative procedure.

ovvero, **indipendentemente dalla classificazione della sezione**, l’area efficace di una sezione soggetta a forza assiale e momento è determinata dall’effetto della sola compressione uniforme mentre il modulo efficace dall’effetto del solo momento flettente. In alternativa la sezione efficace può essere determinata considerando la forza assiale e il momento agenti simultaneamente tenendo conto dello spostamento del baricentro attraverso un procedimento iterativo.

La verifica di resistenza in caso di presso-flessione bi-assiale è quindi data dalla seguente espressione (item 4.6 (1) EN 1993-1-5):

NOTE: For members subject to compression and biaxial bending the above equation (4.14) may be modified as follows:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{y,N}}{\frac{f_y W_{y,eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{z,N}}{\frac{f_y W_{z,eff}}{\gamma_{M0}}} \leq 1,0 \quad (4.15)$$

con il noto significato dei simboli.

Si noti la differenza con l’espressione della norma EN 1993-1-1 relativamente ai moduli di resistenza a flessione; in questo caso **non** si fa riferimento ai **moduli efficaci minimi** del criterio “conservativo” della norma EN 1993-1-1 ma a **moduli**

efficaci che possono essere riferiti a ciascun lembo della sezione in cui si vuole determinare **l'effettivo stato tensionale**.

Se si prendesse alla lettera il dettato della norma EN 1993-1-5 il concetto di "sezione efficace" si potrebbe applicare anche a sezioni di **classe 3** utilizzando per la verifica di resistenza l'area efficace determinata per compressione uniforme ed i moduli di resistenza efficaci determinati per flessione nei due piani (metodo "conservativo") oppure i valori dell'area e dei moduli determinati considerando l'azione simultanea N-M in un procedimento iterativo (metodo "congruente").

Metodo "conservativo" :	Metodo "congruente" :
momento positivo (classe 3): $\sigma_c = 100 / 25,56 + (700 - 261) / 240,46 = 5,74 \text{ kN/cm}^2$ e al lembo opposto (anima) : $\sigma_t = 100 / 25,56 - (700 - 261) / 85,6 = -1,22 \text{ kN/cm}^2$	momento positivo (classe 3): $\sigma_c = 100 / 31,68 + 700 / 240,46 = 6,07 \text{ kN/cm}^2$ e al lembo opposto (anima) : $\sigma_t = 100 / 31,68 - 700 / 85,6 = -5,02 \text{ kN/cm}^2$
momento negativo (classe 4): $\sigma_c = 100 / 25,56 - (700 + 261) / 286,8 = 0,561 \text{ kN/cm}^2$ e al lembo opposto (anima) : $\sigma_t = 100 / 25,56 + (700 + 261) / 80,9 = 15,79 \text{ kN/cm}^2$	momento negativo (classe 4): $\sigma_c = 100 / 29,82 - 700 / 203,68 = -0,08 \text{ kN/cm}^2$ e al lembo opposto (anima) : $\sigma_t = 100 / 29,82 + 700 / 57,5 = 15,53 \text{ kN/cm}^2$

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa dei casi esaminati messi a confronto per meglio comprendere le incongruenze delle norme oggetto di questo articolo:

metodo	Sezione (*)	Momento positivo			Momento negativo		
		classe	fatt. rid.	tensione	classe	fatt. rid.	tensione
Conservativo EN 1993-1-1	Sez. 1	3	anima =1	11,33	4	anima <1	15,79
			flangia =1			flangia=1	
	Sez. 2	4	anima =1	9,03	4	anima <1	15,20
			flangia =1			flangia=1	
Congruente EN 1993-1-1	Sez. 1	3	anima =1	-5,02	4	anima <1	15,53
			flangia =1	6,07		flangia=1	-0,083
	Sez. 2	4	anima =1	1,46	4	anima <1	14,39
			flangia =1	5,54		flangia=1	0,05
Conservativo EN 1993-1-5	Sez. 1	3	anima =1	-1,22	4	anima <1	15,79
			flangia =1	5,74		flangia=1	0,56
Congruente EN 1993-1-5	Sez. 1	3	anima =1	-5,02	4	anima <1	15,53
			flangia =1	6,07		flangia=1	-0,083

(*) **sez. 1** : profilo a T 20 x 20
 Sez. 2 : profilo a T 20 x 22

Dal confronto risulta che per la sez. 1 (20 x 20 cm), nel caso di momento positivo il metodo “conservativo” secondo EN 1993-1-1 produce risultati tensionali anche molto maggiori di quelli ottenuti col metodo “congruente” e solo nel caso di momento flettente negativo si hanno risultati “confrontabili” al lembo inferiore dell’anima. Al di là delle incongruenze della norma sui criteri di classificazione e definizione della sezione efficace, si intuisce che il metodo “conservativo” fornisce una risposta “soddisfacente” nel caso in cui si abbiano dubbi sul segno del momento ma qualora questo fosse certo (come nel caso di momento flettente positivo dell’esempio qui presentato), lo stesso metodo potrebbe essere molto punitivo per la sezione.

Conclusioni :

Una sezione presso-flessa definita di classe 3 può diventare di classe 4 aumentando anche di poco la lunghezza di una sua parte compressa, a parità di sollecitazioni in valore e segno; a sua volta la sezione di classe 4 può non richiedere necessariamente la riduzione (ρ) delle parti compresse dipendendo quest’ultima dalla limitazione del parametro di stabilità λ_p (per le parti compresse sporgenti ad esempio, solo se $\lambda_p > 0,748$ il fattore di riduzione $\rho < 1$). Il passaggio “formale” dalla classe 3 alla classe 4 implica l’uso di due criteri di verifica sostanzialmente diversi ovvero :

- per le sezioni di classe 3 la verifica è eseguita sulla base delle caratteristiche geometriche elastiche della **sezione interamente reagente** non considerando l’eventuale riduzione dell’area uniformemente compressa e l’eventuale momento aggiuntivo generato dallo spostamento del baricentro;
- per le sezioni di classe 4 la verifica è eseguita con riferimento alle caratteristiche geometriche elastiche della **sezione efficace** ottenute in base a due criteri ; il primo (“**conservativo**”) determina l’area efficace in conseguenza di uno stato di compressione uniforme ed i moduli di resistenza efficaci **minimi** conseguenti al solo stato di flessione nei piani principali ; il secondo (“**congruente**”) definisce l’area efficace ed i moduli di resistenza efficaci in modo univoco considerando forza assiale e momenti flettenti agenti contemporaneamente. Per entrambi i criteri viene utilizzato un procedimento iterativo che tiene conto del momento aggiuntivo generato dallo spostamento del baricentro della sezione efficace.

La norma EN 1993-1-5 propone il criterio “conservativo” indipendentemente dalla classe della sezione **ma tenendo conto dei moduli di resistenza efficaci riferiti al punto della sezione oggetto di verifica**. La stessa norma fa riferimento in una nota alla possibilità alternativa di utilizzare un procedimento iterativo per determinare univocamente, in base all’azione simultanea di forza assiale e momenti, le caratteristiche geometriche della sezione efficace (metodo “congruente”).

La ricerca di metodi sofisticati di classificazione non ha quindi alcuna giustificazione alla luce di quanto dimostrato poiché è il diverso criterio di verifica fornito dalla norma per le due classi (3 e 4) che fa la differenza.

Dall'esempio proposto emerge l'importanza fondamentale di attribuire alla sezione oggetto di verifica le sollecitazioni flessionali **effettivamente agenti con il loro segno specie nel caso di sezioni mono-simmetriche ancor più se di classe 4** dove lo spostamento del baricentro della sezione efficace gioca un ruolo importante nella verifica di resistenza della sezione e di stabilità dell'elemento.

I programmi di calcolo per verifica di sezioni presso-flesse da me elaborati seguono il criterio della **"congruenza sollecitazioni-resistenze"** col calcolo tensionale eseguito usando la sovrapposizione degli effetti in uno stesso punto. Il solo programma CARGEO qui utilizzato come esempio consente la verifica anche col metodo "conservativo" lasciando al progettista la scelta del grado di sicurezza che vuole attribuire alla struttura in esame.