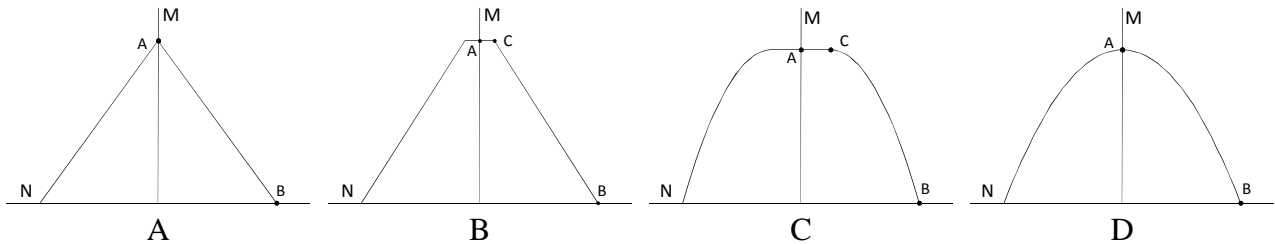
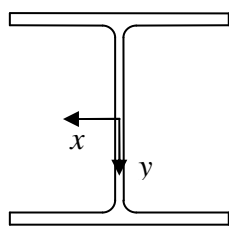


**Foglio 1**

Sono riportate di seguito quattro possibili forme del dominio di resistenza  $M-N$  per verifiche allo SLU di una sezione, in assenza di problemi di instabilità flessionale dell'asta (il disegno è solo qualitativo).



Devi costruire il dominio di resistenza per verifiche allo SLU della seguente sezione, soggetta a sforzo normale  $N$  e a momento flettente  $M_y$ . La sezione è di classe 1.



HE240A

Acciaio S235

Dati:

$$b = 240 \text{ mm}$$

$$h = 230 \text{ mm}$$

$$t_f = 12 \text{ mm}$$

$$t_w = 7.5 \text{ mm}$$

$$r = 21 \text{ mm}$$

$$A = 7680 \text{ mm}^2$$

$$W_{pl,x} = 744600 \text{ mm}^4$$

$$W_{pl,y} = 351700 \text{ mm}^4$$

(1) Qual è la forma del dominio?

(punti -1/+4)

☐ 1 A

☐ 2 B

☐ 3 C

☐ 4 D

☐ 5 nessuno dei 4

La forma A si utilizza con un modello del materiale lineare e quindi, nel caso di SLU, per sezioni di classe 3 o 4. La forma B corrisponde ad una sezione a doppio T o scatolare con momento flettente nel piano di maggior rigidità. La forma C corrisponde ad una sezione a doppio T o scatolare con momento flettente nel piano di minor rigidità. La forma D corrisponde ad una sezione rettangolare.

Poiché la sezione è a doppio T ed il momento  $M_y$  sollecita nell'asse debole, la risposta giusta è in questo caso la C.

(2) Spiega in che modo determini le coppie  $M-N$  corrispondenti ai punti significativi del dominio. Nota: data la simmetria, i punti significativi sono 2 o 3 (gli estremi ed eventualmente i punti intermedi indicati con un pallino). (punti -1/+8)

Con riferimento alle lettere (A, B, C) nella figura di sopra, scrivi qui le formule utilizzate per calcolare le coppie  $M-N$ , con tutti i valori iniziali e intermedi necessari.

Punto A:  $N=0$ ,  $M=M_{Rd}$

Punto B:  $N=a N_{Rd}$ ,  $M=M_{Rd}$

Punto C:  $N=N_{Rd}$ ,  $M=0$

con

$W_{pl}$ ,  $A$ ,  $b$ ,  $t_f$  riportati nei dati

$$a = \frac{A - 2 b t_f}{A} = 0.25$$

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M0} = 1.05$$

$$M_{Rd} = W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 78.71 \text{ kNm}$$

$$N_{Rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1718.9 \text{ kN}$$

Se si è indicato il domino sbagliato ho dato al massimo 4 punti, a chi ha indicato correttamente e chiaramente come calcolare i punti A e B (che valgono per tutti i domini).

(3) Che valori ottieni?

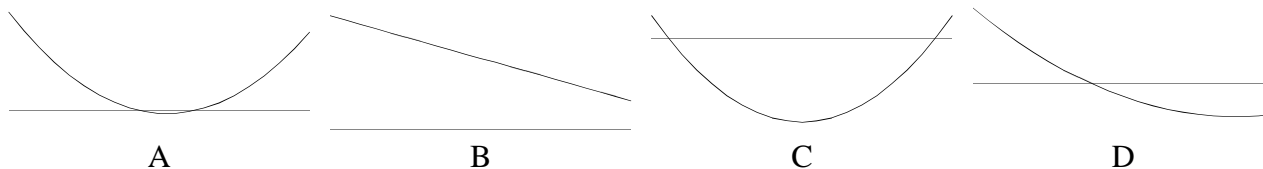
(punti -1/+6)

Punto A	$N = \underline{0}$ kN	$M = \underline{78.71}$ kNm
Punto B	$N = \underline{1718.9}$ kN	$M = \underline{0}$ kNm
Punto C (se c'è)	$N = \underline{429.7}$ kN	$M = \underline{78.71}$ kNm

Se si è indicato il domino sbagliato ho dato al massimo 3 punti, a chi ha indicato correttamente il valore di M ed N nei punti A e B (che valgono per tutti i domini).

## Foglio 2

Un'asta è soggetta a un rilevante sforzo normale di compressione e contemporaneamente ad un momento flettente che, a seconda dei casi, può avere uno degli andamenti sotto riportati.



(4) Qual è l'andamento del momento più gravoso?

(punti -1/+3)

☒ 1 A

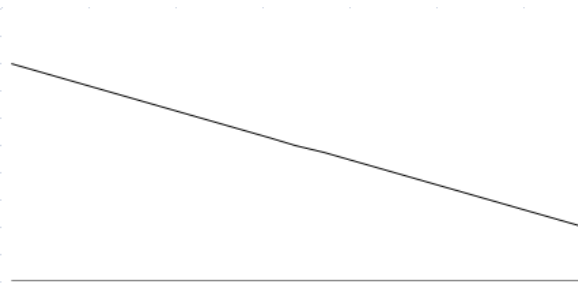
☐ 2 B

☐ 3 C

☐ 4 D

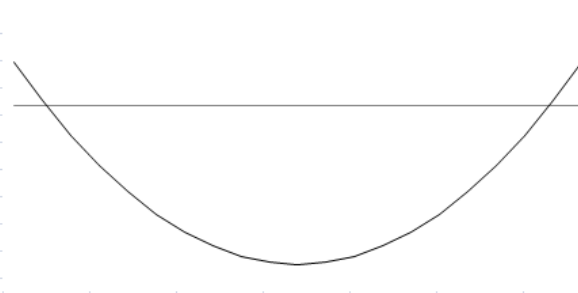
La situazione peggiore sarebbe quella in cui in tutta l'asta il momento è costante. La B ha momento tutto dello stesso segno, che però si riduce molto verso un estremo; il coefficiente  $C_m$  (o  $\alpha_m$ ) viene 0.7.

I	5.00	m				
q	0	kN/m				
MA	-100	kNm				
MB	-25	kNm	$\alpha_m$	0.700		



La C ha una piccola inversione di segno agli estremi, ma presenta il momento massimo in mezzeria, assomigliando al diagramma di trave appoggiata-appoggiata, che è gravoso quasi quanto quello costante; il coefficiente  $C_m$  (o  $\alpha_m$ ) viene 0.936.

I	5.00	m				
q	30	kN/m				
MA	-20	kNm				
MB	-20	kNm	$\alpha_m$	0.936		



La risposta giusta è la 3.

(5) Qual è l'andamento del momento meno gravoso?

(punti -1/+3)

☐ 1 A

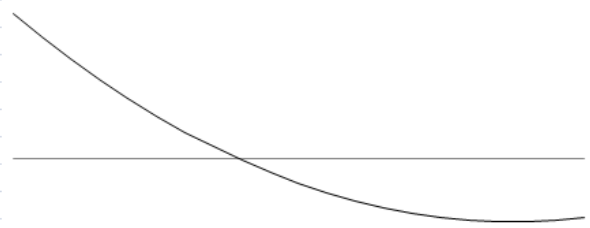
☐ 2 B

☐ 3 C

☐ 4 D

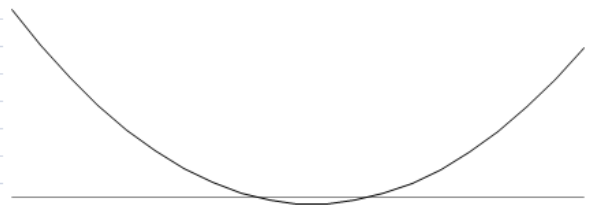
La situazione migliore sarebbe quella in cui il diagramma è intrecciato, con valori analoghi nei due segni. La D ha una inversione di segno cospicua; il coefficiente  $C_m$  (o  $\alpha_m$ ) viene 0.4.

I	5.00	m				
q	15	kN/m				
MA	-100	kNm				
MB	40	kNm	$\alpha_m$	0.400		



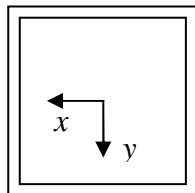
La A ha una inversione, anche se modesta, al centro e valori forti solo agli estremi; il coefficiente  $C_m$  (o  $\alpha_m$ ) viene però anche in questo caso 0.4.

I	5.00	m				
q	30	kN/m				
MA	-100	kNm				
MB	-80	kNm	$\alpha_m$	0.400		



La risposta giusta è quindi sia la 1 che la 4.

Fai riferimento alla seguente sezione da verificare allo SLU, soggetta contemporaneamente a taglio  $V_{y,Ed} = 180$  kN e a momento flettente  $M_{x,Ed} = 80$  kNm. La sezione è di classe 1.



scatolare

Acciaio S235

Dati:

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$h = 200 \text{ mm}$$

$$t_f = 12 \text{ mm}$$

$$t_w = 12 \text{ mm}$$

$$r = 0 \text{ mm}$$

$$A = 9024 \text{ mm}^2$$

$$W_{pl,x} = 424704 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,y} = 424704 \text{ mm}^3$$

- (6) Come determini il valore resistente del taglio ( $V_{y,Rd}$ ) e del momento flettente ( $M_{x,Rd}$ ) per la verifica? (punti -1/+8)

Scrivi qui le formule utilizzate per calcolare  $V_{y,Rd}$  e  $M_{x,Rd}$ , con tutti i valori iniziali e intermedi necessari e tenendo conto, se necessario, dell'interazione tra le due caratteristiche di sollecitazione.

La resistenza a taglio dipende dall'area a taglio  $A_v$ , che è l'area dell'anima al netto delle ali, più un pezzetto all'interno delle ali di altezza  $t_f/2$  (da ciascun lato) e larghezza che include l'eventuale raccordo circolare.

Per sezioni a doppio T sollecitate lungo l'anima è  $A_v = A - 2 b t_f + (t_w + 2 r) t_f$

Per sezioni a doppio T sollecitate lungo le ali è  $A_v = A - h_w t_w$

Per sezioni scatolari, come nel caso in esame, è  $A_v = 2 (h - t_f) t_w = \frac{A h}{b + h} = 4512 \text{ mm}^2$

La resistenza a taglio è  $V_{Rd} = A_v \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 583.0 \text{ kN}$  con  $f_y = 235 \text{ MPa}$   $\gamma_{M0} = 1.05$

Se, come in questo caso,  $V_{Ed} \leq \frac{V_{Rd}}{2}$  si ha  $M_{Rd} = W_{pl,x} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 95.05 \text{ kNm}$

In caso contrario si sarebbe dovuto calcolare

$$\rho = \left( \frac{2 V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1 \right)^2$$

$$\text{e quindi } M_{Rd} = \left( W_{pl,x} - \frac{\rho A_v^2}{4 t_w} \right) \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

(7) Che valore ottieni per la resistenza a taglio? (punti 0/+2)

$$V_{y,Rd} = \underline{583.0} \text{ kN}$$

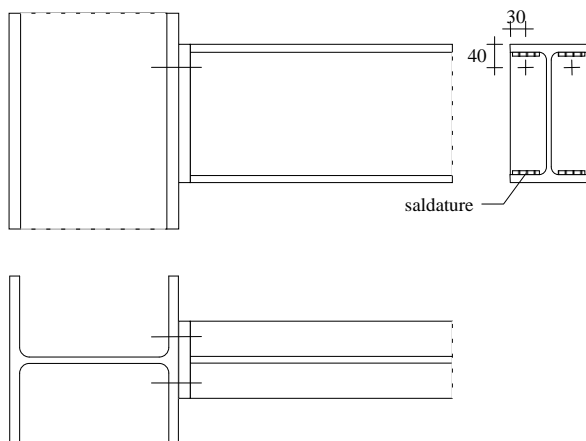
(8) E che valore ottieni per la corrispondente resistenza a flessione? (punti 0/+2)

$$M_{x,Rd} = \underline{95.05} \text{ kNm}$$

*Ho assegnato 1 punto se il valore di  $M_{x,Rd}$  è coerente con un valore di  $V_{y,Rd}$  sbagliato (nel senso che si è tenuto conto dell'influenza di  $\rho$  in maniera coerente).*

### Foglio 3

Una trave in acciaio S235, di lunghezza  $l = 1.80$  m e soggetta ad un carico uniforme  $q$ , è stata collegata ad una colonna come sotto disegnato (con una flangia saldata alla trave e poi unita alla colonna con solo due bulloni). All'altro estremo la trave è libera, quindi si comporta come una mensola.



Dati:

profilo trave IPE 240      piatto usato come flangia  
 $b = 120$  mm  
 $h = 240$  mm       $240 \times 120 \times 12$  mm  
 $t_f = 9.8$  mm  
 $t_w = 6.2$  mm  
 $r = 15$  mm  
 $A = 3910$  mm<sup>2</sup>  
 $W_{pl,x} = 366600$  mm<sup>4</sup>  
 $W_{pl,y} = 73920$  mm<sup>4</sup>

I bulloni usati per il collegamento sono M16 di classe 6.8, filettati solo alle estremità.

Il collegamento bullonato non è certo l'ideale, ma comunque è in grado di portare momento flettente e taglio provocati dal carico  $q$ . Tu devi valutare qual è la massima capacità portante del collegamento bullonato, ovvero qual è il massimo valore di  $q$  che può essere applicato alla trave.

(9) Quanto valgono, in funzione di  $q$ , il momento flettente ed il taglio che deve portare il collegamento bullonato (indica il numero, non l'espressione letterale)? (punti 0/+3)

$$M_{Ed} = \underline{1.62} \times q \text{ [kNm]} \quad V_{Ed} = \underline{1.8} \times q \text{ [kN]}$$

Il momento vale  $q \frac{l^2}{2} = 1.62 q$ ; il taglio vale  $q l = 1.8 q$ .

- (10) Come calcoli, in funzione di  $q$ , la sollecitazione tagliante e quella di trazione che deve portare il singolo bullone? (punti -1/+5)

La caratteristica di sollecitazione taglio  $V$  è portata dai due bulloni, lavorando a taglio. Ciascuno porta quindi una forza tagliante pari a  $V/2$ .

La caratteristica di sollecitazione momento flettente  $M$  diventa una forza di trazione, portata dai due bulloni lavorando a trazione, ed una forza di compressione. Il braccio  $z$  è la distanza tra l'asse dei bulloni e la posizione della risultante di compressione, che può essere assunta in asse all'ala inferiore. Quindi  $z = h - e_1 - 0.5 t_f = 195.1 \text{ mm}$ . Ciascun bullone porta metà della forza  $M/z$ .

*Ho tolto 2 punti a chi ha indicato come  $z$  l'altezza della trave; ho tolto 1 punto a chi ha indicato come  $z$   $h - e_1$  senza togliere  $0.5 t_f$ .*

- (11) E quanto valgono? (punti 0/+2)

$$F_{v,Ed} = \boxed{0.9} \times q \quad F_{t,Ed} = \boxed{4.15} \times q$$

*Ho accettato senza penalizzazioni il valore di  $F_{t,Ed}$  calcolato senza togliere  $0.5 t_f$ , ottenendo 4.05. Ho invece considerato sbagliato (e tolto quindi 1 punto) qualunque altro valore.*

- (12) Come calcoli la resistenza a taglio del singolo bullone e la resistenza a rifollamento del piatto? (punti -1/+5)

Il bullone M16 ha un'area  $A=201 \text{ mm}^2$ . La resistenza a taglio è

$$F_{v,Rd} = 0.6 A \frac{f_{ub}}{\gamma_{M2}} = 57.9 \text{ kN}$$

essendo  $f_{ub} = 600 \text{ MPa}$  e  $\gamma_{M2} = 1.25$

La resistenza a rifollamento dipende da

$$k = \min\left(2.5; \frac{2.8 e_2}{d_0}\right) = 2.5 \quad \text{essendo } e_2=30 \text{ mm e } d_0=17 \text{ mm}$$

$$\alpha = \min\left(1; \frac{e_1}{3 d_0}\right) = 0.784 \quad \text{essendo } e_1=40 \text{ mm}$$

$$\text{ed è } F_{b,Rd} = k \alpha d t \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 108.4 \text{ kN}$$

essendo per il piatto  $t=12 \text{ mm}$ ,  $f_u=360 \text{ MPa}$  e  $d=16 \text{ mm}$

*Ho tolto 2 punti a chi non ha indicato le espressioni che forniscono  $k$  e  $\alpha$ .*

- (13) E quanto valgono? (punti 0/+2)

$$F_{v,Rd} = \boxed{57.9} \text{ kN} \quad F_{b,Rd} = \boxed{108.4} \text{ kN}$$

*Nel formulare il quesito io pensavo alla resistenza a rifollamento del piatto in corrispondenza del singolo bullone, ma in effetti il testo non è chiaro. Ho quindi considerata corretta la risposta di chi ha indicato il valore totale, cioè 216.8 kN.*

## Foglio 4

- (14) Come calcoli la resistenza a trazione del singolo bullone e la resistenza a punzonamento del piatto? (punti -1/+5)

Il bullone M16 ha un'area resistente  $A_{res}=157 \text{ mm}^2$ . La resistenza a trazione è

$$F_{t,Rd} = 0.9 A_{res} \frac{f_{ub}}{\gamma_{M2}} = 67.8 \text{ kN}$$

La resistenza a punzonamento è

$$B_{p,Rd} = 0.6 \pi d_m t \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 166.8 \text{ kN} \quad \text{essendo } d_m \cong 1.6 d, t=12 \text{ mm e } f_u=360 \text{ MPa}$$

*Ho tolto 1 punto a chi non ha indicato il valore di  $d_m$ , anche se il risultato del calcolo mostra che ha preso un valore corretto.*

- (15) E quanto valgono? (punti 0/+2)

$$F_{t,Rd} = \boxed{67.8} \text{ kN}$$

$$B_{p,Rd} = \boxed{166.8} \text{ kN}$$

*Nel formulare il quesito io pensavo alla resistenza a punzonamento del piatto in corrispondenza del singolo bullone, ma in effetti il testo non è chiaro. Ho quindi considerata corretta la risposta di chi ha indicato il valore totale, cioè 333.6 kN.*

- (16) Come calcoli il valore massimo di  $q$  che può essere portato dal collegamento? (punti -1/+5)

I bulloni sono soggetti a taglio e trazione- La verifica è

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 F_{t,Rd}} \leq 1 \text{ e } \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1$$

Usando i valori di  $F_{v,Ed}$  e  $F_{t,Ed}$  indicati al punto 11, funzione di  $q$ , ed i valori resistenti, si calcola  $q$

*Se si è fatto riferimento solo a  $F_t$  (anche se questa era la condizione più gravosa) senza citare l'altra condizione ho tolto 2 punti. Se si è fatto riferimento solo a  $F_v$  (che qui quasi non conta) senza citare  $F_t$  ho dato 0 punti.*

- (17) E quanto vale? (punti 0/+2)

$$q = \boxed{16.34} \text{ kN/m}$$

*Se il valore calcolato al punto 11 era sbagliato, ma il valore qui indicato è coerente ad esso, ho assegnato 1 punto.*

Il collegamento tra la trave e la flangia è realizzato mediante le quattro saldature a cordone d'angolo disegnate in figura, che hanno  $l = 40 \text{ mm}$  (al netto dei tratti di estremità su cui non fai affidamento) e  $a = 6 \text{ mm}$ .

- (18) Quanto vale, in funzione di  $q$ , la forza che sollecita ciascuna saldatura? (punti 0/+3)

$$F_{Ed} = \boxed{3.78} \times q$$

La caratteristica di sollecitazione taglio  $V$  è portata dai quattro cordoni, come azione verticale. Ciascuna porta quindi una forza verticale pari a  $V/4 = 0.45 q$ .

La caratteristica di sollecitazione momento flettente  $M$  diventa una forza di trazione, portata da due cordoni come azione orizzontale, ed una forza di compressione portata dagli altri due cordoni. Il braccio  $z$  è la distanza tra l'asse dei cordoni superiori ed inferiori. Quindi  $z = h - 2 t_f - a = 214.4 \text{ mm}$ . Ciascun cordone porta la forza verticale  $M/2 z = 3.78 q$ .

La forza risultante è  $\sqrt{0.45^2 + 3.78^2} = 3.80 q$  (la forza verticale è molto piccola)

(19) Come calcoli la resistenza di ciascuna saldatura?

(punti -1/+5)

Col dominio sferico, il cordone resiste a una forza

$$F_{Rd} = a l \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} = 49.88 \text{ kN}$$

con  $\beta_w = 0.8$  per l'acciaio S235

*Ho tolto 1 punto a chi non ha indicato il valore di  $\beta_w$ . Ho tolto 2 punti a chi non ha indicato l'espressione che fornisce  $f_{v,wd}$ .*

*Ho tolto 1 punto a chi ha considerato una lunghezza  $l$  ridotta di 2 a perché avevo specificato che  $l$  è al netto dei tratti di estremità su cui non fare affidamento.*

(20) E quanto vale?

(punti 0/+2)

$$F_{Rd} = \boxed{49.88} \text{ kN}$$

*Ho dato 1 punto se si è considerata una lunghezza  $l$  ridotta di 2 a ma il calcolo è coerente.*

(21) Qual è il valore massimo di  $q$  che può essere portato dalle saldature?

13.11 (punti 0/+3)

$$q = \boxed{\phantom{000000}} \text{ kN/m}$$

Il valore si ottiene uguagliando  $F_{Ed}$  (che dipende da  $q$ ) e  $F_{Rd}$ .

*Se il valore calcolato al punto 18 era sbagliato, ma il valore qui indicato è coerente ad esso, ho assegnato 2 punti.*