



## Sezione AB

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

È determinato dalle spinte esercitate dal terrapieno e dal sovraccarico variabile.

I parametri geotecnici vengono trasformati in parametri di calcolo tramite i coefficienti parziali  $\gamma_M$  (Volume 5, pag. 21, tab. 5, colonna  $M_2$ ; riferimento N.T.C.: tab. 6.2.II):

$$\text{– angolo di attrito: } \operatorname{tg} \varphi' = \frac{\operatorname{tg} 35^\circ}{\gamma_\varphi} = \frac{\operatorname{tg} 35^\circ}{1,25} \approx 0,5602 \quad \text{e quindi } \varphi' \approx 29^\circ,26$$

$$\text{– peso per unità di volume del terreno: } \gamma_t = \frac{\gamma_t}{\gamma_\gamma} = \frac{16,00}{1,0} = 16,00 \text{ kN/m}^3$$

*Spinte di calcolo*

– Spinta dovuta al terreno:

$$S_t = \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot h_1^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right) = \frac{1}{2} \times 16,00 \times 3,40^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{29^\circ,26}{2} \right) \approx 31,76 \text{ kN}$$

– Spinta dovuta al sovraccarico variabile:

$$S_q = q \cdot h_1 \cdot \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right) = 10 \times 3,40 \cdot \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{29^\circ,26}{2} \right) \approx 11,68 \text{ kN}$$

Questi valori delle spinte devono essere ampliati moltiplicandoli per i coefficienti parziali  $\gamma_F$  (Volume 5, pag. 21, tab. 4, colonna EQU; riferimento N.T.C.: tab. 6.2.I) per ottenere le spinte di calcolo:

$$S_{t,d} = S_t \cdot \gamma_{G1} = 31,76 \times 1,1 \approx 34,94 \text{ kN}$$

$$S_{q,d} = S_q \cdot \gamma_Q = 11,68 \times 1,5 \approx 17,52 \text{ kN}$$

Distanze di applicazione dal punto A:

$$d_t = \frac{h_1}{3} = \frac{3,40}{3} \approx 1,13 \text{ m} \quad d_q = \frac{h_1}{2} = \frac{3,40}{2} \approx 1,70 \text{ m}$$

– Momento spingente di calcolo

$$M_{sd} = E_d = S_{t,d} \cdot d_t + S_{q,d} \cdot d_q = 34,94 \times 1,13 + 17,52 \times 1,70 \approx 69,27 \text{ kN m}$$

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

È determinato dal peso del muro.

$$P_1 = \left( \frac{1}{2} \times 0,70 \times 3,40 \times 1,00 \right) \text{ m}^3 \cdot 24 \text{ kN/m}^3 = 28,56 \text{ kN}$$

$$P_2 = (0,75 \times 3,40 \times 1,00) \text{ m}^3 \cdot 24 \text{ kN/m}^3 = 61,20 \text{ kN}$$

$$P_m = 89,76 \text{ kN}$$

Le intensità di questi pesi nominali devono essere ridotte moltiplicandole per il coefficiente parziale  $\gamma_{G1} = 0,9$  (colonna EQU, tab. 4) per ottenere i pesi di calcolo:

$$P_{1,d} = P_1 \cdot \gamma_{G1} = 28,56 \times 0,9 \approx 25,70 \text{ kN}$$

$$P_{2,d} = P_2 \cdot \gamma_{G1} = 61,20 \times 0,9 \approx 55,08 \text{ kN}$$

$$P_{m,d} = 80,78 \text{ kN}$$

Distanze di applicazione dal punto A:

$$d_1 = \frac{2}{3} \times 0,70 \approx 0,47 \text{ m} \quad d_2 = \frac{0,75}{2} + 0,70 \approx 1,075 \text{ m}$$

Momento resistente di calcolo  $M_{R,d}$ :

$$M_{R,d} = E_d = P_{1,d} \cdot d_1 + P_{2,d} \cdot d_2 = 25,70 \times 0,47 + 55,08 \times 1,075 = 71,29 \text{ kN m}$$

### 3) Verifica

Il momento resistente  $M_{R,d}$  viene diviso per il coefficiente parziale di riduzione della resistenza  $\gamma_R = 1,0$  (colonna  $R_2$  della tabella che segue) per ottenere il valore di progetto della resistenza  $R_d$ ; per la verifica si effettua il rapporto:

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{\gamma_R}{M_{Sd}} = \frac{71,29}{69,27} \approx 1,03 > 1 \quad \text{Verificato}$$

Coefficienti parziali  $\gamma_R$  per le verifiche agli S.L.U. STR e GEO dei muri di sostegno (Tabella 6.5.1 delle Norme)

Verifica	Coefficiente parziale $R_1$	Coefficiente parziale $R_2$	Coefficiente parziale $R_3$
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,4$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,1$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,4$

### Sezione CD

I parametri geotecnici di calcolo sono uguali a quelli applicati per la sezione AB.

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

– Spinta dovuta al terreno:

$$S_t = \frac{1}{2} \times 16,00 \times 4,00^2 \cdot \text{tg}^2\left(45^\circ - \frac{29^\circ,26}{2}\right) \approx 43,95 \text{ kN}$$

– Spinta dovuta al sovraccarico variabile:

$$S_q = 10 \times 4 \cdot \text{tg}^2\left(45^\circ - \frac{29^\circ,26}{2}\right) \approx 13,74 \text{ kN}$$

– Spinte di calcolo:

$$S_{t,d} = S_t \cdot \gamma_{G1} = 43,95 \times 1,1 \approx 48,35 \text{ kN}$$

$$S_{q,d} = S_q \cdot \gamma_Q = 13,74 \times 1,5 \approx 20,61 \text{ kN}$$

Distanze di applicazione dal punto C:

$$d_t = \frac{h}{3} = \frac{4,00}{3} \approx 1,33 \text{ m} \quad d_q = \frac{h}{2} = \frac{4,00}{2} \approx 2,00 \text{ m}$$

Momento spingente di calcolo  $M_{Sd}$ :

$$M_{Sd} = E_d = S_{t,d} \cdot d_t + S_{q,d} \cdot d_q = 48,35 \times 1,33 + 20,61 \times 2,00 = 105,53 \text{ kN m}$$

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

Peso di calcolo del muro

$$\begin{array}{rcl}
 P_{1,d} = P_1 \cdot \gamma_{G1} = & 28,56 \text{ kN} \cdot 0,9 & \approx 25,70 \text{ kN} \\
 P_{2,d} = P_2 \cdot \gamma_{G1} = & 61,20 \text{ kN} \cdot 0,9 & \approx 55,08 \text{ kN} \\
 P_{3,d} = P_3 \cdot \gamma_{G1} = (1,80 \times 0,60 \times 1,00) \text{ m}^3 \times 24 \text{ kN/m}^3 = & 25,92 \text{ kN} \cdot 0,9 & \approx 23,33 \text{ kN} \\
 \hline
 & P_m = 115,68 \text{ kN} & P_{m,d} = 104,11 \text{ kN}
 \end{array}$$

Distanze di applicazione dal punto C:

$$\begin{aligned}
 d_1 &= 0,47 + 0,35 = 0,82 \text{ m} \\
 d_2 &= 1,075 + 0,35 = 1,425 \text{ m} \\
 d_3 &= \frac{1,80}{3} = 0,90 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Momento resistente di calcolo:

$$M_{Rd} = R_d = P_{1,d} \cdot d_1 + P_{2,d} \cdot d_2 + P_{3,d} \cdot d_3 = 25,70 \times 0,82 + 55,08 \times 1,425 + 23,33 \times 0,90 = 120,56 \text{ kNm}$$

## 3) Verifica:

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{\frac{M_{Rd}}{\gamma_R}}{M_{Sd}} = \frac{120,56}{105,53} \approx 1,14 > 1 \quad \text{Verificato}$$

## Verifica allo scorrimento sul piano di posa

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

I parametri geotecnici di calcolo sono uguali a quelli caratteristici ( $\varphi = 35^\circ$  e  $\gamma_t = 16,00 \text{ kN/m}^3$ ) in quanto il coefficiente parziale da applicare è  $\gamma_M = 1,0$  (colonna  $M_1$ , tab. 5).

### Sezione AB

#### 1) Spinta di calcolo $S_d = E_d$ (sfavorevole)

– Spinta dovuta al terreno:

$$S_t = \frac{1}{2} \times 16,00 \times 3,40^2 \cdot \text{tg}^2\left(45^\circ - \frac{35^\circ}{2}\right) \approx 25,06 \text{ kN}$$

– Spinta dovuta al sovraccarico variabile:

$$S_q = \frac{1}{2} \times 10 \times 3,40 \cdot \text{tg}^2\left(45^\circ - \frac{35^\circ}{2}\right) \approx 9,21 \text{ kN}$$

Questi valori devono essere moltiplicati per i coefficienti parziali  $\gamma_F$  in colonna  $A_1$  della tabella 4, ottenendo le spinte di calcolo.

$$\begin{array}{rcl}
 S_{t,d} = S_t \cdot \gamma_{G1} = 25,06 \times 1,3 \approx & & 32,58 \text{ kN} \\
 S_{q,d} = S_q \cdot \gamma_{G1} = 9,21 \times 1,5 \approx & & 13,82 \text{ kN} \\
 \hline
 \text{Spinta totale di calcolo} & & S_d = E_d = 46,40 \text{ kN}
 \end{array}$$

## 2) Azione resistente (favorevole)

È dovuta alla forza di attrito che si sviluppa a livello della sezione  $AB$  e dipende dal peso del muro che deve essere moltiplicato per il coefficiente parziale  $\gamma_{G1} = 1,0$  (colonna  $A_1$  – tab. 4).

Peso di calcolo del muro (vedi verifica al ribaltamento):

$$P_{m,d} = P_m \cdot \gamma_{G1} = 89,76 \times 1,0 \approx 89,76 \text{ kN}$$

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

$$F_a = P_{m,d} \cdot f = 89,76 \times 0,75 \approx 67,32 \text{ kN}$$

## 3) Verifica

La forza di attrito  $F_a$  deve essere divisa per il coefficiente parziale per la resistenza  $\gamma_R = 1,1$  (colonna  $R_3$  della tabella prima riportata) e si effettua il rapporto:

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{f \cdot P_{m,d}}{S_d} = \frac{67,32}{46,40} \approx 1,32 > 1 \quad \text{Verificato}$$

## Sezione $CD$

### 1) Spinta di calcolo $S_d = E_d$ (sfavorevole)

– Spinta dovuta al terreno:

$$S_t = \frac{1}{2} \times 16,00 \times 4,00^2 \cdot \text{tg}^2\left(45^\circ - \frac{35^\circ}{2}\right) \approx 34,69 \text{ kN}$$

– Spinta dovuta al sovraccarico variabile:

$$S_q = 10 \times 4,00 \cdot \text{tg}^2\left(45^\circ - \frac{35^\circ}{2}\right) \approx 10,84 \text{ kN}$$

Applicando i coefficienti parziali  $\gamma_R$ , la spinta totale di calcolo  $S_d$  risulta:

$$\begin{array}{r} S_{t,d} = S_t \cdot \gamma_{G1} = 34,69 \times 1,3 \approx 45,10 \text{ kN} \\ S_{q,d} = S_q \cdot \gamma_{G1} = 10,84 \times 1,5 \approx 16,26 \text{ kN} \\ \hline S_d = 61,36 \text{ kN} \end{array}$$

### 2) Azione resistente (favorevole)

È dovuta alla forza di attrito che si ha tra la fondazione e il terreno; dipende dal peso del muro e dal coefficiente di attrito.

Peso di calcolo del muro (vedi verifica al ribaltamento):

$$P_{m,d} = P_m \cdot \gamma_{G1} = 115,68 \times 1,0 \approx 115,68 \text{ kN}$$

Forza di attrito:

$$\text{coefficiente di attrito } f = \text{tg } \varphi = \text{tg } 35^\circ \approx 0,70$$

$$\text{in favore della sicurezza si assume } f = 0,65$$

$$F_a = f \cdot P_{m,d} = 0,65 \times 115,68 \approx 75,19 \text{ kN}$$

### 3) Verifica

Applicando il coefficiente parziale per la resistenza  $\gamma_R = 1,1$  (colonna  $R_3$ ) si ha:

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{f \cdot P_{m,d}}{S_d} = \frac{75,19}{61,36} \approx 1,114 > 1 \quad \text{Verificato}$$

### Verifica al collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno

Considerando la sezione  $CD$ , l'azione sul terreno è rappresentata dalla componente verticale della risultante dei carichi trasmessi dalla fondazione.

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

#### 1) Momento spingente di calcolo $M_{Sd}$ (sfavorevole)

*Spinte di calcolo*

I coefficienti parziali  $\gamma_M$  per i parametri geotecnici del terreno sono tutti uguali all'unità (colonna  $M_1$ , tab. 5) e quelli da applicare alle spinte sono  $\gamma_{G1} = 1,3$  e  $\gamma_Q = 1,5$  (colonna  $A_1$ , tab. 4), per cui i valori delle spinte di calcolo sono quelli già calcolati per la verifica a scorrimento e valgono:

$$S_{t,d} = 45,10 \text{ kN} \quad S_{q,d} = 16,26 \text{ kN}$$

e i relativi bracci rispetto al punto  $C$  sono:

$$d_t = 1,33 \text{ m} \quad d_q = 2,00 \text{ m}$$

Il momento spingente di calcolo risulta:

$$M_{Sd} = 45,10 \times 1,33 + 16,26 \times 2,00 = 92,50 \text{ kN m}$$

#### 2) Momento resistente di calcolo $M_{Rd}$ (sfavorevole)

I pesi del muro, già calcolati per la verifica al ribaltamento, devono essere moltiplicati per i coefficienti parziali  $\gamma_F$  (colonna  $A_1$ , tab. 4).

$$\begin{array}{r} P_{1,d} = P_1 \cdot \gamma_{G1} = 28,56 \times 1,3 \quad \approx 37,13 \text{ kN} \\ P_{2,d} = P_2 \cdot \gamma_{G1} = 61,20 \times 1,3 \quad \approx 79,56 \text{ kN} \\ P_{3,d} = P_3 \cdot \gamma_{G1} = 25,92 \times 1,3 \quad \approx 33,70 \text{ kN} \\ \hline \text{Peso di calcolo del muro} \quad P_{m,d} = E_d = 150,39 \text{ kN} \end{array}$$

Bracci rispetto al punto  $C$ :

$$d_1 = 0,82 \text{ m} \quad d_2 = 1,425 \text{ m} \quad d_3 = 0,90 \text{ m}$$

Il momento resistente di calcolo risulta:

$$M_{Rd} = P_{1,d} \cdot d_1 + P_{2,d} \cdot d_2 + P_{3,d} \cdot d_3 = 37,13 \times 0,82 + 79,56 \times 1,425 + 33,70 \times 0,90 = 174,15 \text{ kN m}$$

#### 3) Calcolo dell'eccentricità

$$u = \frac{M_{Rd} - M_{Sd}}{P_{m,d}} = \frac{174,15 - 92,50}{150,39} \approx 0,54 \text{ m}$$

$$e = \frac{B}{2} - u = \frac{1,80}{2} - 0,54 \approx 0,36 \text{ m}$$

#### 4) Calcolo del carico limite del terreno

Essendo la risultante delle forze agenti eccentrica e inclinata, il carico unitario ultimo deve essere calcolato con la formula di Brinch-Hansen, analoga a quella di Terzaghi, ma che contiene dei coefficienti correttivi per considerare la posizione della risultante e la profondità del piano di posa della fondazione; l'espressione generale della formula è:

$$q_{ult} = (c \cdot N_c \cdot d_c \cdot i_c) + \gamma_t \cdot D \cdot N_q \cdot d_q \cdot i_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot B^* \cdot N_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma$$

dove:

- il prodotto in parentesi è nullo in quanto si considera la coesione  $c = 0$ ;
- $D = 0,70$  m = profondità del piano di posa rispetto alla superficie del terreno;
- $B^* = B - 2 \cdot e = 1,80 - 2 \cdot 0,36 = 1,08$  m = larghezza equivalente per carico eccentrico.
- fattori di capacità portante:

$$N_q = \frac{1 + \operatorname{sen} \varphi}{1 - \operatorname{sen} \varphi} \cdot e^{\pi \cdot \operatorname{tg} \varphi} = \frac{1 + \operatorname{sen} 35^\circ}{1 - \operatorname{sen} 35^\circ} \cdot 2,71828^{\pi \cdot \operatorname{tg} 35^\circ} \approx 33,30$$

$$N_\gamma = 1,5 \cdot (N_q - 1) \cdot \operatorname{tg} \varphi = 1,5 \times (33,30 - 1) \cdot \operatorname{tg} 35^\circ \approx 33,93$$

- coefficienti di profondità:

$$d_q = 1 + 2 \cdot \frac{D}{B} \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot (1 - \operatorname{sen} \varphi)^2 = 1 + 2 \times \frac{0,70}{0,80} \cdot \operatorname{tg} 35^\circ \cdot (1 - \operatorname{sen} 35^\circ)^2 \approx 1,099$$

$$d_\gamma = 1$$

- coefficienti di inclinazione:

$$i_q = \left( 1 - \frac{S_{t,d} + S_{q,d}}{E_d} \right)^2 = \left( 1 - \frac{45,10 + 16,26}{150,39} \right)^2 \approx 0,351$$

$$i_\gamma = \left( 1 - \frac{S_{t,d} + S_{q,d}}{E_d} \right)^3 = \left( 1 - \frac{45,10 + 16,26}{150,39} \right)^3 \approx 0,208$$

Sostituendo si ottiene:

$$q_{ult} = (16,00 \times 0,70 \times 33,30 \times 1,099 \times 0,351) + \left( \frac{1}{2} \times 16,00 \times 1,08 \times 33,93 \times 1 \times 0,208 \right) \approx 204,85 \text{ kN/m}^2$$

che si pensa distribuito sulla larghezza equivalente  $B^*$ :

$$Q_{lim} = q_{ult} \cdot B^* = 204,85 \times 1,08 \approx 221,24 \text{ kN/m}$$

Il valore ottenuto deve essere diviso per il coefficiente parziale della resistenza  $\gamma_R = 1,4$  (colonna  $R_3$ ) per ottenere il carico resistente limite:

$$Q_{lim} = R_d = \frac{Q_{ult}}{\gamma_R} = \frac{221,24}{1,4} \approx 158,03 \text{ kN/m}$$

#### 5) Verifica

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{Q_{lim}}{P_{m,d}} = \frac{158,03}{150,39} \approx 1,05 > 1 \quad \text{Verificato}$$