

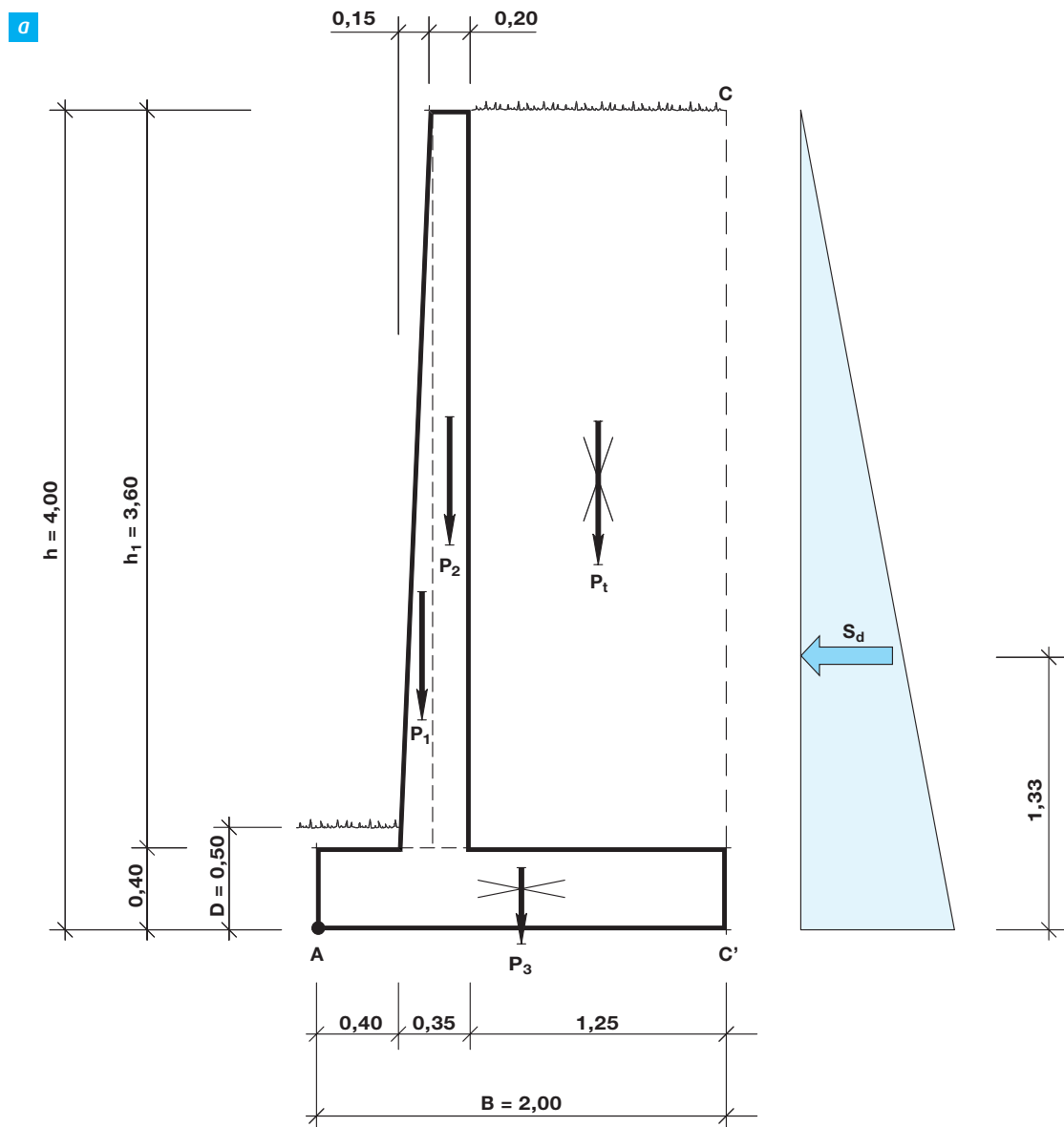
ESERCIZIO SVOLTO D

Osservando le prescrizioni delle N.T.C. 2008, eseguire le verifiche agli stati limite ultimi di ribaltamento, di scorrimento sul piano di posa e di collasso per carico limite fondazione-terreno per il muro di sostegno in c.a. riportato in figura *a*, il cui piano di posa della fondazione è alla profondità $D = 0,50$ m dal piano di campagna.

Gli elementi caratteristici del terreno sono:

- angolo di attrito $\varphi = 35^\circ$;
- peso per unità di volume del terreno $\gamma_t = 17,00 \text{ kN/m}^3$.

Sul terrapieno non grava alcun sovraccarico.



Verifica al ribaltamento (EQU)

Viene considerato come stato limite di equilibrio di corpo rigido e si applica la Combinazione EQU + M_2 + R_2 .

1) Momento spingente di calcolo $M_{sd} = E_d$ (sfavorevole)

I valori caratteristici dei parametri geotecnici vengono ridotti con i coefficienti parziali $\gamma_M(M_2)$ (Volume 5, pag. 21, tab. 5) ottenendo i valori di calcolo:

$$\text{– angolo di attrito: } \varphi' = \arctg \frac{\text{tg } \varphi}{\gamma_{\varphi'}} = \arctg \frac{\text{tg } 35^\circ}{1,25} \approx 29^\circ,26$$

$$\text{– peso unitario di volume del terreno: } \gamma_t = \frac{\gamma_t}{\gamma_\gamma} = \frac{17,00}{1,0} = 17,00 \text{ kN/m}^3$$

Spinta del terreno contro la parete fittizia C-C':

$$S_t = \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot h^2 \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right) = \frac{1}{2} \times 17,00 \times 4,00^2 \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{29^\circ,26}{2} \right) \approx 46,70 \text{ kN}$$

Il valore ottenuto deve essere amplificato tramite il coefficiente parziale $\gamma_{G1} = 1,1$ (EQU) (Volume 5, pag. 21, tab. 4) per ricavare l'intensità della spinta di calcolo:

$$S_{t,d} = S_t \cdot \gamma_{G1} = 46,70 \times 1,1 = 51,37 \text{ kN}$$

applicata alla distanza $d_s = \frac{h}{3} = \frac{4,00}{3} \approx 1,33$ m dalla base del muro.

$$M_{sd} = S_{t,d} \cdot d_s = 51,37 \times 1,33 \approx 68,32 \text{ kN m}$$

2) Momento resistente di calcolo M_{rd} (favorevole)

Pesi nominali del muro e del terreno sulla mensola a monte:

$P_1 = \left(\frac{1}{2} \times 0,15 \times 3,60 \times 1,00 \right) \text{ m}^3 \cdot 25,00 \text{ kN/m}^3 =$	6,75 kN
$P_2 = (0,20 \times 3,60 \times 1,00) \text{ m}^3 \cdot 25,00 \text{ kN/m}^3 =$	18,00 kN
$P_3 = (2,00 \times 0,40 \times 1,00) \text{ m}^3 \cdot 25,00 \text{ kN/m}^3 =$	20,00 kN
$P_t = (1,25 \times 3,60 \times 1,00) \text{ m}^3 \cdot 17,00 \text{ kN/m}^3 =$	76,50 kN
	Σ P = 121,25 kN

Ai valori nominali viene applicato il coefficiente riduttivo $\gamma_{G1} = 0,9$ (EQU) (Volume 5, pag. 21, tab. 4) per ricavare il valore dei pesi di calcolo:

$$P_{1,d} = P_1 \cdot \gamma_{G1} = 6,75 \times 0,9 \approx 6,08 \text{ kN}$$

$$P_{2,d} = P_2 \cdot \gamma_{G1} = 18,00 \times 0,9 \approx 16,20 \text{ kN}$$

$$P_{3,d} = P_3 \cdot \gamma_{G1} = 20,00 \times 0,9 \approx 18,00 \text{ kN}$$

$$P_{t,d} = P_t \cdot \gamma_{G1} = 76,50 \times 0,9 \approx 68,85 \text{ kN}$$

Bracci dei pesi rispetto al punto A:

$$d_1 = 0,50 \text{ m} \quad d_2 = 0,65 \text{ m} \quad d_3 = 1,00 \text{ m} \quad d_t = 1,375 \text{ m}$$

Quindi:

$$M_{rd} = 6,08 \times 0,50 + 16,20 \times 0,65 + 18,00 \times 1,00 + 68,85 \times 1,375 \approx 126,24 \text{ kN m}$$

Il valore di M_{rd} viene ridotto con il coefficiente parziale della resistenza $\gamma_R = 1,0$ (R_2) per ottenere la resistenza di calcolo:

$$R_d = \frac{M_{rd}}{\gamma_R} = \frac{126,24}{1,0} = 124,24 \text{ kN m}$$

3) Verifica

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{124,24}{68,32} \approx 1,85 > 1$$

Verifica allo scorrimento sul piano di posa

Viene applicata la Combinazione $A_1 + M_1 + R_3$ dell'Approccio 2.

I valori di calcolo dei parametri geotecnici sono uguali a quelli caratteristici, in quanto i coefficienti parziali $\gamma_M (M_1)$ sono tutti unitari.

1) Spinta di calcolo $S_{t,d} = E_d$ (sfavorevole)

Spinta orizzontale contro la parete fittizia C-C':

$$S_t = \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{1}{2} \times 17,00 \times 4,00^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{35^\circ}{2} \right) \approx 36,85 \text{ kN}$$

Applicando il coefficiente parziale $\gamma_{G1} = 1,3$ (A_1) si ottiene la spinta orizzontale di calcolo:

$$S_{t,d} = E_d = S_t \cdot \gamma_{G1} = 36,85 \times 1,3 \approx 47,91 \text{ kN}$$

2) Azione resistente di calcolo R_d (favorevole)

Il coefficiente parziale γ_{G1} da applicare ai pesi del muro e del terreno sopra la mensola a monte è unitario, per cui il valore nominale del peso totale è uguale a quello di calcolo e vale:

$$P_d = \Sigma P = 121,25 \text{ kN} \quad (\text{vedi verifica al ribaltamento}).$$

Il coefficiente di attrito terra-muro è $f = \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} 35^\circ \approx 0,70$ e quindi l'intensità della forza di attrito risulta:

$$F_a = f \cdot P_d = 0,70 \times 121,25 \approx 84,88 \text{ kN}$$

alla quale deve essere applicato il coefficiente parziale riduttivo $\gamma_R = 1,1$ (R_3) per ottenere la resistenza di progetto:

$$R_d = \frac{F_a}{\gamma_R} = \frac{84,88}{1,1} \approx 77,16 \text{ kN}$$

3) Verifica

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{77,16}{47,91} \approx 1,64 > 1$$

Verifica al collasso per carico limite dell'insieme fondazione terreno

Si utilizza la Combinazione $A_1 + M_1 + R_3$ dell'Approccio 2.

1) Momento spingente di calcolo M_{Sd}

I coefficienti parziali da applicare ai parametri geotecnici [$\gamma_{\varphi'} = \gamma_\gamma = 1,0$ (A_1)] e quello da applicare alla spinta [$\gamma_{G1} = 1,3$ (A_1)] sono uguali a quelli utilizzati per la verifica a scorrimento, dalla quale è risultato il valore della spinta di calcolo $S_{t,d} = 47,91 \text{ kN}$, e quindi si ha:

$$M_{Sd} = S_{t,d} \cdot \frac{h}{3} = 47,91 \times 1,33 = 63,72 \text{ kN m}$$

2) Momento resistente di calcolo M_{Rd}

I pesi nominali del muro e del terreno sopra la mensola a monte, calcolati per la verifica al ribaltamento, vengono amplificati applicando il coefficiente parziale $\gamma_{G1} = 1,3$ (A_1), ottenendo i relativi valori di calcolo:

$P_{1,d} = P_1 \cdot \gamma_{G1} = 6,75 \times 1,3 \approx$	8,78 kN
$P_{2,d} = P_2 \cdot \gamma_{G1} = 18,00 \times 1,3 =$	23,40 kN
$P_{3,d} = P_3 \cdot \gamma_{G1} = 20,00 \times 1,3 =$	26,00 kN
$P_{t,d} = P_t \cdot \gamma_{G1} = 76,50 \times 1,3 =$	99,45 kN
peso totale di calcolo	<hr style="width: 100%; border: 0.5px solid black;"/> $P_d = E_d = 157,63 \text{ kN}$

Bracci rispetto al punto A:

$$d_1 = 0,50 \text{ m} \quad d_2 = 0,65 \text{ m} \quad d_3 = 1,00 \text{ m} \quad d_t = 1,375 \text{ m}$$

Quindi:

$$M_{Rd} = 8,78 \times 0,50 + 23,40 \times 0,65 + 26,00 \times 1,00 + 99,45 \times 1,375 \approx 182,34 \text{ kN m}$$

3) Calcolo dell'eccentricità

$$u = \frac{M_{Rd} - M_{Sd}}{P_d} = \frac{182,34 - 63,72}{157,63} \approx 0,753 \text{ m}$$

$$e = \frac{B}{2} - u = \frac{2,00}{2} - 0,753 = 0,247 \text{ m}$$

4) Calcolo del carico limite del terreno

Il carico ultimo viene determinato con la formula di Brinch-Hansen, considerando la coesione $c = 0$:

$$q_{ult} = \gamma_t \cdot D \cdot N_q \cdot d_q \cdot i_q + \frac{\gamma_t}{2} \cdot B^* \cdot N_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma$$

dove:

– $D = 0,50 \text{ m}$: profondità del piano di posa della fondazione

– $B^* = B - 2 \cdot e = 2,00 - 2 \times 0,247 = 1,506$: larghezza equivalente della fondazione per carico eccentrico

– fattori adimensionali di capacità portante: $N_q = 33,30$; $N_\gamma = 33,92$

– coefficienti di profondità:

$$d_q = 1 + 2 \cdot \frac{D}{B} \cdot \text{tg } \varphi \cdot (1 - \text{sen } \varphi)^2 = 1 + 2 \times \frac{0,50}{2,00} \cdot \text{tg } 35^\circ \cdot (1 - \text{sen } 35^\circ)^2 \approx 1,064 \quad (\text{per } D < B)$$

$$d_\gamma = 1$$

– coefficienti di inclinazione:

$$i_q = \left(1 - \frac{S_{t,d}}{P_d}\right)^2 = \left(1 - \frac{47,91}{157,63}\right)^2 \approx 0,4845$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{S_{t,d}}{P_d}\right)^3 = \left(1 - \frac{47,91}{157,63}\right)^3 \approx 0,3372$$

Risulta quindi:

$$q_{ult} = (17,00 \times 0,50 \times 33,30 \times 1,064 \times 0,4845) + \left(\frac{17,00}{2} \times 1,506 \times 33,92 \times 1 \times 0,3372\right) \approx 292,33 \text{ kN/m}^2$$

e sulla larghezza equivalente si ha:

$$Q_{ult} = q_{ult} \cdot B^* = 292,33 \times 1,506 \approx 440,25 \text{ kN/m}$$

Questo valore viene diviso per il coefficiente parziale riduttivo $\gamma_R = 1,4$ (R_3), ottenendo la resistenza di progetto:

$$R_d = Q_{lim} = \frac{Q_{ult}}{\gamma_R} = \frac{440,25}{1,4} \approx 314,46 \text{ kN/m}$$

5) Verifica

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{314,26}{157,63} \approx 1,99 > 1$$