



ELEMENTO COMPOSTO CALASTRELLATO PRESSO-FLESSO

Domenico Leone

fare sismica
 **APPUNTI**

ELEMENTO COMPOSTO CALASTRELLATO PRESSO-FLESSO

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, "Componenti strutturali in alluminio" edito da Dario Flaccovio editore 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

ELEMENTO COMPOSTO CALASTRELLATO PRESSO-FLESSO

BAIONETTA DI TELAIO INDUSTRIALE

Questo articolo e l'esempio collegato affronta un tema non trattato dagli Eurocodici e dalle NTC se non per elementi strutturali incernierati alle estremità e soggetti a sola compressione assiale. Lo schema strutturale di seguito rappresentato prevede correnti (montanti) in profilo laminato o saldato collegati tra loro da calastrelli o tralicciatura.

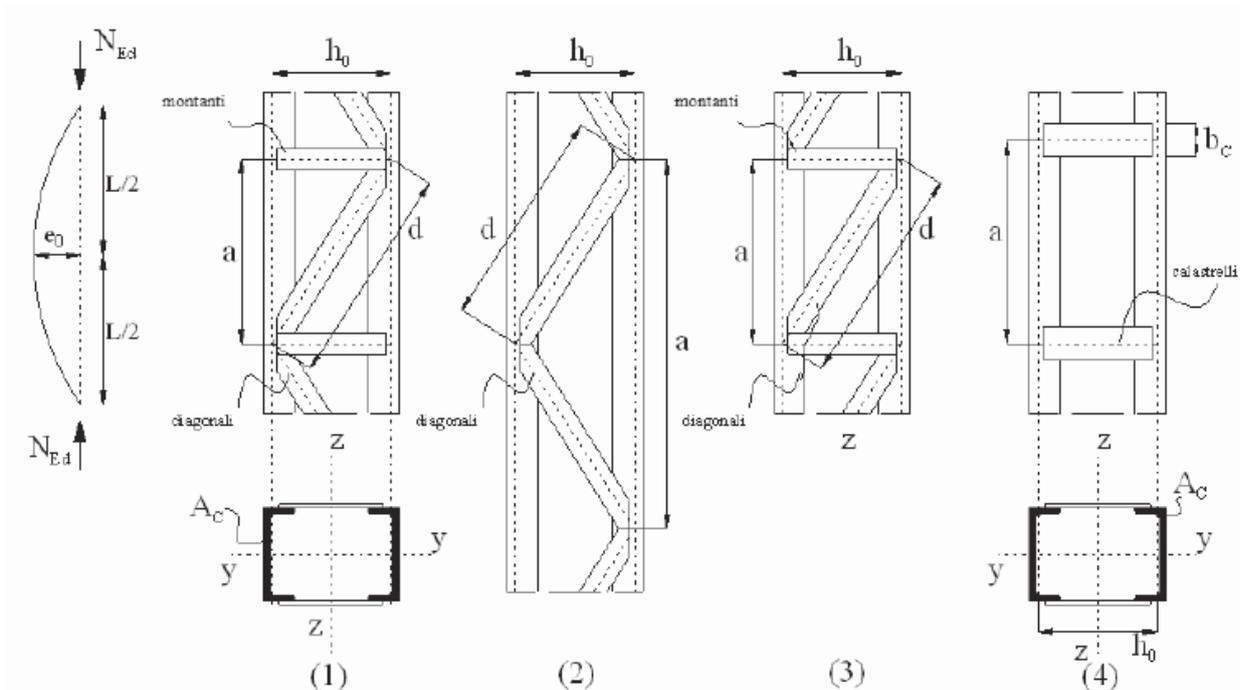


Figura C4.2.7 - Aste composte costituite da due correnti uguali

L'approccio alla verifica di tali elementi, soggetti oltre che alla compressione assiale, anche a flessione nei due piani principali, può essere lo stesso di quello descritto dalle norme per profili con sezione bi-simmetrica dotati di anime nei due piani di flessione purchè i collegamenti tra i profili siano dotati di "sufficiente rigidezza" e simmetria tali da considerare un comportamento omogeneo della sezione sia agli effetti della compressione assiale che della **flessione**

La norma EN 1993-1-1 permette di considerare la sezione soggetta a compressione uniforme come "continuamente omogenea" se sono soddisfatte le seguenti condizioni

- Calastrelli o tralicciatura suddividono i correnti in moduli uguali
- Il numero minimo di moduli è 3

(2) The model of a uniform built-up compression member applies when
1. the lacings or battens consist of equal modules with parallel chords
2. the minimum numbers of modules in a member is three.

NOTE This assumption allows the structure to be regular and smearing the discrete structure to a continuum.

Anche la norma NTC 2008 si pronuncia allo stesso modo:

Aste compresse composte a sezione costante realizzate da due elementi (correnti) collegati tra loro con calastrelli o trallicci possono essere verificate con il metodo qui proposto, a condizione che i campi individuati dai calastrelli o dalle aste di parete del traliccio siano uguali e non meno di tre.

I correnti dell'asta composta possono essere a parete piena (Figura C4.2.7) oppure calastrellati o tralicciati a loro volta. **Nel caso di correnti a pareti piena le tralicciature delle facce opposte devono corrispondersi ed essere sovrapponibili per traslazione, in caso contrario debbono essere considerati anche gli effetti torsionali sui correnti**

Un elemento composto con calastrelli o tralicciatura può essere soggetto ad un **momento flettente nei due piani** per il solo fatto che la compressione assiale può essere applicata eccentricamente se si esegue la **verifica con imperfezioni geometriche equivalenti locali**. Questa possibilità è prevista sia dalla norma europea che nazionale e precisamente:

NTC 2008 – C4.2.3.5

Nell'analisi strutturale le autotensioni, le tensioni residue ed i difetti geometrici, quali errori di verticalità, errori di rettilineità, disallineamenti, eccentricità accidentali dei giunti, possono essere considerati introducendo imperfezioni geometriche equivalenti globali o locali.

Le imperfezioni locali possono essere sostituite con forze distribuite q_h equivalenti, applicate a ciascuna colonna, date da

$$q_h = \frac{8 \cdot e_{0,d} N_{Ed}}{L^2}$$

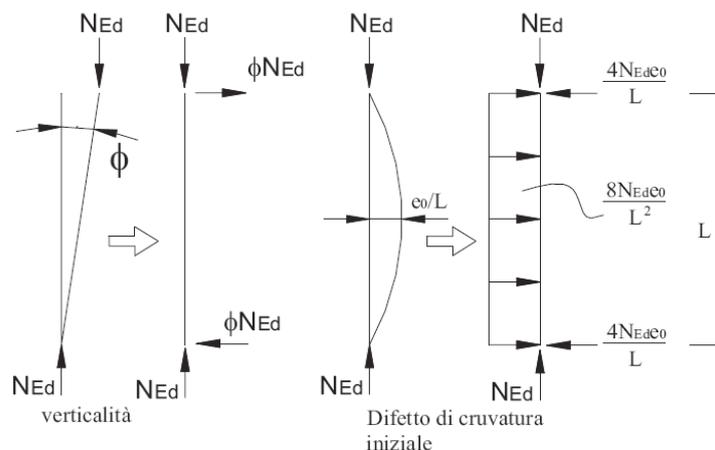


Figura C4.2.4 Sistemi di forze equivalenti alle imperfezioni

da cui il momento flettente massimo $M_{Ed} = 1/8 \cdot q_h \cdot L^2 = N_{Ed} \cdot e_{0,d}$

La norma NTC dice anche:

Le imperfezioni locali **non debbono** essere considerate nelle verifiche di stabilità, poiché le formule di verifica nella presente sezione e adottate al §4.2 delle NTC le considerano **implicitamente**. Se, invece, la verifica della membratura è eseguita mediante un'apposita analisi del secondo ordine, si dovrà considerare un'imperfezione locale dell'asta, che potrà essere assunta uguale a e_0 per l'instabilità a compressione e a $0,5e_0$ per l'instabilità **flessotorsionale**, essendo e_0 dato in Tabella C4.2.I.

Nelle analisi globali di telai **sensibili** (??) agli effetti del secondo ordine, tuttavia, **può essere necessario considerare anche i difetti di rettilineità delle aste compresse che abbiano un vincolo rotazionale ad almeno un estremo** e la cui snellezza adimensionale $\bar{\lambda}$, calcolata considerando l'asta incernierata ad entrambi gli estremi, sia

$$\bar{\lambda} > 0,5 \sqrt{\frac{A f_y}{N_{Ed}}}$$

Simile affermazione compare nella norma EN 1993-1-1:

(6) When performing the global analysis for determining end forces and end moments to be used in member checks according to 6.3 local bow imperfections may be neglected. However for frames **sensitive** to second order effects local bow imperfections of members **additionally** to global sway imperfections (see 5.2.1(3)) should be introduced in the structural analysis of the frame for each compressed member where the following conditions are met:
- **at least one moment resistant joint at one member end**

$$\bar{\lambda} > 0,5 \sqrt{\frac{A f_y}{N_{Ed}}}$$

where N_{Ed} is the design value of the compression force

and $\bar{\lambda}$ is the in-plane non-dimensional slenderness calculated for the member considered as hinged at its ends (6)

nulla vieta quindi una verifica dell'elemento con imperfezione iniziale di freccia in alternativa alla verifica di stabilità eseguita con riferimento al **§4.2 delle NTC** o al **§6.3 delle EN 1993-1-1**

& 5.2.2 (2) The verification of the stability of frames or **their parts** should be carried out considering **imperfections** and second order effects.

La sezione uniformemente compressa può essere quindi verificata a **presso-flessione accettando implicitamente momenti aggiuntivi dovuti ad effetti esterni ovvero trasmessi all'elemento dalle parti strutturali cui è collegato o generati da azioni lungo l'elemento**. Il momento di progetto va riferito alla **mezzaria dell'elemento**.

Il programma “PreflecompEC3” (area SAITU del sito www.stadata.com) che sarà utilizzato nel seguito in un esempio di calcolo è stato da me costruito considerando la sezione continuamente omogenea; la verifica di stabilità locale e globale della corda più compressa è eseguita tenendo conto dell’effetto di compressione aggiuntivo dato dal momento flettente agente nel piano dei collegamenti valutato considerando la deformabilità a taglio di questi ultimi e riferito a metà lunghezza dell’elemento.

Il momento di progetto nel piano dei collegamenti e/o nel piano perpendicolare ai collegamenti, può tener conto o meno della imperfezione di freccia iniziale data da:

$$e_0 = L/500$$

1. The member may be considered as a column with a bow imperfection $e_0 = \frac{L}{500}$

La deformazione elastica dei calastrelli può essere tenuta in conto attribuendo alla colonna una rigidezza a taglio continua (S_v) (& 6.4.1 (1) – EN 1993-1-1)

Le seguenti espressioni definiscono la massima forza di compressione agente su una corda dell’elemento:



$$N_{ch,Ed} = 0,5N_{Ed} + \frac{M_{Ed}h_0A_{ch}}{2I_{eff}}$$

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed}e_0 + M_{Ed}^I}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}}$$

dove

N_{Ed} è la forza normale di progetto dell’asta composta;

h_0 è la distanza tra i baricentri dei correnti;

A_C è l’area della sezione di ciascun corrente;

J_{eff} è il momento di inerzia efficace della sezione dell’elemento composto;

$N_{cr} = \frac{\pi^2 EJ_{eff}}{L^2}$ è il carico critico euleriano dell’asta composta;

M_{Ed}^I è il valore del massimo momento flettente agente in mezzeria dell’asta composta;

S_v è la rigidezza a taglio equivalente della tralicciatura o della calastrellatura.

Per elemento con collegamenti a traliccio:

$$I_{\text{eff}} = 0,5h_0^2 A_{\text{ch}}$$

| | | | |
|---|-----------------------------|----------------------------|---|
| System | | | |
| S _v | $\frac{nEA_d ah_0^2}{2d^3}$ | $\frac{nEA_d ah_0^2}{d^3}$ | $\frac{nEA_d ah_0^2}{d^3 \left[1 + \frac{A_d h_0^3}{A_v d^3} \right]}$ |
| n is the number of planes of lacings A _d and A _v refer to the cross sectional area of the bracings | | | |

Per elemento con collegamenti a calastrelli:

$$I_{\text{eff}} = 0,5h_0^2 A_{\text{ch}} + 2\mu I_{\text{ch}}$$

Table 6.8: Efficiency factor μ

| Criterion | Efficiency factor μ |
|---|--------------------------------|
| $\lambda \geq 150$ | 0 |
| $75 < \lambda < 150$ | $\mu = 2 - \frac{\lambda}{75}$ |
| $\lambda \leq 75$ | 1,0 |
| where $\lambda = \frac{L}{i_0}$; $i_0 = \sqrt{\frac{I_1}{2A_{\text{ch}}}}$; $I_1 = 0,5h_0^2 A_{\text{ch}} + 2I_{\text{ch}}$ | |

$$S_v = \frac{24EI_{\text{ch}}}{a^2 \left[1 + \frac{2I_{\text{ch}} h_0}{nI_b a} \right]} \leq \frac{2\pi^2 EI_{\text{ch}}}{a^2}$$

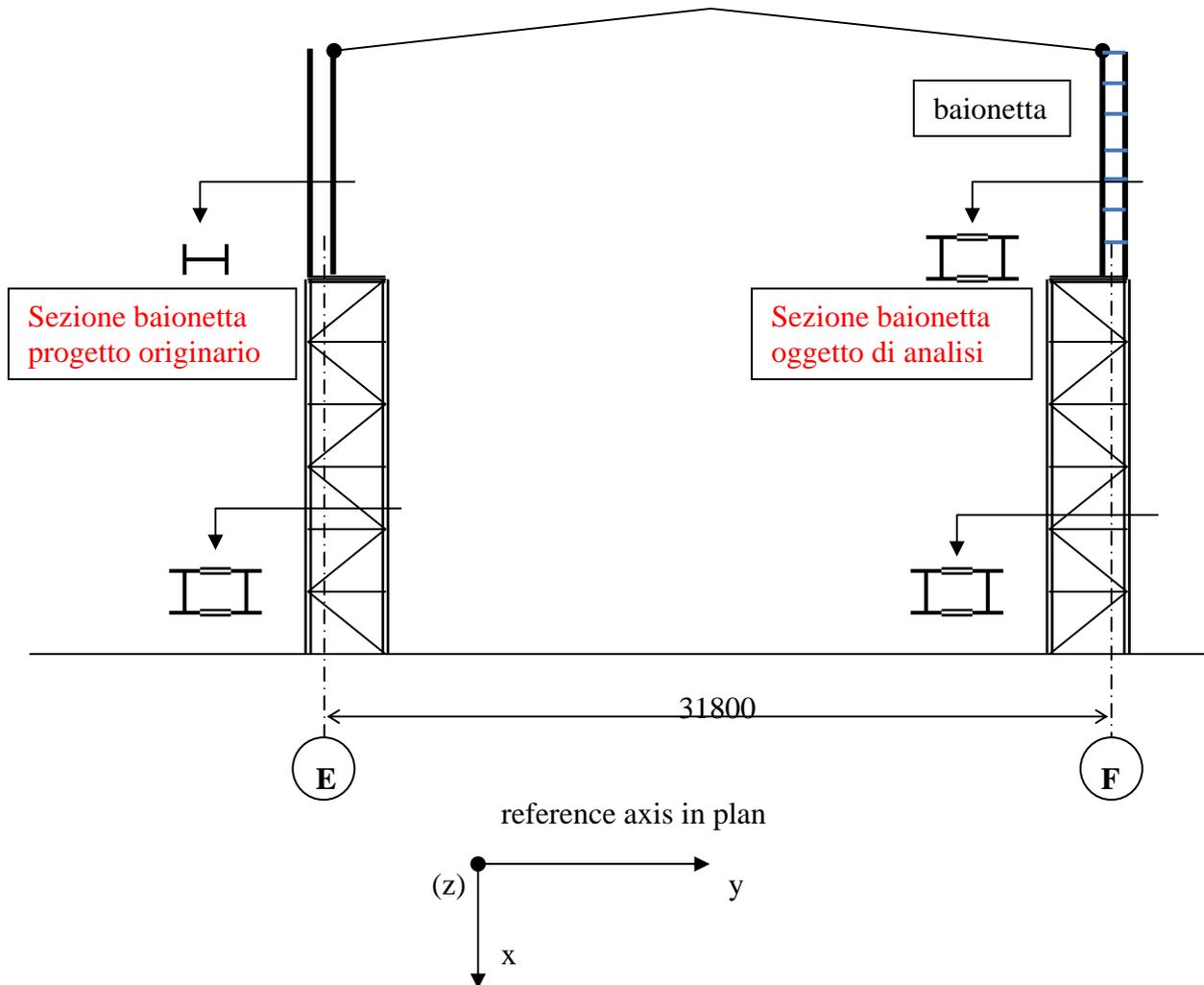
in cui:

I_b = momento di inerzia di un calastrello

n = numero di piani di tralicciatura o calastrellatura (n = 2 nel caso di corde ad anima piena).

L'esempio che segue è un'applicazione del calcolo a pressoflessione di un elemento composto con calastrelli che costituisce la "baionetta" di una colonna di telaio industriale realizzato in Iran.

FRAME TYPE "7" – CONTINUOUS CASTING BUILDING – COL. 1, 4 – 2, 3



| FRAME ON COL. 1 AND 4 | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| COLUMN ROW E | | | | COLUMN ROW F | | | |
| SHAFT | | BAYONET | | SHAFT | | BAYONET | |
| A | J _x | A | J _x | A | J _x | A | J _x |
| cm ² | cm ⁴ | cm ² | cm ⁴ | cm ² | cm ⁴ | cm ² | cm ⁴ |
| 382 | 3005000 | 209 | 279740 | 382 | 3005000 | 209 | 279740 |

| FRAME ON COL. 2 AND 3 | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| COLUMN ROW E | | | | COLUMN ROW F | | | |
| SHAFT | | BAYONET | | SHAFT | | BAYONET | |
| A | J _x | A | J _x | A | J _x | A | J _x |
| cm ² | cm ⁴ | cm ² | cm ⁴ | cm ² | cm ⁴ | cm ² | cm ⁴ |
| 382 | 3005000 | 346 | 448140 | 382 | 3005000 | 346 | 448140 |

Le sollecitazioni sulla baionetta derivano da un calcolo eseguito con l'uso di un programma appositamente da me costruito per il progetto di telai industriali denominato "Bartok"

=====

HOSCO CONTINUOUS CASTING BUILBIND - FRAME 1 DATA:20-12-**

DATI DI CARICO E GEOMETRICI DEL TELAIO

=====

NUMERO DELLE NAVATE = 1

SOVRACCARICO SULLA COPERTURA = 1.00 KN/M2

SOVRACCARICO PASSERELLE VIE DI CORSA = 2.50 KN/M2

PESO TUBAZIONI LUNGO VIE DI CORSA = 8.00 KN/M

VARIAZIONE TERMICA STRUTTURE DEL TETTO= 30.00 GRADI

AZIONE DEL VENTO (NON STANDARD):

CASO 1 - COEFF.FORMA= 1.00 .20 -.20

CASO 2 - COEFF.FORMA= .60 .60 -.60

GLOBALE - COEFF.FORMA= 1.30

ANDAMENTO PRESS.CINETICA LINEARE A TRATTI:

| H(CM) | P.CIN.(KN/M2) |
|--------|---------------|
| 0. | .75 |
| 1000. | .75 |
| 2000. | 1.00 |
| 10000. | 1.35 |

COEFFICIENTE SISMICO BASALE TOTALE = .05

SOVRACCARICO RIDOTTO SULLA COPERTURA = .20 KN/M2

SOVRACCARICO RIDOTTO SULLE PASSERELLE = .00 KN/M2

PESO TUBAZIONI RIDOTTO PER SISMA = 8.00 KN/M

PERCENTUALE AZIONE AGGIUNTIVA TETTO = .00 %

NAVATA TRA I FILI E-F

INTERASSE TRA I FILI = 3280.00 CM

QUOTA BRIGLIA SUP.CAPRIATA - SX = 2000.00 CM

" " " " - DX = 2000.00 CM

QUOTA ROTAE SCORRIMENTO CARRIPONTE = 1080.00 CM

ALTEZZA VIA DI CORSA - SX = 120.00 CM

PESO VIA DI CORSA - SX = 7.00 KN/M

ALTEZZA VIA DI CORSA - DX = 120.00 CM

PESO VIA DI CORSA - DX = 7.00 KN/M

PESO PROPRIO TETTO (STR.+ RIV.) = .70 KN/M2

AREA DELLA BRIGLIA SUP. CAPRIATA = 100.00 CM2

CAPRIATA A DUE FALDE - INCLINAZIONE = 4.00 GRADI

- INERZIA CAPR. =4500000. CM4

AREATORE DI COLMO - PESO PROPRIO = 5.00 KN/M

- ALTEZZA = 350.00 CM

COLONNA FILO E

INTERASSE LONGITUDINALE = 862.50 CM

ALTEZZA COLONNA = 2000.00 CM

COLONNA A DUE RIGIDEZZE:

ALTEZZA FUSTO = 960.00 CM

ALTEZZA BAIONETTA = 1040.00 CM

INTERASSE TRA I MONTANTI = 180.00 CM

DISTANZA MONTANTE SX - FILO = 40.00 CM

DISTANZA MONTANTE DX - FILO = 140.00 CM

DISTANZA BAIONETTA - FILO = .00 CM

PESO PROPRIO PARETE SUL FILO = 4.00 KN/M

ALTEZZA APERTURA PARETE = 680.00 CM
 ALTEZZA TRAVE LONGIT. PORTAVENTO = 1080.00 CM

COLONNA FILO F

 INTERASSE LONGITUDINALE = 862.50 CM
 ALTEZZA COLONNA = 2000.00 CM
 COLONNA A DUE RIGIDENZE:
 ALTEZZA FUSTO = 960.00 CM
 ALTEZZA BAIONETTA = 1040.00 CM
 INTERASSE TRA I MONTANTI = 180.00 CM
 DISTANZA MONTANTE SX - FILO = 140.00 CM
 DISTANZA MONTANTE DX - FILO = 40.00 CM
 DISTANZA BAIONETTA - FILO = .00 CM
 PESO PROPRIO PARETE SUL FILO = 4.00 KN/M
 ALTEZZA APERTURA PARETE = 680.00 CM
 ALTEZZA TRAVE LONGIT. PORTAVENTO = 1080.00 CM

1

=====

HOSCO CONTINUOUS CASTING BUILBIND - FRAME 1 DATA:20-12-**

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEI PROFILI (*)

=====

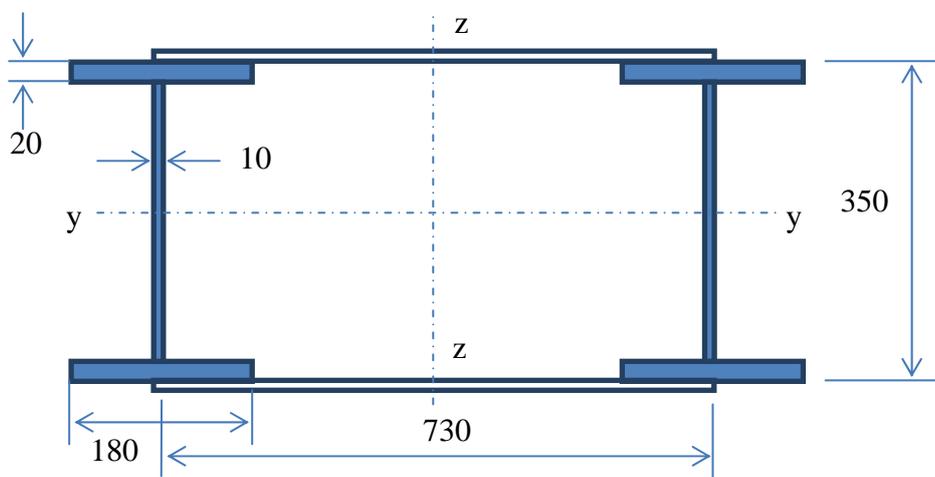
| FILO E: -----MONTANTE SX-----MONTANTE DX----- | BAIONETTA | -----DIAGONALI- |
|---|-----------|-----------------|
| TIPO: IPE600 HE600A HSA830/164 LU120*11 | | |
| H (CM.) 60.0 59.0 | 83.0 | |
| B (CM.) 22.0 30.0 | 35.0 | |
| E (CM.) 1.9 2.5 | 2.2 | |
| A (CM.) 1.2 1.3 | .7 | |
| AREA (CM2) 156.0 226.0 | 209.0 | 50.8 |
| A.TAGL (CM2) 72.4 76.0 | 55.0 | |
| JX (CM4) 92080. 141203. 279740. | | |
| JY (CM4) 3387. 11271. 15723. | | |
| WX (CM3) 3069. 4787. 6741. | | |
| WY (CM3) 308. 751. 898. | | |
| IX (CM) 24.30 25.00 36.60 | | |
| IY-IMIN (CM) 4.66 7.05 8.67 | | 2.35 |
| SIG.AMM. (KN/CM2) 19.00 19.00 19.00 | | 19.00 |

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE GLOBALI:
 FUSTO AREA= 382.0 ATAGL= 50.8 J= 3004958. F-G= 66.49 CM

| FILO F: -----MONTANTE SX-----MONTANTE DX----- | BAIONETTA | -----DIAGONALI- |
|---|-----------|-----------------|
| TIPO: HE600A IPE600 HSA830/164 LU120*11 | | |
| H (CM.) 59.0 60.0 | 83.0 | |
| B (CM.) 30.0 22.0 | 35.0 | |
| E (CM.) 2.5 1.9 | 2.2 | |
| A (CM.) 1.3 1.2 | .7 | |
| AREA (CM2) 226.0 156.0 | 209.0 | 50.8 |
| A.TAGL (CM2) 76.0 72.4 | 55.0 | |
| JX (CM4) 141203. 92080. 279740. | | |
| JY (CM4) 11271. 3387. 15723. | | |
| WX (CM3) 4787. 3069. 6741. | | |
| WY (CM3) 751. 308. 898. | | |
| IX (CM) 25.00 24.30 36.60 | | |
| IY-IMIN (CM) 7.05 4.66 8.67 | | 2.35 |
| SIG.AMM. (KN/CM2) 19.00 19.00 19.00 | | 19.00 |

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE GLOBALI:
 FUSTO AREA= 382.0 ATAGL= 50.8 J= 3004958. F-G= -66.49 CM

(*) la baionetta è stata definita originariamente come profilo HSA830/164 con le dimensioni evidenziate in giallo; nel calcolo che segue è stata prevista una sezione composta calastrellata di uguali caratteristiche geometriche nel piano di flessione:



$$A_{\text{tot}} = 206 \text{ cm}^2$$

$$J_y = 44217 \text{ cm}^4$$

$$J_z = 278337 \text{ cm}^4$$

La lunghezza dell'elemento è **10,4 m**

Il materiale è acciaio **S235** ($f_y = 235 \text{ MPa}$)

Per brevità vengono omissi gli effetti prodotti dalle condizioni di carico elementari:

- COMBINAZIONE DI CARICO N. 2

QUOTA BASE BAIONETTA, MAX.COMPR.LEMBO SX (MAX. MOMENTO NEGATIVO):

| -MOLT- | CONDIZIONE DI CARICO | N | M | T |
|-------------|------------------------------|--------------|----------------|--------------|
| 1.00 | 1-CARICHI PERMANENTI | 171.8 | 1589. | 1.5 |
| 1.00 | 14-CARICHI DI IMPIANTO FISSI | 21.0 | 318. | .3 |
| 1.00 | 2-CARICHI ACCIDENTALI | 141.4 | 2060. | 2.0 |
| 1.00 | 15-EQUIPAGGIAMENTI MOBILI | 65.0 | 983. | .9 |
| 1.00 | 3-VARIAZIONE TERMICA | .0 | -5696. | -5.5 |
| 1.00 | 5-VENTO -X CON DEPR.INT. | -24.8 | -50071. | -58.5 |
| 1.00 | 12-UN CRP IN EF MAX IN F | .0 | -6963. | -6.7 |
| -1.00 | 13-CRP IN EF AZIONE ORIZZ. | .0 | -3996. | -33.3 |
| T O T A L E | | 374.5 | -61777. | -99.3 |

Le sollecitazioni qui riportate si riferiscono ad un calcolo alle **tensioni ammissibili** con coefficienti di combinazione unitari; la combinazione per lo S.L.U. produce i seguenti risultati:

carico assiale massimo:

$$N_{\text{Ed,max}} = 509 \text{ kN}$$

$$M_{z,\text{Ed}} = 63397 \text{ kNcm}$$

$$V_{y,Ed} = -103 \text{ kN}$$

momento flettente massimo (dimensionante):

$$N_{Ed} = 425 \text{ kN}$$

$$M_{z,Ed,max} = \mathbf{87000} \text{ kNcm}$$

$$V_{y,Ed} = -130 \text{ kN}$$

La baionetta può essere considerata, nel piano del telaio, come un'asta incastrata alla base e libera in sommità con una lunghezza libera $L_z = 2 \cdot H = \mathbf{20,8 \text{ m}}$

Nel piano perpendicolare a quello del telaio la baionetta può essere considerata incernierata alle estremità per il vincolo traslazionale imposto dai controventi longitudinali del capannone; la lunghezza libera è quindi $L_y = H = \mathbf{10,4 \text{ m}}$

Usiamo quindi per la verifica dell'elemento il programma “**PreflecompEC3**”

La prima parte del foglio di calcolo riporta le caratteristiche della sezione e le sollecitazioni di progetto per una combinazione non sismica:

METODO DI CALCOLO IN ACCORDO CON EN 1993-1-1; 1-3 (Eurocodice 3)

| | | | | | | |
|-----------|------------|------------|----------------------------------|-------------------|----------------------|----|
| MATERIALE | S 235 N(H) | EN 10025-3 | $f_y = 23,50$ kN/cm ² | $\epsilon = 1,00$ | $\gamma_{M0} = 1,05$ | |
| SEZIONE | SALDATA | ELEMENTO | COLONNA | PROFILO | 2 IWC | |
| | | | | | distanza anime = cm | 73 |

| | | | | | |
|-------------------------------------|--|--------------------|-------------------|------------|-----------|
| SOLLECITAZIONI DI PROGETTO : | | | | resistenza | stabilità |
| combinazione di carichi NON sismica | | Momento principale | $M_{y,Ed} =$ kNcm | 0,001 | 0 |
| | | Taglio principale | $V_{z,Ed} =$ kN | | 0 |
| | | Momento laterale | $M_{z,Ed} =$ kNcm | 87000 | 87000 |
| | | Taglio laterale | $V_{y,Ed} =$ kN | 130 | 130 |
| | | Compressione | $N_{Ed} =$ kN | 425 | 425 |

| | | | | | |
|--------------------------------|--|---|-----------------|--------|--------|
| 2 profili composti saldati | | I 350x180x20x10 | | | |
| ACCOPPIAMENTO CON CALASTRELLI | | CCF | | | |
| Distanza tra i baricentri = cm | | 73,00 | | | |
| | IPF | Altezza totale sezione (h) | cm | 35 | 35 |
| | | Larghezza piattab. sup. (b ₁) | cm | 18 | 18 |
| | | Larghezza piattab. inf. (b ₂) | | | 18 |
| | | Spessore anima (t _w) | cm | 1 | 1 |
| | | Spessore piattab. sup. (t _f) | cm | 2 | 2 |
| | | Spessore piattab. inf. (t _f) | | | 2 |
| | | Raccordo anima-piattab. (r) | cm | 0 | 0 |
| | | Altezza netta anima (d) | cm | | 31 |
| | | Sporgenza ala superiore (c ₁) | cm | | 8,5 |
| | | Sporgenza ala inferiore (c ₂) | cm | | 8,5 |
| | | Area tot. della sezione (A) | cm ² | | 206,00 |
| | | Posiz. asse baricentrico (z _G) | cm | | 17,50 |
| | | Pos. asse neutro plastico (z _n) | cm | | 5,62 |
| | | Pos. a.n.p. per flessione (d ₂) | cm | | 17,50 |
| | | Posiz. centro di taglio (z _C) | cm | | 17,50 |
| | Momento di inerzia princ. (J _y) | cm ⁴ | | 44217 | |
| | Momento di inerzia later. (J _z) | cm ⁴ | | 278337 | |
| | Momento di inerzia tors. (J _t) | cm ⁴ | | 212,67 | |
| | W _{ys} esterno piattab. sup. | cm ³ | | 2527 | |
| | W _{yi} esterno piattab. inf. | cm ³ | | 2527 | |
| | W _{ya} estremità racc. anima | cm ³ | | 2853 | |
| | W _{y,el,min} = MIN (W _{ys} , W _{yi}) | cm ³ | | 2527 | |
| moduli elastici | W _{zs} esterno piattabande | cm ³ | | 6117 | |
| | W _{zc} sez. racc. ala-anima | cm ³ | | 7523 | |
| moduli plastici | W _{pl,y} | cm ³ | | 2856,5 | |
| | W _{pl,z} | cm ³ | | 7519,0 | |

La sezione è di classe 1 considerando il montante isolato uniformemente compresso:

CLASSIFICAZIONE DELLA SEZIONE

Rapporto larghezza / spessore :

| | | | |
|----------------|-----------|-------|----------------------------------|
| anima | $d/t_w =$ | 31,00 | |
| ali sporgenti | $c/t_f =$ | 4,25 | |
| elementi. int. | $b_p/t =$ | 0,00 | per sezione a C piegate a freddo |

Rapp. limite larghezza/spessore anima
 asse neutro elastico = cm 0,000
 coefficiente di adattamento 1,000

| | | | | |
|---------------|-------|-----------|--------------|----------------------------|
| presso-fless. | | compress. | | |
| classe 1 | 33,00 | 33,00 | $\alpha_d =$ | 1 = a_c/d |
| classe 2 | 38,00 | 38,00 | $\psi_d =$ | 1,00 = σ_T/σ_c |
| classe 3 | 42,00 | 42,00 | $\psi_y =$ | 1,00 |
| | | | | classe dell'anima |
| | | | | 1 |

Rapp. limite larghezza/spessore piattab.

| | | | | |
|---------------|-------|---------------|--|---------------------------|
| ali sporgenti | | elem. Interni | | |
| classe 1 | 9,00 | 33,00 | | |
| classe 2 | 10,00 | 38,00 | | |
| classe 3 | 14,00 | 42,00 | | |
| | | | | classe piattabanda |
| | | | | 1 |

CLASSE SEZIONE **1**

La verifica di resistenza della sezione considerata **omogenea** produce il seguente risultato se si usa il criterio dei rapporti esponenziali con i valori conservativi degli esponenti α e β . L'applicazione di questo metodo di verifica è possibile per sezioni che hanno un comportamento plastico (classe ≤ 2):

| VERIFICA DI RESISTENZA | | | | | | |
|--|--|---|---|---|-----------------|--------------------|
| Area di taglio nel piano principale : | $A_{vz} = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + n \cdot r) \cdot t_f > 2 \cdot h_w \cdot t_w$ | $A_{vz} =$ | <table border="1"><tr><td>66,00</td><td>cm²</td></tr></table> | 66,00 | cm ² | |
| 66,00 | cm ² | | | | | |
| Area di taglio nel piano laterale : | $A_{vy} = A - \sum h_w \cdot t_w$ | $A_{vy} =$ | <table border="1"><tr><td>144,00</td><td>cm²</td></tr></table> | 144,00 | cm ² | |
| 144,00 | cm ² | | | | | |
| Resist. plastica di progetto a taglio : | $V_{z.pl.Rd} = A_{vz} \cdot (f_y / 3^{1/2}) / \gamma_{M0}$ | $V_{z.pl.Rd} =$ | <table border="1"><tr><td>853</td><td>kN</td></tr></table> | 853 | kN | |
| 853 | kN | | | | | |
| | $V_{y.pl.Rd} = A_{vy} \cdot (f_y / 3^{1/2}) / \gamma_{M0}$ | $V_{y.pl.Rd} =$ | <table border="1"><tr><td>1861</td><td>kN</td></tr></table> | 1861 | kN | |
| 1861 | kN | | | | | |
| $V_{z.Ed} < 50\% V_{z.pl.Rd}$ | $\rho_z = (2 \cdot V_{z.Ed} / V_{z.pl.Rd} - 1)^2$ | $\rho_z =$ | <table border="1"><tr><td>0,000</td><td></td></tr></table> | 0,000 | | |
| 0,000 | | | | | | |
| $V_{y.Ed} < 50\% V_{y.pl.Rd}$ | $\rho_y = (2 \cdot V_{y.Ed} / V_{y.pl.Rd} - 1)^2$ | $\rho_y =$ | <table border="1"><tr><td>0,000</td><td></td></tr></table> | 0,000 | | |
| 0,000 | | | | | | |
| Verifica di resistenza per sezione di classe <table border="1"><tr><td>1</td></tr></table> | | 1 | $f_d = f_y / \gamma_{M0} =$ | <table border="1"><tr><td>22,38</td><td>kN/cm²</td></tr></table> | 22,38 | kN/cm ² |
| 1 | | | | | | |
| 22,38 | kN/cm ² | | | | | |
| | | $W_{pl,y,fl} =$ | <table border="1"><tr><td>2376</td><td>cm³</td></tr></table> | 2376 | cm ³ | |
| 2376 | cm ³ | | | | | |
| $r_y = (1-n) / (1-0,5 \cdot a) = 1,000$ | $a = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A = 0,301$ | $M_{N,y.Rd} = W_y \cdot f_{d,rid} =$ | <table border="1"><tr><td>63931</td><td>kNcm</td></tr></table> | 63931 | kNcm | |
| 63931 | kNcm | | | | | |
| $r_z = 1 - [(n-a)/(1-a)]^2 = 0,911$ | $n = N_{Ed} / N_{pl.Rd} = 0,092$ | $M_{N,z.Rd} = W_z \cdot f_{d,rid} =$ | <table border="1"><tr><td>168282</td><td>kNcm</td></tr></table> | 168282 | kNcm | |
| 168282 | kNcm | | | | | |
| $N_{1,y.Rd} = 0,25 \cdot N_{pl.Rd} = 1153$ | $N_{2,y.Rd} = 2 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_d / 2 = 694$ | $N_{Ed} \leq N_{V,Rd} (cl \leq 2) =$ | <table border="1"><tr><td>425</td><td>kN</td></tr></table> | 425 | kN | |
| 425 | kN | | | | | |
| $N_{Ed} < \min(N_{1,y.Rd}; N_{2,y.Rd})$ NO forza assiale | | $N_{V,Rd} = A_v \cdot (1-\rho) \cdot f_y$ | <table border="1"><tr><td>1551</td><td>kN</td></tr></table> | 1551 | kN | |
| 1551 | kN | | | | | |
| per classe ≤ 2 | $[M_{y,Ed} / M_{N,y.Rd}]^\alpha + [M_{z,Ed} / M_{N,z.Rd}]^\beta$ | $\alpha =$ | <table border="1"><tr><td>1,000</td></tr></table> | 1,000 | | |
| 1,000 | | | | | | |
| | | $\beta =$ | <table border="1"><tr><td>1,000</td></tr></table> | 1,000 | | |
| 1,000 | | | | | | |
| per classe ≤ 4 | $[N_{Ed} / A + (M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny}) / W_y + (M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Nz}) / W_z] / f_d$ | $R_{M,N} =$ | <table border="1"><tr><td>0,517</td><td>< 1</td></tr></table> | 0,517 | < 1 | |
| 0,517 | < 1 | | | | | |
| per classe ≤ 2 | $[W_{pl,y} - 1 / (4 \cdot n_w \cdot t_w) \cdot (\rho \cdot A_v^2 + N_{Ed}^2 / (1-\rho) / f_y^2)] \cdot f_d < M_{N,y.Rd}$ | | | | | |
| per classe 3 o 4 | $[W_{pl,y,fl} + (1-\rho) \cdot A_v^2 / (6 \cdot n_w \cdot t_w) - N_{Ed}^2 / ((1-\rho) \cdot f_y^2 \cdot 4 \cdot n_w \cdot t_w)] \cdot f_d$ | $M_{NV,y.Rd} =$ | <table border="1"><tr><td>-----</td><td>kNcm</td></tr></table> | ----- | kNcm | |
| ----- | kNcm | | | | | |
| $N_{z.Rd} = 2 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_d = 1388$ | $N_{Ed} < N_{z.Rd}$ | $M_{NV,z.Rd} =$ | <table border="1"><tr><td>-----</td><td>kNcm</td></tr></table> | ----- | kNcm | |
| ----- | kNcm | | | | | |
| se $V_{z,Ed} > 50\% V_{z.pl.Rd}$ | resistenza dell'area di taglio ridotta del fattore $(1-\rho)$ | $R_{M,N,V} =$ | <table border="1"><tr><td>-----</td><td>< 1</td></tr></table> | ----- | < 1 | |
| ----- | < 1 | | | | | |

Se si usa il criterio semplificato della sovrapposizione degli effetti si ha il seguente risultato:

VERIFICA DI RESISTENZA

| | | | | |
|--|--|-----------------|--------|-----------------|
| Area di taglio nel piano principale : | $A_{vz} = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + n \cdot r) \cdot t_f > 2 \cdot h_w \cdot t_w$ | $A_{vz} =$ | 66,00 | cm ² |
| Area di taglio nel piano laterale : | $A_{vy} = A - \sum h_w \cdot t_w$ | $A_{vy} =$ | 144,00 | cm ² |
| Resist. plastica di progetto a taglio : | $V_{z.pl.Rd} = A_{vz} \cdot (f_y / 3^{1/2}) / \gamma_{M0}$ | $V_{z.pl.Rd} =$ | 853 | kN |
| | $V_{y.pl.Rd} = A_{vy} \cdot (f_y / 3^{1/2}) / \gamma_{M0}$ | $V_{y.pl.Rd} =$ | 1861 | kN |
| $V_{z.Ed} < 50\% V_{z.pl.Rd}$ | $\rho_z = (2 \cdot V_{z.Ed} / V_{z.pl.Rd} - 1)^2$ | $\rho_z =$ | 0,000 | |
| $V_{y.Ed} < 50\% V_{y.pl.Rd}$ | $\rho_y = (2 \cdot V_{y.Ed} / V_{y.pl.Rd} - 1)^2$ | $\rho_y =$ | 0,000 | |

| | | | | |
|--|--|---|--------|--------------------|
| Verifica di resistenza per sezione di classe 1 | | $f_d = f_y / \gamma_{M0} =$ | 22,38 | kN/cm ² |
| | | $W_{pl,y,fl} =$ | 2376 | cm ³ |
| $r_y = (1-n) / (1-0,5 \cdot a) = 1,000$ | $a = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A = 0,301$ | $M_{N,y,Rd} = W_y \cdot f_{d,rid} =$ | 63931 | kNcm |
| $r_z = 1 - [(n-a)/(1-a)]^2 = 0,911$ | $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd} = 0,092$ | $M_{N,z,Rd} = W_z \cdot f_{d,rid} =$ | 168282 | kNcm |
| $N_{1,y,Rd} = 0,25 \cdot N_{pl,Rd} = 1153$ | $N_{2,y,Rd} = 2 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_d / 2 = 694$ | $N_{Ed} \leq N_{v,Rd} (cl \leq 2) =$ | 425 | kN |
| $N_{Ed} < \min(N_{1,y,Rd}; N_{2,y,Rd})$ | NO forza assiale | $N_{v,Rd} = A_v \cdot (1-\rho) \cdot f_y =$ | 1551 | kN |
| per classe ≤ 2 | $[M_{y,Ed} / M_{N,y,Rd}]^\alpha + [M_{z,Ed} / M_{N,z,Rd}]^\beta$ | $\alpha =$ | 1,000 | $\beta =$ |
| per classe ≤ 4 | $[N_{Ed} / A + (M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny}) / W_y + (M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Nz}) / W_z] / f_d$ | $R_{M,N} =$ | 0,609 | < 1 |
| per classe ≤ 2 | $[W_{pl,y} - 1 / (4 \cdot n_w \cdot t_w) \cdot (\rho \cdot A_v^2 + N_{Ed}^2 / (1-\rho) / f_y^2)] \cdot f_d < M_{N,y,Rd}$ | | | |
| per classe 3 o 4 | $[W_{pl,y,fl} + (1-\rho) \cdot A_v^2 / (6 \cdot n_w \cdot t_w) - N_{Ed}^2 / ((1-\rho) \cdot f_y^2 \cdot 4 \cdot n_w \cdot t_w)] \cdot f_d$ | $M_{NV,y,Rd} =$ | ----- | kNcm |
| $N_{z,Rd} = 2 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_d = 1388$ | $N_{Ed} < N_{z,Rd}$ | $M_{NV,z,Rd} =$ | ----- | kNcm |
| se $V_{z,Ed} > 50\% V_{pl,Rd}$ | resistenza dell'area di taglio ridotta del fattore $(1-\rho)$ | $R_{M,N,V} =$ | ----- | < 1 |

La verifica di stabilità della sezione considerata **continuamente omogenea**, senza tener conto della deformabilità a taglio dei collegamenti e con riferimento alle lunghezze libere L_z e L_y precedentemente definite, produce il seguente risultato:

RESISTENZA ALL'INSTABILITA'

| | | | | | |
|---|-------------------|-------|----|--|------------------|
| Distanza effettiva tra i vincoli torsionali : | $L =$ | 1040 | cm | \Rightarrow | vincolo parziale |
| Lunghezza libera nel piano principale : | $L_y =$ | 1040 | cm | | |
| Momenti principali di estremità (+;-) | $M_{1y} =$ | 0 | | $M_{2y} =$ | 0 |
| Momenti laterali di estremità (+;-) | $M_{1z} =$ | 87000 | | $M_{2z} =$ | 0 |
| (1) Mom. per carichi trasv. nel piano principale | $ M_{Qy} =$ | ----- | | $\Delta M_y =$ | 0 |
| (1) Mom. per carichi trasv. nel piano laterale | $ M_{Qz} =$ | ----- | | $\Delta M_z =$ | 87000 |
| Diagramma del momento flettente (*) : | $(l,p,t,q)_y =$ | I | | $(l,p,t,q)_z =$ | I |
| Fattore di lunghezza effettiva k (0,5-0,7-1) | k = | 0,7 | | rotazione z-z parziale delle estremità | |
| Fattore di lunghezza effettiva kw (0,5-0,7-1) | kw = | 0,7 | | distorsione parziale delle estremità | |
| Fattore di distribuzione momenti estremi : | $\psi_y =$ | 0,00 | | $\psi_z =$ | 0,00 |
| Max. spostamento dell'elemento : | $ \delta_{xy} =$ | ----- | | $ \delta_{xz} =$ | ----- |
| nota (1) : momento calcolato per trave semplicemente appoggiata | | | | $M_{z,Ed \max} =$ | 87000 |

Il vincolo è considerato “parziale” assumendo rotazione e distorsione bloccate solo ad un estremo. Nella seguente parte del foglio di calcolo viene definito il momento critico di instabilità flessione-torsionale come il minimo dei due valori calcolati nei due piani di flessione (in pratica nel piano dei collegamenti in cui si ha J_z minimo).

| | | | |
|--|--|---|---|
| Coeff. di forma (*) : | C1 = <input type="text" value="2,092"/> | C2 = <input type="text" value="0"/> | C3 = <input type="text" value="1,473"/> |
| | <input type="text" value="2,092"/> | <input type="text" value="0,00"/> | <input type="text" value="1,473"/> |
| (*) Fatt. di mom. unif. equival. nel piano principl. | β_{My} = | <input type="text" value="0,000"/> | diagramma lineare |
| (*) Fatt. di mom. unif. equival. nel piano laterale | β_{Mz} = | <input type="text" value="1,800"/> | diagramma lineare |
| $\beta_w = W_{calc}/W_{pl,y}$ | β_w = | <input type="text" value="1,00"/> | per sez. di classe 1 |
| I_w = costante di distorsione : | I_w = | <input type="text" value="1058508"/> | cm ⁶ per sezione a l |
| z_g = punto di applicazione del carico | baricentro | <input type="text" value="1007703"/> | <input type="text" value="401645,3"/> |
| Momento critico elastico : | M_{cr} = | <input type="text" value="401645"/> | kNcm EN 1993-1-1 |
| Lunghezza libera nel piano laterale : | L_z = | <input type="text" value="2080"/> | cm EC3 |
| Snellezze effettive per presso-flessione : | λ_y = | <input type="text" value="71"/> | λ_z = <input type="text" value="57"/> |
| Snellezze adimensionali corrispondenti : | $\bar{\lambda}_y$ = | <input type="text" value="0,756"/> | $\bar{\lambda}_z$ = <input type="text" value="0,603"/> |
| Snellezza per l'instabilità flesso-torsionale : | λ_{LT} = | <input type="text" value="38"/> | λ_0 = <input type="text" value="35,05833"/> |
| Snellezza adimensionale corrispondente : | $\bar{\lambda}_{LT}$ = | <input type="text" value="0,409"/> | $\bar{\lambda}_{LT,0}$ = <input type="text" value="0,4"/> |
| Rapporto altezza / larghezza sezione : | h/b = | <input type="text" value="1,944444"/> | $\bar{\lambda}_0$ = <input type="text" value="0,373358"/> |
| Coeff. di imperfezione per presso-flessione : | α_y = | <input type="text" value="0,34"/> | α_z = <input type="text" value="0,49"/> |
| $\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2)] + \bar{\lambda}^2$ | ϕ_y = | <input type="text" value="0,880"/> | ϕ_z = <input type="text" value="0,780"/> |
| Coeff. di imperfezione per flesso-torsione : | α_{LT} = | <input type="text" value="0,49"/> | per sezione saldata |
| $\phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0})] + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2$ | ϕ_{LT} = | <input type="text" value="0,565"/> | β = <input type="text" value="0,75"/> |
| Coeff. di riduzione per presso-flessione : | χ_y = | <input type="text" value="0,751"/> | χ_z = <input type="text" value="0,784"/> |
| Coeff. di riduzione per flesso-torsione : | χ_{LT} = | <input type="text" value="0,995"/> | χ_{min} = <input type="text" value="0,751"/> |
| μ_y = <input type="text" value="-2,893"/> | k_y = <input type="text" value="1,338"/> | k_{yy} = <input type="text" value="0,641"/> | k_{yz} = <input type="text" value="0,386"/> |
| μ_z = <input type="text" value="-0,012"/> | k_z = <input type="text" value="1,001"/> | k_{zy} = <input type="text" value="0,980"/> | k_{zz} = <input type="text" value="0,643"/> |
| μ_{LT} = <input type="text" value="-0,150"/> | k_{LT} = <input type="text" value="1,000"/> | VERIFICA SECONDO EN 1993-1-1 - METODO 2 | |
| fattore di correzione per distribuzione del momento tra i vincoli | | | |
| $f = 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot [1 - 2,0 \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2]$ | f = | <input type="text" value="0,914"/> | γ_{M1} = <input type="text" value="1,05"/> |
| $k_c = 0,752$ | $\chi_{LT,mod} = \chi_{LT} / f$ | <input type="text" value="1,000"/> | $f_d = f_y / \gamma_{M1} =$ <input type="text" value="22,38"/> kN/cm ² |

VERIFICA DI STABILITA' PER PRESSO-FLESSIONE

ENV 1993 $[N_{Ed}/(\chi_{min} \cdot A) + k_y \cdot (M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny})/W_y + k_z \cdot (M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Nz})/W_z] / f_d =$

EN 1993-1-1 $[N_{Ed}/(\chi_y \cdot A) + k_{yy} \cdot (M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny})/(\chi_{LT} \cdot W_y) + k_{yz} \cdot (M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Nz})/W_z] / f_d =$ < 1

VERIFICA DI STABILITA' PER FLESSO-TORSIONE

ENV 1993 $[N_{Ed}/(\chi_z \cdot A) + k_{LT} \cdot (M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny})/(\chi_{LT} \cdot W_y) + k_z \cdot (M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Nz})/W_z] / f_d =$

EN 1993-1-1 $[N_{Ed}/(\chi_z \cdot A) + k_{zy} \cdot (M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny})/(\chi_{LT} \cdot W_y) + k_{zz} \cdot (M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Nz})/W_z] / f_d =$ < 1

Il modesto rapporto tensionale evidenzia una alta stabilità alla presso-flessione e alla flesso-torsione dell'elemento con sezione omogenea e "compatta" (non viene tenuta in conto la rigidità a taglio equivalente dei collegamenti).

Eseguiamo la verifica di stabilità delle **singole corde** (montanti) nei due piani principali considerando un passo dei calastrelli di **1 m** ed una imperfezione iniziale. Il seguente foglio di calcolo illustra la verifica.

VERIFICA DELLE COMPONENTI DELLA SEZIONE TRALICCIATA O CALASTRELLATA

PROFILO **2 IWC** **I 350x180x20x10**

$N_{Ed1} =$ **821,94** kN

$L = m$ **10,40**

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

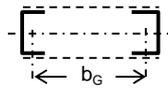
- VERIFICA DI STABILITA' NEL PIANO PRINCIPALE DEL CORRENTE COMPRESSO

$N_{b,Rd1} = \chi \cdot \beta_A \cdot A_1 \cdot f_y / \gamma_{M1} =$ **1890** kN

materiale collegamenti $f_{yc} = \text{kN/cm}^2$ **23,50**

GEOMETRIA DELLA SEZIONE

| | | |
|----------------------------------|--------------|-----------------|
| b = | 18,00 | cm |
| h = | 35,00 | cm |
| t _w = | 1,00 | cm |
| t _f = | 2,00 | cm |
| h/b = | 1,94 | |
| d/t _w = | 31,00 | |
| c/t _f = | 4,25 | |
| b _G = | 73,00 | cm |
| ho = distan. anime profili = | 73 | cm |
| a = lungh. libera corda = | 100 | cm |
| J _{z1} = J min. 1 prof. | 1947 | cm ⁴ |
| i _{z1} = r min. 1 prof. | 4,35 | cm |



COLONNA

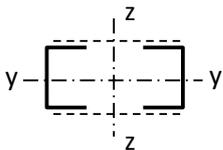
| | | | |
|-----------------------|---------------|-----------------------|--|
| classe | 1 | $f_u = \text{N/mm}^2$ | 360 |
| $f_y =$ | 23,50 | kN/cm ² | $f_{ya} = \text{kN/cm}^2$ 23,50 |
| $\beta_A =$ | 1 | per classe | 1 |
| $A_1 =$ | 103,00 | cm ² | $A_{eff1} = \text{cm}^2$ 103,00 |
| $i_y =$ | 14,65 | cm | $n =$ 2 |
| $\lambda_y =$ | 71 | per loy = cm | 1040 |
| $\varepsilon =$ | 1 | per acciaio S 235 | |
| $\lambda =$ | 0,7559723 | | |
| $\alpha_y =$ | 0,21 | curva 'a' | |
| $\phi =$ | 0,8441242 | | |
| $\chi =$ | 0,8198789 | | |
| $N_{Ed1}/N_{b,Rd1} =$ | 0,435 | < 1 | |
| $N_{Ed1}/N_{c,Rd1} =$ | 0,357 | | |

analisi con imperfezione di freccia
collegamento corde con calastrelli

- VERIFICA DI STABILITA' GLOBALE E LOCALE DEL CORRENTE PRESSO-FLESSO

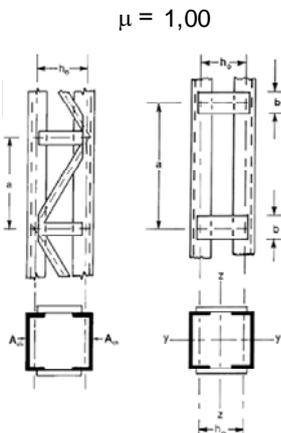
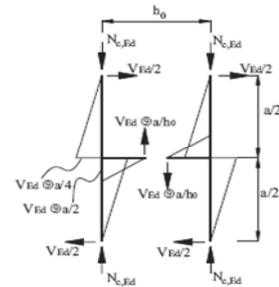
| | | | | | | |
|-----------------|-------------|-----------------|------------------------------------|--------------|---------------|------|
| $e_0 = L/500 =$ | 2,08 | cm | forza di taglio nell'asta composta | $V_{Ed} =$ | 136,30 | kN |
| $A_{d(b)} =$ | 46 | cm ² | momento flettente nel calastrello | $M_{b1} =$ | 3407,43 | kNcm |
| $h_b =$ | 20 | cm | taglio | $V_{Ed1} =$ | 68,15 | kN |
| $J_{d,min} =$ | | cm ⁴ | res.a taglio | $V_{Rd1} =$ | 594,40 | kN |
| | | | | $M_{b,Rd} =$ | 3431,75 | kNcm |

$M_{Ed,y1} =$ **1710** kNcm $M^l_{Ed,y} =$ **0** kNcm
 $M_{Ed,z1} =$ **45120** kNcm $M^l_{Ed,z} =$ **43500** kNcm



$M_{b,Rd} = W_{Rd,y} / K \cdot f_y / \gamma_{M1} =$ 31966 kNcm

$N_{ch,Ed} = N_{Ed1} + M_{Ed,z1} \cdot b_G \cdot A_1 / (2 \cdot J_{eff})$



| asse (z-z) | | asse (y-y) | | |
|-------------------------|--------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|
| $J_{eff} = \text{cm}^4$ | 278337 | Wpl | 1428 | cm ³ |
| $I_1 = \text{cm}^4$ | 278337 | $i_y =$ | 14,65 | cm |
| $\lambda_{z1} =$ | 23 | $\lambda_y =$ | 71 | per loy = cm 1040 |
| $\lambda =$ | 0,24497204 | $\lambda =$ | 0,7559723 | loz = cm 1040 |
| $\phi =$ | 0,5376509 | $\phi =$ | 0,8441242 | $\lambda_z =$ 28 |
| $\chi =$ | 0,98400975 | $\chi =$ | 0,8198789 | $\alpha_{z1} =$ 0,34 |
| $N_{cr} = \text{kN}$ | 53336 | $\psi =$ | 0,00 | 1 < y < -1 |
| $S_V = \text{kN}$ | 50919 | $\beta_M =$ | 1,8 | |
| $N_{ch,Ed} = \text{kN}$ | 822 | $\mu =$ | -0,302389 | <= 0,9 |
| $N_{b1} = \text{kN}$ | 2268 | $K =$ | 1 | <= 1,5 |
| $N_{ch,Ed} / N_{b1} =$ | 0,362 | $M_{Ed,y1} / M_{b,Rd} =$ | 0,053 | < 1 |

$N_{ch,Ed} / N_{b1} + M_{Ed,y1} / M_{b,Rd} =$ **0,416** **< 1**

Nel calcolo notiamo i seguenti risultati:

1 – la verifica di stabilità nel piano z-z del montante più compresso della sezione composta, supposto isolato dal contesto ed eseguita in base al metodo dei coefficienti di instabilità di cui al punto **6.3 della norma EN 1993-1-1**, evidenzia un rapporto tensionale pari a **0,435** < 1

2 – la verifica di stabilità locale del montante nel piano y-y riferita ad un interasse dei calastrelli di **1 m** con sezione degli stessi pari a **46 cm²** e altezza **20 cm** (spessore **23 mm**), produce il seguente rapporto tensionale **0,362** che tiene conto della rigidezza a taglio equivalente dei calastrelli.

3 - la verifica di stabilità globale dello stesso montante in presso-flessione eseguita tenendo conto anche dell'imperfezione iniziale di freccia nei due piani ($e = L/500$) evidenzia un rapporto tensionale pari a **0,416** < 1 prossimo a quello calcolato per la sezione omogenea e “compatta” (0,450) con riferimento ad una lunghezza libera pari al doppio di quella effettiva (comportamento a mensola).

4 – la verifica a taglio e flessione dei calastrelli è eseguita in base alla seguente espressione (& 6.1.4 (7) – EN 1993-1-1)

$$V_{Ed} = \pi \cdot M_{Ed,z} / L$$

Per calastrelli costituiti da piatti di dimensioni **200x23**, essendo $V_{Ed} < 50\% V_{pl,Rd}$, non è richiesta l'interazione momento-taglio ed il momento resistente plastico di progetto ($M_{b,Rd} = \mathbf{3431,75}$ kNcm) risulta maggiore del momento generato dal taglio ad una estremità del calastrello ($M_{Ed} = \mathbf{3407,43}$ kNcm)

Eseguiamo passo passo la verifica del montante compresso in base al dettato della norma:

$$N_{ch,Ed} = 0,5N_{Ed} + \frac{M_{Ed}h_0A_{ch}}{2I_{eff}}$$

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed}e_0 + M_{Ed}^I}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}}$$

$M'_{Ed} = 87000/2 = 43500$ kNcm (**momento flettente in mezzaria dell'elemento**)

$I_{eff} = 0,5 \cdot h_0^2 \cdot A_{ch} + 2 \cdot \mu \cdot I_{ch} = 0,5 \cdot 73^2 \cdot 103 + 2 \cdot 1 \cdot 1947 = 278337$ cm⁴

$\mu =$ (tab. 6.8 EN 1993-1-1); per $\lambda \leq 75$ $\mu = 1$ ($\lambda = \lambda_{z1} = 23 < 75$)

$N_{cr} = \pi^2 \cdot E \cdot I_{eff} / L^2 = \pi^2 \cdot 21000 \cdot 278337 / 1040^2 = 53336$ kN

$e_0 = L/500 = 2,08$ cm

$$S_v = \frac{24EI_{ch}}{a^2 \left[1 + \frac{2I_{ch}}{nI_b} \frac{h_0}{a} \right]} \leq \frac{2\pi^2 EI_{ch}}{a^2}$$

$n = 2$ (n° di piani calastrellati)

$$I_b = A_b \cdot h_b^2 / 12 = 46 \cdot 20^2 / 12 = 1533,33 \text{ cm}^4$$

$$S_v = 24 \cdot 21000 \cdot 1947 / [100^2 \cdot (1 + 2 \cdot 1947 \cdot 73 / (2 \cdot 1533,33 \cdot 100))] = 50919 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = (425 \cdot 2,08 + 43500) / (1 - 425 / 53336 - 425 / 50919) = 45955 \text{ kNcm}$$

$$N_{ch,Ed} = 0,5 \cdot 425 + 45955 \cdot 73 \cdot 103 / (2 \cdot 278337) = \mathbf{822} \text{ kN}$$

$$N_{b1} = \chi \cdot \beta_A \cdot A_1 \cdot f_y / \gamma_{M1} = 0,984 \cdot 1 \cdot 103 \cdot 23,5 / 1,05 = 2268 \text{ kN}$$

$$N_{ch,Ed} / N_{b1} = \mathbf{0,362}$$

L'effetto del momento nel piano z-z riferito alla mezzaria dell'elemento produce il seguente rapporto tensionale tipico per sezioni ad anima piena come il singolo montante della sezione composta:

$$M_{Ed,y,1} / M_{b,Rd} = 0,053 \text{ kNcm dovuto alla imperfezione di freccia nel piano z-z}$$

La somma dei due valori ($\mathbf{0,416} < 1$) produce la tensione di stabilità del singolo montante considerando la deformabilità a taglio dei calastrelli:

Si noti che N_{cr} fa riferimento ad una lunghezza libera L nel piano y-y paria alla lunghezza effettiva dell'elemento ($\mathbf{10,4} \text{ m}$) pur avendo considerato l'elemento come una mensola non vincolata ad una estremità con lunghezza libera doppia in accordo con il dettato normativo che considera la teoria dell'asta uniformemente compressa valida per elemento vincolato alle estremità agli effetti della traslazione (elemento incernierato alle estremità).

Anche raddoppiando la lunghezza libera il risultato cambia di poco come di seguito riportato:

$\mu = 1,00$

| asse (z-z) | | asse (y-y) | | |
|-------------------------|--------|--------------------------|-----------|--------------------------|
| $J_{eff} = \text{cm}^4$ | 278337 | Wpl | 1428 | cm^3 |
| $I_1 = \text{cm}^4$ | 278337 | $i_y =$ | 14,65 | cm |
| $\lambda_{z1} =$ | 23 | $\lambda_y =$ | 71 | per $l_{oy} = \text{cm}$ |
| $\lambda = 0,24497204$ | | $\lambda = 0,7559723$ | | $l_{oz} = \text{cm}$ |
| $\phi = 0,5376509$ | | $\phi = 0,8441242$ | | $\lambda_z =$ |
| $\chi = 0,98400975$ | | $\chi = 0,8198789$ | ≤ 1 | $\alpha_{z1} =$ |
| $N_{cr} = \text{kN}$ | 13334 | $\psi =$ | 0,00 | $1 < y < -1$ |
| $S_v = \text{kN}$ | 50919 | $\beta_M =$ | 1,8 | |
| $N_{ch,Ed} = \text{kN}$ | 837 | $\mu =$ | -0,302389 | $\leq 0,9$ |
| $N_{b1} = \text{kN}$ | 2268 | $K =$ | 1 | $\leq 1,5$ |
| $N_{ch,Ed} / N_{b1} =$ | 0,369 | $M_{Ed,y1} / M_{b,Rd} =$ | 0,054 | < 1 |

$d_g = \text{cm}$

per $l_{oy} = \text{cm}$ $\mathbf{1040}$

$l_{oz} = \text{cm}$ $\mathbf{2080}$

$\lambda_z =$ $\mathbf{57}$

$\alpha_{z1} =$ $\mathbf{0,34}$

curva 'b'

$$N_{ch,Ed} / N_{b1} + M_{Ed,y1} / M_{b,Rd} = \mathbf{0,424} < 1$$

La verifica eseguita col metodo delle tensioni ammissibili (all'epoca del progetto applicabile anche in Iran) dava i seguenti risultati per la combinazione tipo 2 e per una sezione omogenea HSA 830/164:

- VERIFICA DI RESISTENZA:
 $SIGMA = 374.5 / 209.0 + 61777. / (6741. * 1.031)$ SR = **10.68** <-----
 - VERIFICA A PRESSOFLESSIONE:
 MOM.RIF. (M1= -61777. M2= -49873.) = .75 * 61777. MP = 46333. KN*CM
 $SN = 2.79 * 374.5 / 209.0$ SN = 5.00 KN/CM2
 $SM = 46333. / (1 - 1.3 * 374. / 62.9 * 209.0) * 6947.$ SM = 6.93 KN/CM2
 $SN + SM = 5.00 + 6.93$ SP = **11.93** <-----
 - VERIFICA A SVERGOLAMENTO ALA:
 MOM.RIF. = .50 * 61777. MA = 30889. KN*CM
 $S' = 2.27 * (30889. * 3111. / 279740.) / 77.0$ S' = 10.13 KN/CM2
 $S1 = 10.13 / (1 - 1.3 * 374. / 62.9 * 209.0)$ S1 = 10.53 KN/CM2
 $SN + S1 = 5.00 + 10.53$ SA = **15.52** <-----
 SIGMA AMMISSIBILE = 1.125 * 19.00 > S.EFF AM = **21.38** KN/CM2

Ovvero i seguenti rapporti tensionali:

Verifica di resistenza : $10,68 / 21,38 = 0,5$

Verifica a pressoflessione: $11,93 / 21,38 = 0,558$

Verifica a svergolamento dell'ala: $15,52 / 21,38 = 0,726$ (isolata dall'anima)

Confrontabili con quelli ottenuti per la sezione composta equivalente calcolata allo S.L.U.

| | CNR-UNI 1011 | EN 1993-1-1 |
|---------------|--------------|-------------|
| resistenza | 0,5 | 0,517 |
| stabilità z-z | 0,558 | 0,435 |
| stabilità y-y | 0,726 | 0,416 |

La verifica di stabilità nel piano y-y non è confrontabile poiché la sezione di progetto originario era una sezione a I con piattabanda compressa isolata mentre nella sezione composta calastrellata qui analizzata la "piattabanda compressa" è costituita da un profilo a I molto più stabile.

Tensioni relativamente basse sono la conseguenza della limitazione di freccia alla sommità del telaio ($f_{lim} = H/300$ con $H = 20$ m; $f_{lim} = 6,67$ cm) che richiede adeguata rigidezza delle colonne in special modo per la baionetta più deformabile del fusto.

DEFORMAZIONI : -----FRECCIA-----TV-----MARGINE-----ESITO-----

| | | | | |
|----------------------------|------|----|-----|----|
| E (SOMMITA' COLONNA, CM.) | 6.1 | VP | .08 | OK |
| F (SOMMITA' COLONNA, CM.) | -6.1 | VN | .08 | OK |
| EF (VARIAS. SCARTAM., MM.) | -3 | 1C | .79 | OK |

Nel caso in cui l'elemento baionetta fosse **traliccato** anziché calastrellato, con piatti di sezione **120 x 20** (area 24 cm²; momento di inerzia minimo 8 cm⁴) e con distanza tra i nodi della tralicciatura di **146** cm (45°), la verifica di stabilità produrrebbe il seguente risultato non distante da quello della sezione calastrellata.

VERIFICA DELLE COMPONENTI DELLA SEZIONE TRALICCIATA O CALASTRELLATA

PROFILO **2 IWC** **I 350x180x20x10**

$N_{Ed1} =$ **826,19** kN

$L = m$ **10,40**

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

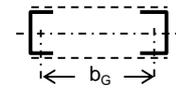
- VERIFICA DI STABILITA' NEL PIANO PRINCIPALE DEL CORRENTE COMPRESSO

$N_{b,Rd1} = \chi \cdot \beta_A \cdot A_1 \cdot f_y / \gamma_{M1} =$ **1890** kN

materiale collegamenti $f_{yc} = \text{kN/cm}^2$ **23,50**

GEOMETRIA DELLA SEZIONE

| | | |
|-----------------------------------|--------------|-----------------|
| b = | 18,00 | cm |
| h = | 35,00 | cm |
| $t_w =$ | 1,00 | cm |
| $t_f =$ | 2,00 | cm |
| h/b = | 1,94 | |
| d/ $t_w =$ | 31,00 | |
| c/ $t_f =$ | 4,25 | |
| $b_G =$ | 73,00 | cm |
| ho = distan. anime profili = | 73 | cm |
| a = lungh. libera corda = | 146 | cm |
| $J_{z1} = J \text{ min. 1 prof.}$ | 1947 | cm ⁴ |
| $i_{z1} = r \text{ min. 1 prof.}$ | 4,35 | cm |



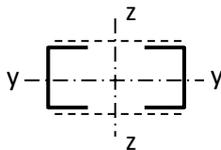
COLONNA

| | | | |
|-----------------------|---------------|-------------------------------------|--|
| classe | 1 | $f_u = \text{N/mm}^2$ | 360 |
| $f_y =$ | 23,50 | kN/cm ² | $f_{ya} = \text{kN/cm}^2$ 23,50 |
| $\beta_A =$ | 1 | per classe | 1 |
| $A_1 =$ | 103,00 | cm ² | $A_{eff1} = \text{cm}^2$ 103,00 |
| $i_y =$ | 14,65 | cm | n = 2 |
| $\lambda_y =$ | 71 | per loy = cm | 1040 |
| $\epsilon =$ | 1 | per acciaio S 235 | |
| $\bar{\lambda} =$ | 0,7559723 | | |
| $\alpha_y =$ | 0,21 | curva 'a' | |
| $\phi =$ | 0,8441242 | | |
| $\chi =$ | 0,8198789 | | |
| $N_{Ed1}/N_{b,Rd1} =$ | 0,437 | < 1 | |
| $N_{Ed1}/N_{c,Rd1} =$ | 0,358 | analisi con imperfezione di freccia | |
| | | collegamento corde con diagonali | |

- VERIFICA DI STABILITA' GLOBALE E LOCALE DEL CORRENTE PRESSO-FLESSO

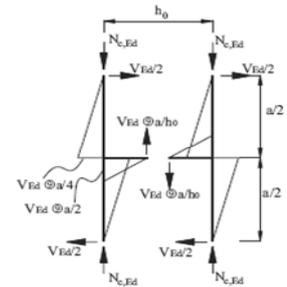
| | | | | |
|-----------------|-------------|-----------------|------------------------------------|-----------------------------|
| $e_0 = L/500 =$ | 2,08 | cm | forza di taglio nell'asta composta | $V_{Ed} =$ 135,33 kN |
| $A_{d(b)} =$ | 24 | cm ² | forza assiale nel diagonale | $N_{d1} =$ 95,69 kNcm |
| $h_b =$ | | cm | taglio | $V_{Ed1} = \text{kN}$ 67,66 |
| $J_{d,min} =$ | 8 | cm ⁴ | | $N_{b,Rd} =$ 114,58 kN |

$M_{Ed,y1} =$ **1718** kNcm $M'_{Ed,y} =$ **0** kNcm
 $M_{Ed,z1} =$ **44799** kNcm $M'_{Ed,z} =$ **43500** kNcm

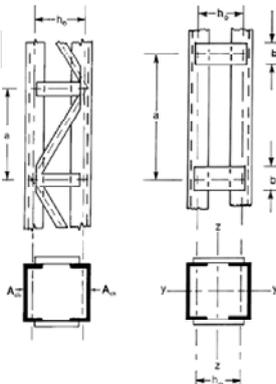


$M_{b,Rd} = W_{Rd,y} / K \cdot f_y / \gamma_{M1} =$ 31966 kNcm

$N_{ch,Ed} = N_{Ed1} + M_{Ed,z1} \cdot b_G \cdot A_1 / (2 \cdot J_{eff})$



$\mu = 1,00$



| asse (z-z) | | asse (y-y) | | |
|-------------------------|--------------|--------------------------|-------------|--------------------------|
| $J_{eff} = \text{cm}^4$ | 274444 | Wpl | 1428 | cm ³ |
| $I_1 = \text{cm}^4$ | 278337 | $i_y =$ | 14,65 | cm |
| $\lambda_{z1} =$ | 34 | $\lambda_y =$ | 71 | per loy = cm 1040 |
| $\lambda =$ | 0,35765918 | $\lambda =$ | 0,7559723 | loz = cm 1040 |
| $\phi =$ | 0,5907621 | $\phi =$ | 0,8441242 | $\lambda_z =$ 28 |
| $\chi =$ | 0,94254854 | $\chi =$ | 0,8198789 | $\alpha_{z1} =$ 0,34 |
| $N_{cr} = \text{kN}$ | 52590 | $\psi =$ | 0,00 | 1 < y < -1 |
| $S_V = \text{kN}$ | 356382 | $\beta_M =$ | 1,8 | |
| $N_{ch,Ed} = \text{kN}$ | 826 | $\mu =$ | -0,302389 | <= 0,9 |
| $N_{b1} = \text{kN}$ | 2173 | K = | 1 | <= 1,5 |
| $N_{ch,Ed} / N_{b1} =$ | 0,380 | $M_{Ed,y1} / M_{b,Rd} =$ | 0,054 | < 1 |

$N_{ch,Ed} / N_{b1} + M_{Ed,y1} / M_{b,Rd} =$ **0,434** < 1



La verifica dei diagonali è eseguita a compressione scomponendo la forza di taglio e tenendo conto dell'instabilità nel piano normale alla faccia tralicciata. La forza assiale di progetto nel diagonale (**95,69 kN**) risulta inferiore alla resistenza per instabilità a compressione (**114,58 kN**) per una snellezza $\lambda = 179 < 200$

Conclusioni:

una sezione composta tralicciata o calastrellata può essere esaminata non solo per uno stato di compressione uniforme (previsto dalle norme) ma anche in presso-flessione bi-assiale vista la possibilità di **calcolo con imperfezione iniziale di freccia** che individua **da solo** uno stato di presso-flessione e implicitamente “accetta” l'effetto di un momento esterno aggiuntivo **riferito a metà lunghezza dell'elemento**.

La sezione può essere considerata “continuamente omogenea” se nelle due facce i collegamenti sono simmetricamente disposti (sovrapponibili) e suddividono in almeno 3 campi la lunghezza dell'elemento.

Ai fini della verifica di stabilità, l'effetto della flessione nel piano principale, parallelo a quello dei collegamenti, va valutato tenendo conto della deformabilità dei collegamenti attraverso la resistenza da questi offerta al taglio (S_v).

La verifica di stabilità eseguita come per una sezione ad anima piena bi-simmetrica in **presso-flessione bi-assiale** produce un rapporto tensionale molto vicino a quello calcolato per la sezione composta calastrellata o tralicciata a dimostrazione del fatto che il collegamento con calastrelli o traliccio può generare una sezione “continuamente omogenea” equivalente quando si tiene conto della loro rigidezza.

Entrambe le verifiche sono quindi applicabili con l'avvertenza di usare (nella verifica eseguita come per sezione ad anima piena) il momento critico minimo tra quelli calcolati nei due piani di flessione (come eseguito in modo automatico dal programma PreflecompEC3)

D. Leone