

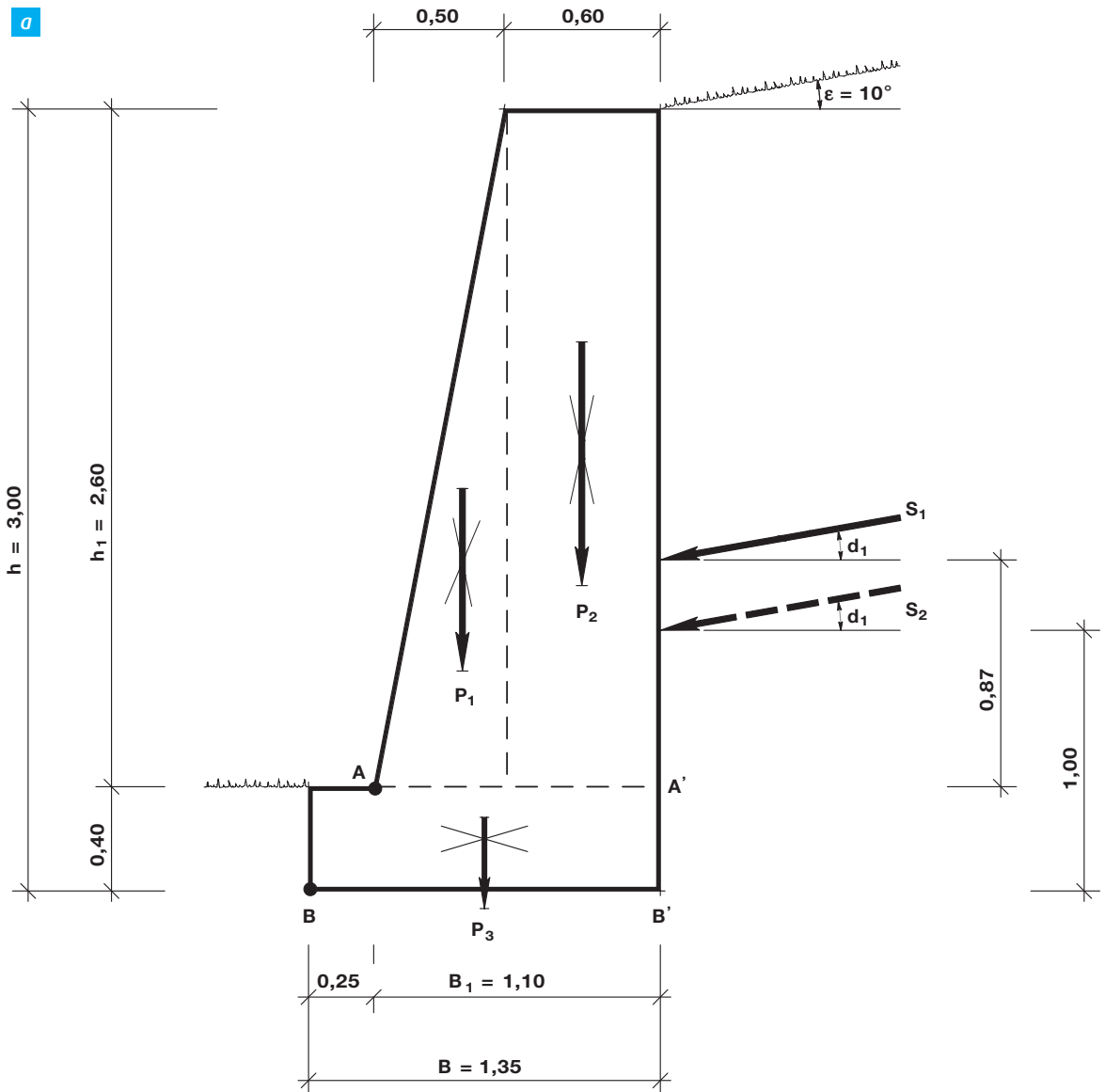
ESERCIZIO SVOLTO E

Eseguire le verifiche agli stati limite ultimi di ribaltamento, di scorrimento sul piano di posa e di schiacciamento relative alle sezioni $A-A'$ e $B-B'$ del muro di sostegno in calcestruzzo non armato riportato in figura a , essendo la superficie superiore del terrapieno priva di sovraccarico e inclinata dell'angolo $\varepsilon \approx +10^\circ$ rispetto all'orizzontale.

Gli elementi caratteristici del terreno sono:

- angolo di attrito $\varphi = 32^\circ$;
- peso per unità di volume del terreno $\gamma_t = 18,00 \text{ kN/m}^3$.

Il piano di posa della fondazione è situato alla profondità $D \approx 0,40 \text{ m}$ rispetto alla superficie anteriore del piano di campagna.



Verifica al ribaltamento (EQU)

Per questa verifica lo S.L.U. viene considerato come uno stato limite di equilibrio di corpo rigido, utilizzando la Combinazione $\text{EQU} + M_2 + R_2$.

Sezione A-A'

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

Ai valori caratteristici dei parametri geotecnici si applicano i coefficienti parziali riduttivi $\gamma_M(M_2)$ per ottenere i relativi valori di calcolo:

$$\text{– angolo di attrito: } \varphi' = \arctg \frac{\text{tg } \varphi}{\gamma_{\varphi'}} = \arctg \frac{\text{tg } 32^\circ}{1,25} \approx 26^\circ,56$$

$$\text{– peso per unità di volume del terreno: } \gamma_t = \frac{\gamma_t}{\gamma_\gamma} = \frac{18,00}{1,0} = 18,00 \text{ kN/m}^3$$

Con questi parametri geotecnici corretti, si è applicato il procedimento di Poncelet per calcolare la spinta ottenendo le lunghezze della dimensione di spinta $y = 1,70$ m e del segmento $p = 1,60$ m; l'intensità della spinta risulta quindi:

$$S_1 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot y \cdot p = \frac{1}{2} \times 18,00 \times 1,70 \times 1,60 = 24,48 \text{ kN}$$

con linea di azione inclinata dell'angolo $\varphi_1 = \frac{2}{3} \cdot \varphi = \frac{2}{3} \times 26^\circ,56 \approx 17^\circ,71$ rispetto all'orizzontale.

Le componenti orizzontale $S_{1,x}$ e verticale $S_{1,y}$ della spinta hanno le intensità:

$$S_{1,x} = S_1 \cdot \cos \varphi_1 = 24,48 \times \cos 17^\circ,71 \approx 23,32 \text{ kN}$$

$$S_{1,y} = S_1 \cdot \sin \varphi_1 = 24,48 \times \sin 17^\circ,71 \approx 7,45 \text{ kN}$$

Per calcolare il momento spingente di calcolo, la componente $S_{1,x}$ deve essere amplificata moltiplicandola per il coefficiente parziale $\gamma_{G1} = 1,1$ (EQU) per ottenere il valore di calcolo:

$$S_{x,d} = S_{1,x} \cdot \gamma_{G1} = 23,32 \times 1,1 = 25,65 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = E_d = S_{x,d} \cdot \frac{h_1}{3} = 25,65 \times \frac{2,60}{3} = 22,23 \text{ kN m}$$

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

È dovuto al peso del muro e alla componente verticale della spinta.

$$P_1 = \left(\frac{1}{2} \times 0,50 \times 2,60 \times 1,00 \right) \text{ m}^3 \cdot 24,00 \text{ kN/m}^3 = 15,60 \text{ kN}$$

$$P_2 = (0,60 \times 2,60 \times 1,00) \text{ m}^3 \cdot 24,00 \text{ kN/m}^3 = 37,44 \text{ kN}$$

$$S_{1,y} = 7,45 \text{ kN}$$

$$P = 60,49 \text{ kN}$$

Questi valori nominali devono essere moltiplicati per il coefficiente parziale $\gamma_{G1} = 0,9$ (EQU) per ottenere i valori dei pesi di calcolo:

$$P_{1,d} = 15,60 \times 0,9 = 14,04 \text{ kN}$$

$$P_{2,d} = 37,44 \times 0,9 = 33,70 \text{ kN}$$

$$S_{y,d} = 7,45 \times 0,9 = 6,71 \text{ kN}$$

$$P_d = 54,45 \text{ kN}$$

e i relativi bracci rispetto al punto A sono:

$$d_1 = \frac{2}{3} \times 0,50 \approx 0,33 \text{ m} \quad d_2 = \frac{0,60}{2} + 0,50 = 0,80 \text{ m} \quad d_3 = 0,50 + 0,60 = 1,10 \text{ m}$$

$$M_{rd} = 14,04 \times 0,33 + 33,70 \times 0,80 + 6,71 \times 1,10 \approx 38,97 \text{ kN m}$$

3) Verifica

Il coefficiente parziale riduttivo della resistenza $\gamma_R(R_2)$ è unitario e quindi si ha:

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{M_{Rd}}{M_{Sd}} = \frac{38,97}{22,23} \approx 1,75 > 1$$

Sezione B-B'

1) Momento spingente di calcolo (sfavorevole)

Applicando il procedimento di Poncelet si sono ottenute le lunghezze della dimensione di spinta $y = 1,95$ m e del segmento $p = 1,85$ m e quindi l'intensità della spinta è:

$$S_2 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot y \cdot p = \frac{1}{2} \times 18,00 \times 1,95 \times 1,85 \approx 32,47 \text{ kN}$$

con linea di azione inclinata dell'angolo $\varphi_1 = 17^\circ,71$ rispetto all'orizzontale; le sue componenti valgono:

$$S_{2,x} = S_2 \cdot \cos \varphi_1 = 32,47 \cdot \cos 17^\circ,71 \approx 30,93 \text{ kN}$$

$$S_{2,y} = S_2 \cdot \sin \varphi_1 = 32,47 \cdot \sin 17^\circ,71 \approx 9,88 \text{ kN}$$

Il valore di calcolo della componente orizzontale risulta:

$$S_{x,d} = S_{2,x} \cdot \gamma_{G1} = 30,93 \times 1,1 \approx 34,02 \text{ kN}$$

$$M_{Sd} = S_{x,d} \cdot \frac{h}{3} = 34,02 \times \frac{3,00}{3} = 34,02 \text{ kN m}$$

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

Forze agenti verticali:

$P_1 =$	15,60 kN
$P_2 =$	37,44 kN
$P_3 = (1,35 \times 0,40 \times 1,00) \text{ m}^3 \cdot 24,00 \text{ kN/m}^3 =$	12,96 kN
$S_{2,y} =$	9,88 kN
	<hr/>
	$P = 75,88 \text{ kN}$

Si applica il coefficiente parziale riduttivo $\gamma_{G1} = 0,9$ (EQU) per ottenere i valori di calcolo:

$P_{1,d} =$	14,04 kN
$P_{2,d} =$	33,70 kN
$P_{3,d} = 12,96 \times 0,9 \approx$	11,66 kN
$S_{2,y} = 9,88 \times 0,9 \approx$	8,89 kN
	<hr/>
	$P_d = 68,29 \text{ kN}$

e i relativi bracci rispetto al punto B sono:

$$d_1 = 0,33 + 0,25 = 0,58 \text{ m} \quad d_2 = 0,80 + 0,25 = 1,05 \text{ m} \quad d_3 = \frac{1,35}{2} = 0,675 \text{ m} \quad d_5 = 1,35 \text{ m}$$

Quindi:

$$M_{Rd} = 14,04 \times 0,58 + 33,70 \times 1,50 + 11,66 \times 0,675 + 8,89 \times 1,35 \approx 63,40 \text{ kN m}$$

Questo valore corrisponde anche alla resistenza di progetto in quanto il coefficiente parziale $[\gamma_R(R_2)]$ da applicare è unitario.

3) Verifica

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{\frac{M_{Rd}}{\gamma_R}}{M_{Sd}} = \frac{63,40}{34,02} \approx 1,86 > 1$$

Verifica allo scorrimento sul piano di posa

Viene utilizzata 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 il coefficiente parziale $[\gamma_M(M_1)]$ da applicare è unitario.

Sezione A-A'

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

Applicando il procedimento di Poncelet si sono ottenute le lunghezze dei segmenti $p = 1,41$ m e $y = 1,53$ m e quindi la spinta risulta:

$$S_1 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot y \cdot p = \frac{1}{2} \times 18,00 \times 1,53 \times 1,41 \approx 19,42 \text{ kN}$$

inclinata dell'angolo $\varphi_1 = \frac{2}{3} \cdot \varphi = \frac{2}{3} \times 32^\circ \approx 21,33^\circ$ rispetto all'orizzontale; le intensità delle sue componenti sono:

$$S_{1,x} = S_1 \cdot \cos \varphi_1 = 19,42 \cdot \cos 21^\circ,33 \approx 18,09 \text{ kN}$$

$$S_{1,y} = S_1 \cdot \sin \varphi_1 = 19,42 \cdot \sin 21^\circ,33 \approx 7,06 \text{ kN}$$

Alla componente orizzontale $S_{1,x}$ si applica il coefficiente parziale $\gamma_{G1} = 1,3$ (A_1) ottenendo la spinta di calcolo:

$$S_{x,d} = E_d = S_{1,x} \cdot \gamma_{G1} = 18,09 \times 1,3 \approx 23,52 \text{ kN}$$

2) Azione resistente (favorevole)

Il valore nominale delle forze verticali agenti è uguale al valore di calcolo, in quanto il coefficiente parziale $\gamma_{G1}(A_1)$ da applicare è unitario; si ha quindi:

$$\begin{aligned} P_d &= P_1 + P_2 \text{ (dalla verifica al ribaltamento)} = S_{1,y} \text{ (dalla verifica a scorrimento)} = \\ &= 15,60 + 37,44 + 7,06 = 60,10 \text{ kN} \end{aligned}$$

Con il coefficiente di attrito $f = 0,75$, la forza di attrito vale:

$$F_a = P_d \cdot f = 60,10 \times 0,75 \approx 45,08 \text{ kN}$$

che divisa per il coefficiente parziale per la resistenza $\gamma_R = 1,1$ (R_3) fornisce la resistenza di progetto:

$$R_d = \frac{F_a}{\gamma_R} = \frac{45,08}{1,1} = 40,98 \text{ kN}$$

3) Verifica

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{40,98}{23,52} \approx 1,74 > 1$$

Sezione B-B'

1) Spinta di calcolo $S_{x,d} = E_d$ (favorevole)

Con il procedimento grafico di Poncelet si sono ricavate le lunghezze dei segmenti $y = 1,80$ m e $p = 1,65$ m; la spinta risulta:

$$S_2 = \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot y \cdot p = \frac{1}{2} \times 18,00 \times 1,80 \times 1,65 \approx 26,73 \text{ kN}$$

inclinata dell'angolo $\varphi_1 \approx 21^\circ,33$ sull'orizzontale, e le sue componenti sono:

$$S_{2,x} = S_2 \cdot \cos \varphi_1 = 26,73 \cdot \cos 21^\circ,33 \approx 24,90 \text{ kN}$$

$$S_{2,y} = S_2 \cdot \sin \varphi_1 = 26,73 \cdot \sin 21^\circ,33 \approx 9,72 \text{ kN}$$

Spinta di calcolo:

$$S_{x,d} = E_d = S_{2,x} \cdot \gamma_{G1} = 24,90 \times 1,3 \approx 32,37 \text{ kN}$$

2) Azione resistente (favorevole)

Essendo il coefficiente parziale $\gamma_{G1}(A_1)$ unitario, il valore nominale delle forze verticali agenti coincide con quello di calcolo; si ha quindi:

$$\begin{aligned} P_d &= P_1 + P_2 + P_3 \text{ (dalla verifica al ribaltamento)} + S_{2,y} \text{ (dalla verifica a scorrimento)} = \\ &= 15,60 + 37,44 + 12,96 + 9,72 = 75,72 \text{ kN} \end{aligned}$$

Assumendo il coefficiente di attrito $f = 0,65$, la forza di attrito risulta:

$$F_a = f \cdot P_d = 0,65 \times 75,72 \approx 49,22 \text{ kN}$$

per cui la resistenza di progetto vale:

$$R_d = \frac{F_a}{\gamma_R} = \frac{49,22}{1,1} \approx 44,75 \text{ kN}$$

3) Verifica

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{44,75}{32,37} \approx 1,38 > 1$$

Verifica a schiacciamento

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

Il valore della spinta di calcolo è uguale a quello calcolato per la verifica a scorrimento, in quanto si devono applicare gli stessi coefficienti parziali $\gamma_M = 1$ (M_1) ai valori dei parametri geotecnici e $\gamma_{G1} = 1,3$ (A_1) al valore caratteristico della componente orizzontale della spinta.

Sezione A-A'

1) Momento spingente di calcolo M_{Sd}

Dalla verifica a scorrimento si ricava il valore di calcolo della spinta $S_{x,d} = 23,52$ kN con braccio $d_s \approx 0,87$ m, per cui il momento spingente di calcolo risulta:

$$M_{Sd} = 23,52 \times 0,87 \approx 20,46 \text{ kN m}$$

2) Momento resistente di calcolo M_{Rd}

Viene applicato il coefficiente parziale $\gamma_{G1} = 1,3$ (A_1) ai pesi nominali del muro, calcolati per la verifica al ribaltamento, e alla componente verticale $S_{1,y}$ della spinta, calcolata per la verifica a scorrimento, con i relativi bracci:

$P_{1,d} = 15,60 \times 1,3 =$	20,28 kN
$P_{2,d} = 37,44 \times 1,3 \approx$	48,67 kN
$S_{y,d} = 7,06 \times 1,3 \approx$	9,18 kN
	$P_d = E_d = 78,13 \text{ kN}$

$$M_{Rd} = 20,28 \times 0,33 + 48,67 \times 0,80 + 9,18 \times 1,10 \approx 55,73 \text{ kN m}$$

3) Calcolo dell'eccentricità

$$u = \frac{M_{Rd} - M_{Sd}}{P_d} = \frac{55,73 - 20,46}{78,13} \approx 0,45 \text{ m}$$

$$e = \frac{B_1}{2} - u = \frac{1,10}{2} - 0,45 \approx 0,10 \text{ m}$$

4) Verifica

Impiegando per il muro di sostegno calcestruzzo non armato, le N.T.C. 2008 prescrivono di effettuare la verifica sotto la combinazione rara ($F_d = G_1 + G_2 + Q_{k1}$), controllando che la tensione massima di compressione del calcestruzzo risulti al massimo $\sigma_c = 0,25 \cdot f_{cd}$.

Impiegando calcestruzzo classe C16/20, la resistenza di calcolo risulta:

$$f_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{1,5} = \frac{0,85 \times 16}{1,5} \approx 9,07 \text{ N/mm}^2$$

e quindi:

$$\sigma_c = 0,25 \times 9,07 \approx 2,27 \text{ N/mm}^2$$

La sezione A-A' è sollecitata a presso-flessione dal carico eccentrico $P_d = 78,13 \text{ kN}$ che determina la tensione massima:

$$\sigma_{c,\max} = \frac{P_d}{A} \cdot \left(-1 - \frac{6 \cdot e}{B_1} \right) = \frac{78,13 \times 10^3}{(1,10 \times 1,00) \times 10^6} \times \left(-1 - \frac{6 \times 0,10 \times 10^3}{1,10 \times 10^3} \right) \approx 0,11 \text{ N/mm}^2 < \sigma_c$$

Sezione B-B'

Viene effettuata la verifica per carico limite dell'insieme fondazione-terreno.

1) Momento spingente di calcolo M_{Sd}

Dalla verifica a scorrimento si ricava il valore della spinta di calcolo $S_{x,d} = 32,37 \text{ kN}$ con braccio $d_s = 1,00 \text{ m}$, per cui si ha:

$$M_{Sd} = 32,37 \times 1,00 = 32,37 \text{ kN m}$$

2) Momento resistente di calcolo M_{Rd}

Dalla verifica al ribaltamento si ricavano i valori nominali dei pesi del muro P_1, P_2, P_3 e dalla verifica a scorrimento quello della componente verticale $S_{2,y}$ della spinta; a questi valori viene applicato il coefficiente parziale $\gamma_{G1} = 1,3$ (A_1) per ottenere i valori di calcolo:

$P_{1,d} = 15,60 \times 1,3 =$	20,28 kN
$P_{2,d} = 37,44 \times 1,3 =$	48,67 kN
$P_{3,d} = 12,96 \times 1,3 =$	16,85 kN
$S_{y,d} = 9,72 \times 1,3 =$	12,64 kN
$P_d = E_d = 98,44 \text{ kN}$	

Bracci rispetto al punto B:

$$d_1 = 0,58 \text{ m} \quad d_2 = 1,05 \text{ m} \quad d_3 = 0,675 \text{ m} \quad d_s = 1,35 \text{ m}$$

3) Calcolo dell'eccentricità

$$u = \frac{M_{Rd} - M_{Sd}}{P_d} = \frac{91,30 - 32,37}{98,44} \approx 0,60 \text{ m}$$

$$e = \frac{B}{2} - u = \frac{1,35}{2} - 0,60 = 0,08 \text{ m} = 80 \text{ mm}$$

4) Calcolo del carico limite del terreno

La risultante delle forze agenti è inclinata ed eccentrica, per cui viene utilizzata la formula di Brinch-Hansen, non considerando la coesione del terreno:

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

dove:

- $D = 0,40$ m: profondità del piano di posa della fondazione
- $B^* = B - 2 \cdot e = 1,35 - 2 \times 0,08 = 1,10$ m: larghezza equivalente per carico eccentrico
- fattori di capacità portante: $N_q = 23,18$; $N_\gamma = 20,79$
- coefficienti di profondità:

$$d_q = 1 + 2 \cdot \frac{D}{B} \cdot \text{tg } \varphi \cdot (1 - \text{sen } \varphi)^2 = 1 + 2 \times \frac{0,40}{1,35} \cdot \text{tg } 32^\circ \cdot (1 - \text{sen } 32^\circ)^2 \approx 1,082$$

$$d_\gamma = 1$$

- coefficienti di inclinazione:

$$i_q = \left(1 - \frac{S_{x,d}}{P_d} \right)^2 = \left(1 - \frac{32,37}{98,44} \right)^2 \approx 0,451$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{S_{x,d}}{P_d} \right)^3 = \left(1 - \frac{32,37}{98,44} \right)^3 \approx 0,302$$

Sostituendo si ottiene:

$$q_{ult} = (18,00 \times 0,40 \times 23,18 \times 1,082 \times 0,451) + \left(\frac{18,00}{2} \times 1,19 \times 20,79 \times 1 \times 0,302 \right) \approx 148,69 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{ult} = q_{ult} \cdot B^* = 148,69 \times 1,19 \approx 176,94 \text{ kN/m}$$

Questo valore viene diviso per il coefficiente parziale di resistenza $\gamma_R = 1,4$ (R_3) per ottenere il carico limite:

$$Q_{lim} = R_d = \frac{Q_{ult}}{\gamma_R} = \frac{176,94}{1,4} \approx 126,39 \text{ kN/m}$$

5) Verifica

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{126,39}{98,44} \approx 1,28 > 1$$