DATI

$$L_1 = 1.5 \text{ m}$$

$$L_2 = 3.8 \text{ m}$$

$$L_3 = 2.0 \text{ m}$$

$$H = 2.5 \text{ m}$$

CARICHI

$$G_{k1} = 12 \text{ kN/m}$$

$$G_{k2} = 14 \text{ kN/m}$$

$$Q_k = 8 \text{ kN/m}$$

(Destinazione d'uso residenziale)

VINCOLI: traslazione dei nodi fuori dal piano impediti

RISOLUZIONE

- 1) STATICA: Risolvere lo schema statico e disegnare i diagrammi delle sollecitazioni indicando i valori estremi.
- 2) QUESITI: Assumendo acciaio S235 e la sezione di classe 1 (non è richiesta classificazione)
  - 2.1) dimensionare e verificare l'asta AD utilizzando un profilato IPE
  - 2.2) dimensionare e verificare l'asta CE utilizzando un profilato HEA
  - 2.3) progettare l'unione bullonata in C utilizzando bulloni M16 classe 5.6 e copripivotta d'anima di spessore 4mm.

1) STATICA

REAZIONI VINCOLARI

- struttura piana isostatica CE (asta)  
rappresenta un pendolo

Eq. trasl. orizzontale :  $X_A = 0$  e  $X_E = 0$

Eq. rotazione (Polo in B, tratto BD)

$$Y_E \cdot L_2 - \frac{P(L_2 + L_3)^2}{2} = 0 \rightarrow Y_E = \frac{P(L_2 + L_3)^2}{2L_2}$$

Eq. trasl. verticale :  $Y_A + Y_E - P(L_2 + L_3) = 0$

$$Y_A = \frac{P(L_2^2 - L_3^2)}{2L_2}$$

Eq. rotazione (Polo in B, tratto AB)

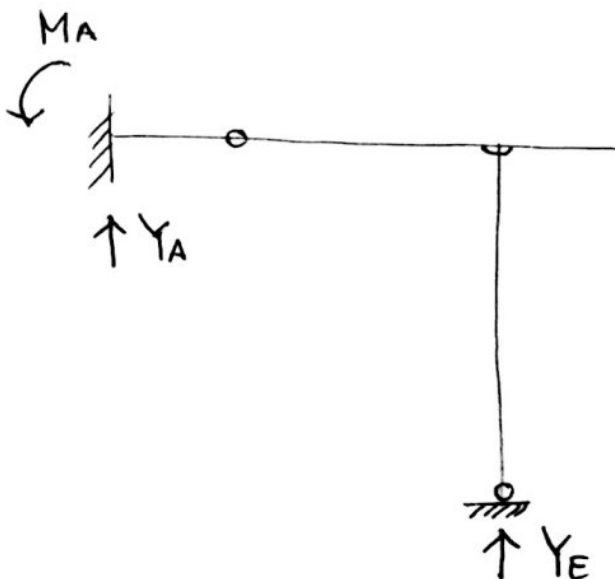
$$M_A - Y_A \cdot L_1 = 0 \rightarrow M_A = \frac{P(L_2^2 - L_3^2)}{2L_2} \cdot L_1$$

Il carico allo SLU risulta:

$$P = P_{SLU} = \gamma_{G1} \cdot G_{k1} + \gamma_{G2} \cdot G_{k2} + \gamma_{Q1} \cdot Q_k$$

$$= 1.3 \cdot 12 + 1.5 \cdot 14 + 1.5 \cdot 8 = 48.5 \text{ kN/m}$$

REAZIONI VINCOLARI



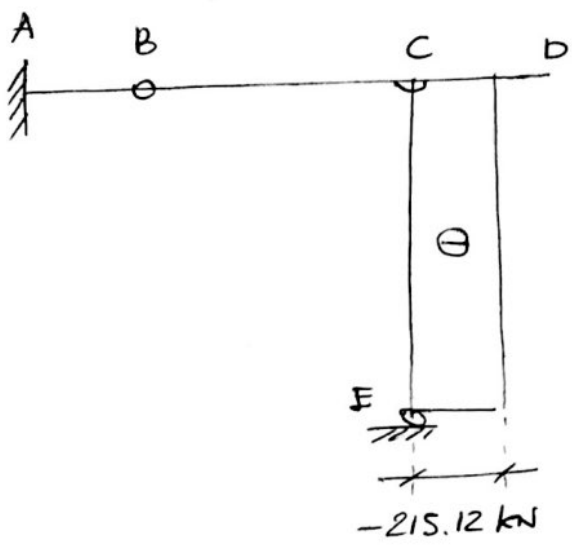
$$M_A = 100,14 \text{ kNm}$$

$$Y_A = 66,76 \text{ kN}$$

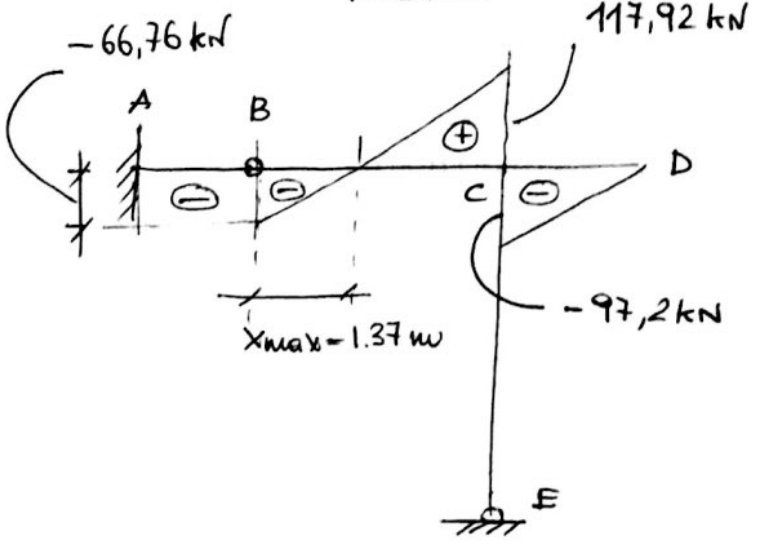
$$Y_E = 215,12 \text{ kN}$$

SOLLECITAZIONI

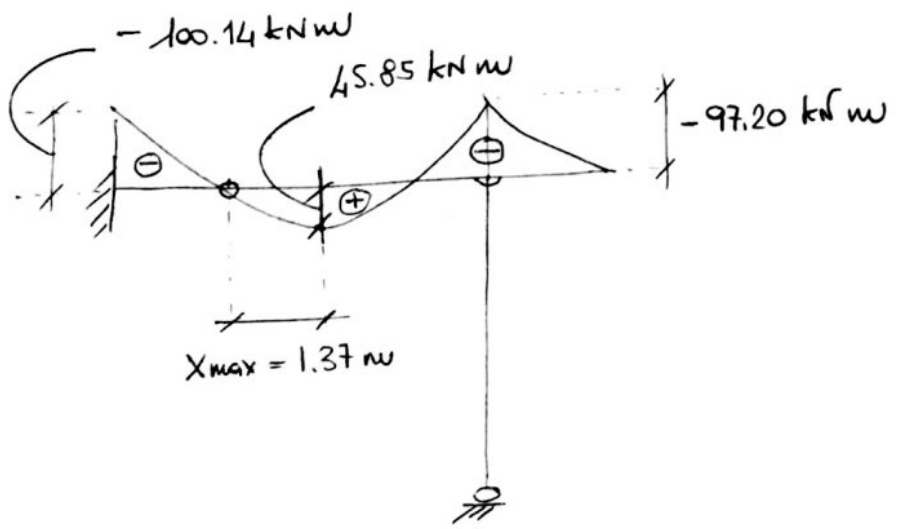
SFORZO NORMALE



TAGLIO



MOMENTO FLETTENTE



CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

ACCIAIO S235 :  $f_{yk} = 235 \text{ MPa}$  ,  $f_{tk} = 360 \text{ MPa}$   
 $E_s = 210 \text{ GPa}$

2.1) DIMENSIONARE E VERIFICARE L'ASTA (AD)  
UTILIZZANDO UN PROFILATO IPE

L'asta è soggetta a flessione-torçione. Si dimensiona l'asta a flessione con sezione trasversale costante; si eseguono le verifiche di resistenza nelle sezioni più critiche.

DIMENSIONAMENTO

Dimensionamento a flessione allo SLU:

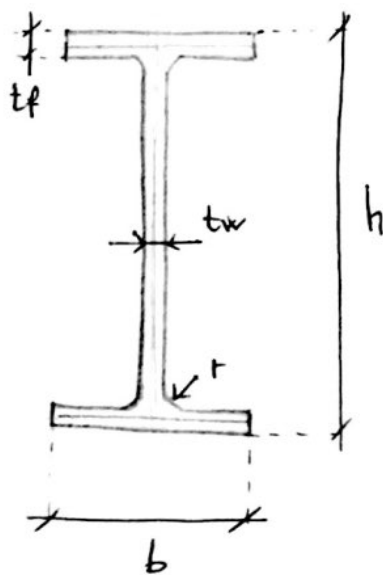
$M_{Ed} = 100.14 \text{ kNm}$

$W_{pl, min} = \frac{M_{Ed}}{f_{yd}} = 447.44 \text{ cm}^3$       dove  $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = 223.8 \text{ MPa}$

(modulo plastico minimo della sezione)

1.05

SAGOMARIO IPE



IPE 240 :  $W_{xpl} = 366.65 \text{ cm}^3$   
 $W_{ypl} = 73.92 \text{ cm}^3$

IPE 270 :  $W_{xpl} = 484 \text{ cm}^3$   
 $W_{ypl} = 96.95 \text{ cm}^3$

IPE 300 :  $W_{xpl} = 628.36 \text{ cm}^3$   
 $W_{ypl} = 125.22 \text{ cm}^3$

CARATTERISTICHE DEL PROFILATO SCELTO:

$h = 270 \text{ mm}$

$b = 135 \text{ mm}$

$t_w = 6.6 \text{ mm}$

$t_f = 10.2 \text{ mm}$

$r = 15 \text{ mm}$

$A = 45.95 \text{ cm}^2$

~~XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX~~

$W_{xpl} = 484 \text{ cm}^3$

$J_x = 5790 \text{ cm}^4$

~~XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX~~

CLASSIFICAZIONE DELLA SEZIONE

La classe della sezione corrisponde al valore di classe più alto tra quelli dei suoi elementi componenti. La classificazione è funzione:

- del RAPPORTO GEOMETRICO LARGHEZZA/SPESORE di anima e ali
- dello STATO DI SOLLECITAZIONE
- della CLASSE DI RESISTENZA DEL MATERIALE

CLASSE DEL MATERIALE

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yk}}} = 1.0$$

CLASSIFICAZIONE ANIMA

Rapporto geometrico:  $\frac{c}{t} = 33.27$

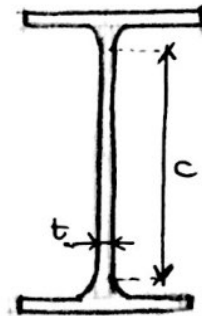
dove:

$$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r, \quad t = t_w$$

Sollecitazione: FLESSIONE

Limite  $\frac{c}{t}$  per classe 1:  $\left(\frac{c}{t}\right)_{\text{classe 1}} = 72 \cdot \epsilon = 72$

Essendo  $\frac{c}{t} < \left(\frac{c}{t}\right)_{\text{classe 1}} \rightarrow$  ANIMA ~~di~~ DI CLASSE 1



CLASSIFICAZIONE ALI

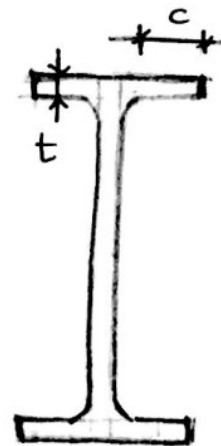
Sollecitazione: COMPRESIONE

Rapporto geometrico:  $\frac{c}{t} = 4.82$

$$c = (b - t_w - 2r) / 2, \quad t = t_f$$

Limite  $\frac{c}{t}$  per classe 1:  $\left(\frac{c}{t}\right)_{\text{classe 1}} = 9 \cdot \epsilon = 9$

Essendo  $\frac{c}{t} < \left(\frac{c}{t}\right)_{\text{classe 1}} \rightarrow$  ALI DI CLASSE 1



$\rightarrow$  SEZIONE DI CLASSE 1: Sezione in grado di sviluppare la cerniera plastica senza subire riduzione della resistenza

## VERIFICHE DI RESISTENZA

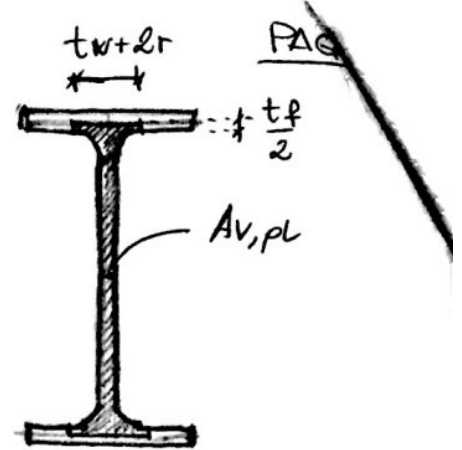
### VERIFICA A TAGLIO in B

$$V_{B,Ed} = 117.92 \text{ kN}$$

$$V_{Rpl} = A_{v,pl} \frac{f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 286 \text{ kN}$$

$$\text{dove } A_{v,pl} = A - 2b \cdot t_f + (t_w + 2r) \cdot t_f = \\ = 2214 \text{ mm}^2$$

Risulta che  $V_{Rpl} > V_{B,Ed}$



### VERIFICA A FLESSIONE

Essendo  $V_{Ed, \max} < 0.5 V_{Rpl} \Rightarrow$  si può trascurare l'influenza del taglio sulla resistenza a flessione

$$M_{pl,Rd} = W_{x,pl} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = 108 \text{ kNm}$$

Risulta quindi che  $M_{pl,Rd} > M_{Ed}$ .

## 2.2) PROGETTARE E VERIFICARE L'ASTA (CE) UTILIZZANDO PROFILATI HEA

L'asta in questione è soggetta solo a sforzo normale. Si progetta una colonna con sezione trasversale HEA eseguendo il dimensionamento a compressione e tenendo conto degli effetti dell'instabilità.

### DIMENSIONAMENTO

Il dimensionamento a compressione allo SLU viene condotto considerando che l'instabilità comporta una RIDUZIONE DELLA RESISTENZA dell'asta, in ragione del coefficiente  $\chi$ .  $\chi$  dipende dalle caratteristiche della sezione, pertanto in fase di dimensionamento viene fissato un valore di primo tentativo ( $\chi = \chi_0$ ).

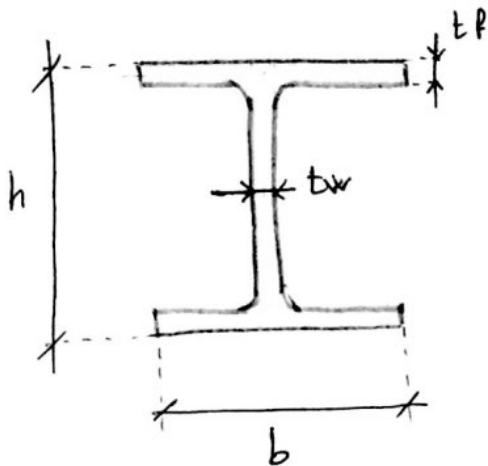
$N_{Ed} = 215.12 \text{ kN}$

$\chi_0 = 0.5$

$A_{min} = \frac{N_{Ed}}{\chi_0 \cdot f_{yd}} = 1922 \text{ mm}^2 = 19.22 \text{ cm}^2$

dove  $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}} = \frac{223.8 \text{ MPa}}{1.05}$

SAGOMARIO — HEA



- HEA 100 :  $A = 21.24 \text{ cm}^2$
- HEA 120 :  $A = 25.34 \text{ cm}^2$
- HEA 140 :  $A = 31.42 \text{ cm}^2$

CARATTERISTICHE DEL PROFILATO SCELTO:

- $h = 96 \text{ mm}$
- $t_w = 5 \text{ mm}$
- $r = 12 \text{ mm}$
- $J_x = 349.2 \text{ cm}^4$
- $j_x = 4.06 \text{ cm}$
- $b = 100 \text{ mm}$
- $t_f = 8 \text{ mm}$
- $A = 2124 \text{ mm}^2$
- $J_y = 133.8 \text{ cm}^4$
- $j_y = 2.51 \text{ cm}$

CLASSIFICAZIONE DELLA SEZIONE

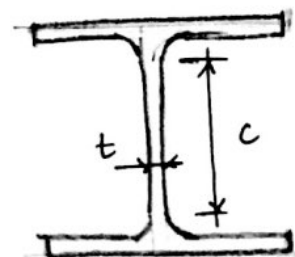
CLASSE DEL MATERIALE :  $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yk}}} = 1.0$

CLASSIFICAZIONE ANIMA

Sollecitazione : COMPRESSIONE

rapporto geometrico :  $\frac{c}{t} = 11.2$

$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r$  ,  $t = t_w$



limite  $\frac{c}{t}$  per classe 1 :  $\left(\frac{c}{t}\right)_{classe 1} = 33 \cdot \epsilon = 33$

Essendo  $\frac{c}{t} < \left(\frac{c}{t}\right)_{classe 1} \rightarrow$  ANIMA DI CLASSE 1

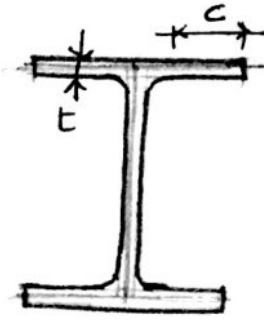
# CLASSIFICAZIONE ALI

Sollecitazione : COMPRESIONE

rapporto geometrico:  $\frac{c}{t} = 4.438$

$c = (b - t_w - 2r) / 2$  ,  $t = t_f$

limite  $\frac{c}{t}$  per classe 1:  $\left(\frac{c}{t}\right)_{\text{classe 1}} = 9 \cdot \epsilon = 9$



Essendo  $\frac{c}{t} < \left(\frac{c}{t}\right)_{\text{classe 1}} \rightarrow$  ALI DI CLASSE 1

$\rightarrow$  SEZIONE DI CLASSE 1

## VERIFICHE DI RESISTENZA

Verifica a compressione :

$N_{c,rd} = A \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = 475 \text{ kN} \rightarrow N_{c,rd} > N_{Ed}$

## VERIFICA DELLA STABILITA'

Determinare il  $\chi_{min}$  :

- scegliere l'orientamento della sezione trasversale del profilato (la scelta ottimale è quella che minimizza la snellezza dell'asta)

Condizioni di vincolo nei due piani globali di flessione,  $XZ$  (nel piano del disegno) e  $YZ$  (perpendicolare al piano del disegno):

- piano  $XZ$  : cerniera in C, cerniera in E  $\rightarrow \beta = 1$
- piano  $YZ$  : cerniera in C (traslaz. impedita), cerniera in E  $\rightarrow \beta = 1$

$\Rightarrow$  condizioni di vincolo identiche, ~~la condizione più critica~~  
la condizione più critica rispetto alla stabilità si verifica nel piano debole della sezione, ovvero dove l'inflessione è governata dal raggio giratore d'inerzia minimo :  $j_y$ .



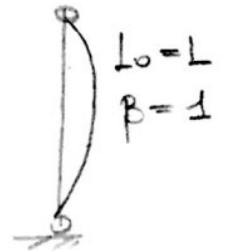
Si esegue la verifica di stabilità solo nel piano debole dell'asta.

$$\lambda_{cr} = \pi \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_{yk}}} = 93.91$$

~~Inflessione~~ Inflessione intorno all'asse debole y:

$$l_{0,y} = \beta_y \cdot L = 2,50 \text{ m} \quad \text{dove } \beta_y = 1.0 \text{ e } L = H$$

~~Lunghezza~~ (LUNGHEZZA LIBERA D'INFLESSIONE)



$$\lambda_y = \frac{l_{0,y}}{r_y} = 99,60 \quad (\leq 200 \text{ trattandosi di un elemento principale})$$

(doppia cerniera)

(SNEVEZZA DELL'ASTA)

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_{cr}} = 1.06 \quad (> 0.2 \text{ effetti di instabilità non trascurabili})$$

(SNEVEZZA ADIMENSIONALE)

TAB. A.2.VI → NTC08

- sezioni laminate (acciaio S235)
- $\frac{h}{b} = 0.96 < 1.2$
- $t_f \leq 100 \text{ mm}$

→ CURVA D'INSTABILITÀ (C) e FATTORE DI IMPERFEZIONE:  $\alpha_y = \alpha(f_{yk}, h/b, t_f) = 0.49$

$$\Phi_y = 0.5 \left[ 1 + \alpha_y \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 1.273$$

$$\chi_y = \min \left[ \left( \Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2} \right)^{-1}, 1 \right] = 0,506$$

$$\chi_{min} = 0.506$$

La resistenza all'instabilità risulta:

$$N_{b,Rd} = \chi_{min} \cdot A \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}} = 240 \text{ kN} \rightarrow N_{b,Rd} > |N_{Ed}|$$

PROGETTARE L'UNIONE BULLONATA IN B

Nello schema statico l'unione è schematizzata come una cerniera interna e dall'analisi strutturale emerge che tale unione deve trasmettere solo taglio:

→ i bulloni risultano impegnati a taglio

Dai dati assegnati:

- BULLONI M16 classe 5.6     $d = 16 \text{ mm}$
- $d_o = d + 1 = 17 \text{ mm}$
- $A_{res} = 157 \text{ mm}^2$
- $f_{tb} = 500 \text{ MPa}$

DIMENSIONAMENTO DEI BULLONI

$$V_{Ed, by} = V_B = 66,76 \text{ kN}$$

Si dimensionano i bulloni in corrispondenza dell'attacco con l'anima dell'asta. La vite di ogni bullone presenta  $n_v = 2$  piani di taglio

→ VALUTARE IL NUMERO DI BULLONI (unica incognita di progetto)

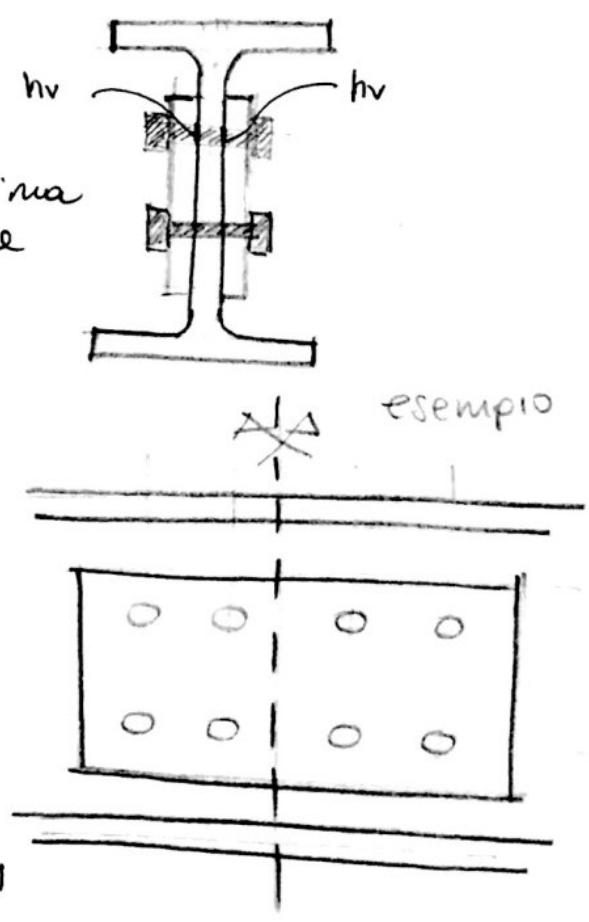
RESISTENZA DI CALCOLO A TAGLIO DEI BULLONI

(cautelativamente si considera come piano di taglio la parte filettata della vite)

$$F_{v,Rd,1} = \alpha_v \cdot f_{tb} \cdot \frac{A_{res}}{\gamma_{M2}} = 37,68 \text{ kN}$$

1.25

$\alpha_v = 0.6$  per la classe 5.6



TAGLIO MASSIMO PORTATO DA OGNI BULLONE

$$F_{V,Rd} = n_v \cdot F_{V,Rd} = 75,36 \text{ kN}$$

NUMERO DI BULLONI

$$n_{b,min} = \frac{V_{Ed,b}}{F_{V,Rd}} = 0,89 \rightarrow n_b = 2$$

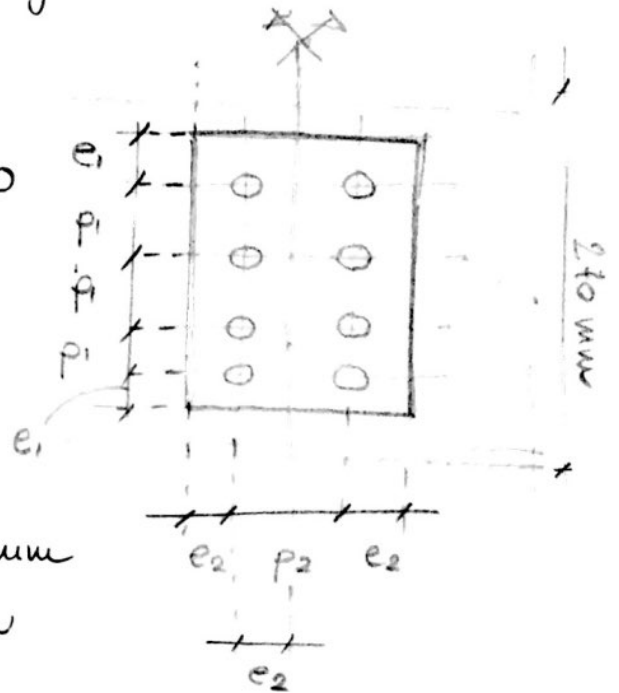
Dalle successive verifiche si evince che ciò che condiziona il progetto dell'unione bullonata è la crisi per RIFOLLAMENTO dell'anima della trave.

→ Si adotta  $n_b = 4$  bulloni disposti su un unico allineamento per minimizzare gli effetti del momento parasita.

CONFIGURAZIONE DEI FORI E DIMENSIONAMENTO DEL COPRIGIUNTO

Limitazioni geometriche imposte dalla normativa:

1.  $e_{1,min} = e_{2,min} = e_{2,min} = 1,2 d_o$   
( $d_o = d + 1 \text{ mm}$ )
2.  $e_{1,max} = e_{2,max} = e_{2,max} = 4 \cdot t_L + 40 \text{ mm}$   
 $t_L$ : spessore piatto = 4 mm
3.  $p_1,min = 2,2 d_o$
4.  $p_2,min = 2,4 d_o$
5.  $p_{1,max} = p_{2,max} = p_{2,max} = \min \{ 14 t_L ; 200 \text{ mm} \}$
6.  $l_{1,max} = h - 2 t_f - 2 r = 219,6 \text{ mm}$   
( $l_1$ : altezza del piatto e coprighiunto)



Ne conseguono le seguenti scelte progettuali:

- bulloni disposti su 4 file e 1 colonna:  $h_{bx} = 1$  e  $h_{by} = 4$
- Copripunto con piatto  $42 \times 207 \text{ mm}^2$  e di spessore  $t_L = 4 \text{ mm}$
- posizione del centro dei fori:  $e_1 = 21 \text{ mm}$ ,  $e_2 = 21 \text{ mm}$   
 $p_1 = 55 \text{ mm}$

VERIFICA DELLE LIMITAZIONI GEOMETRICHE [mm]

$$e_{\min} = 20.4 \leq e_1, e_2 \leq 56 = e_{\max}$$

$$p_{1 \min} = 37.4 \leq p_1 \leq 56 = p_{1 \max}$$

Inoltre l'altezza del copripunto  $I_L = 207 < I_{L \max}$

Essendo  $t_L = 4 \text{ mm} \geq \frac{t_w}{2} = 8.3 \Rightarrow$  l'elemento debole rispetto al rifollamento è l'anima della trave

DETERMINAZIONE DELLE MASSIME SOLLECITAZIONI AGENTI SUI BULLONI

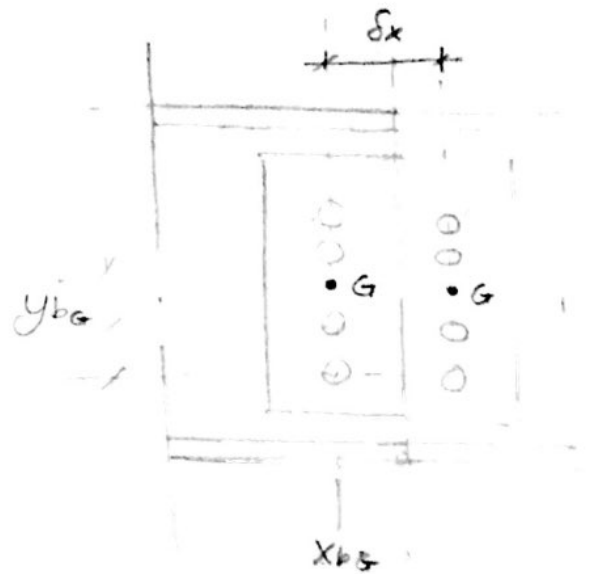
I bulloni sono impiepati a taglio verticale:

$$V_{Ed,b} = V_{Ed,by}$$

houchi al MOMENTO PARASSITA

$M_{par}$  associato a  $V_{Ed,by}$ .

$$M_{par} = V_{Ed,by} \cdot \frac{d_x}{2} = V_{Ed,by} (x_{bG} + e_2)$$



- Il taglio si ripartisce uniformemente tra i bulloni
- Il momento parassita invece in funzione della distanza dal relativo baricentro (in questo caso i bulloni più esterni saranno maggiormente sollecitati)

~~ES - TDC~~ DISTANZA DEL BULLONE PIU ESTERNO DAL BARICENTRO

$$x_{bG} = p_2 \frac{(n_{bx} - 1)}{2} = 0$$

$$y_{bG} = p_1 \frac{(n_{by} - 1)}{2} = 82,5 \text{ mm} = \left( \frac{207}{2} - 21 \right)$$

$$J_{bp} = J_{bx} + J_{by} = 15125 \text{ mm}^2$$

MOMENTO D'INERZIA POLARE (rispetto ad un punto, (polo))

(MOMENTO D'INERZIA POLARE DEI BULLONI)

$$J_p = \sum m_i r_i^2$$

dove:

r: distanza dal polo

$$J_{bx} = n_{bx} \cdot p_1^2 \sum_{i=0}^{i=n_{by}-1} i^2 - n_b \cdot y_{bG}^2 = 15125 \text{ mm}^2$$

$$J_{by} = n_{by} \cdot p_2^2 \sum_{i=0}^{i=n_{bx}-1} i^2 - n_b \cdot x_{bG}^2 = 0$$

(Tali espressioni sono generali, la determinazione delle grandezze geometriche e inerziali puo' essere piu' immediata)

$$M_{par} = V_{ed,by} \cdot e_2 = 1.40 \text{ kNm}$$

TAGLIO SOLLECCANTE (bulloni piu' esterni)

$$F_{ed,bx} = \frac{V_{ed,bx}}{n_b} + \frac{M_{par}}{J_{bp}} \cdot y_{bG} = 7,65 \text{ kN}$$

$$F_{ed,by} = \frac{V_{ed,by}}{n_b} + \frac{M_{par}}{J_{bp}} \cdot x_{bG} = 16,69 \text{ kN}$$

$$F_{ed,b} = \sqrt{F_{ed,bx}^2 + F_{ed,by}^2} = 18,36 \text{ kN}$$

$$F_{V,Rd} = n_v \cdot F_{V,Rd,1} = 75,36 \text{ kN}$$

$$F_{V,Rd} > F_{Ed,b}$$

VERIFICA A RIFOLLAMENTO DELLE LAMIERE

~~massima per la resistenza minima~~

$$\alpha = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{tb}}{f_{tk}}; 1 \right\} = 0,451$$

$$k = \min \left\{ \frac{2,8 e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} = 1,759$$

$$F_{b,Rd} = k \cdot \alpha \cdot d \cdot t \frac{f_{tk}}{\gamma_{M2}} = 22,03$$

$$\text{dove } t = \min \{ t_w, 2 \cdot t_t \} = 6,6 \text{ mm}$$

$$F_{b,Rd} > F_{Ed,b}$$