

PROGETTO DEI MURI DI SOSTEGNO

DATI

Angolo di attrito del terreno: φ

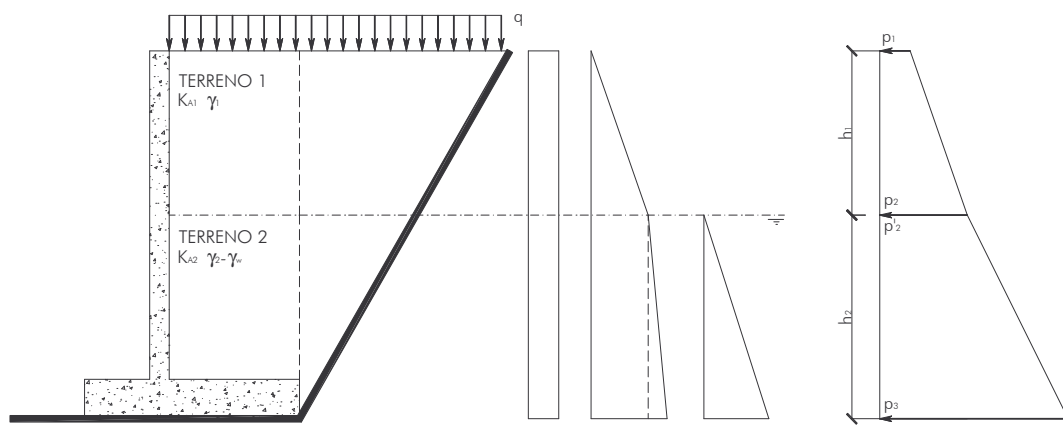
Angolo di attrito terreno muro: $\delta = \frac{2}{3} \cdot \varphi$

Peso specifico del terreno: γ_T

Peso specifico del calcestruzzo: γ_{CLS}

Peso specifico dell'acqua: γ_w

1) Pressioni a tergo del muro



Coefficiente di spinta attiva (Rankine):

$$K_A = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$$

Pressione al punto 1:

$$p_1 = q \cdot K_{A,1}$$

Pressione al punto 2:

$$p_2 = (q + \gamma_1 \cdot h_1) \cdot K_{A,1}$$

Pressione al punto 2':

$$p'_2 = (q + \gamma_1 \cdot h_1) \cdot K_{A,2}$$

Pressione al punto 3:

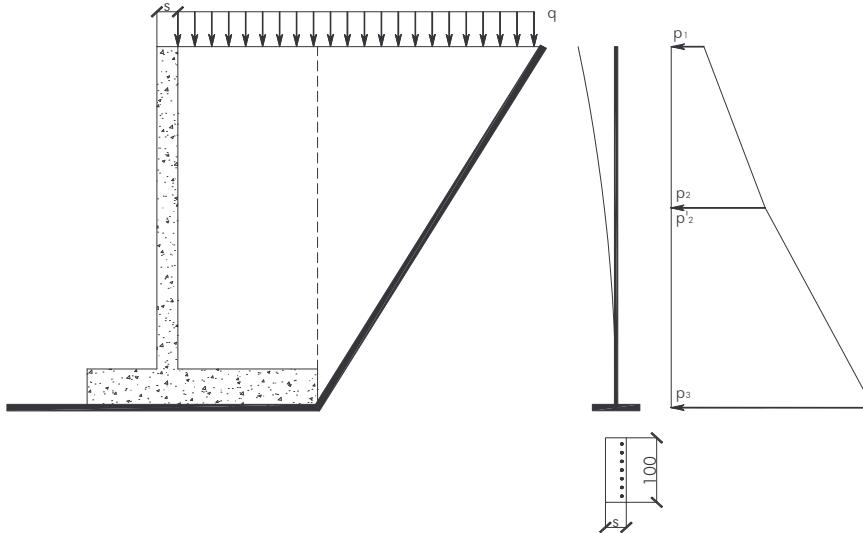
$$p_3 = (q + \gamma_1 \cdot h_1 + [\gamma_2 - \gamma_w] \cdot h_2) \cdot K_{A,2} + \gamma_w \cdot h_2$$

Spinta del terreno per unità di lunghezza:

$$S = \int_{h_i}^{h_f} p(z) \cdot dz$$

2) Progetto delle armature del paramento

Il progetto della armature a momento negativo si conduce modellando il paramento come una mensola di larghezza unitaria, incastrata al piede e caricata con le pressioni laterali del terreno a tergo:

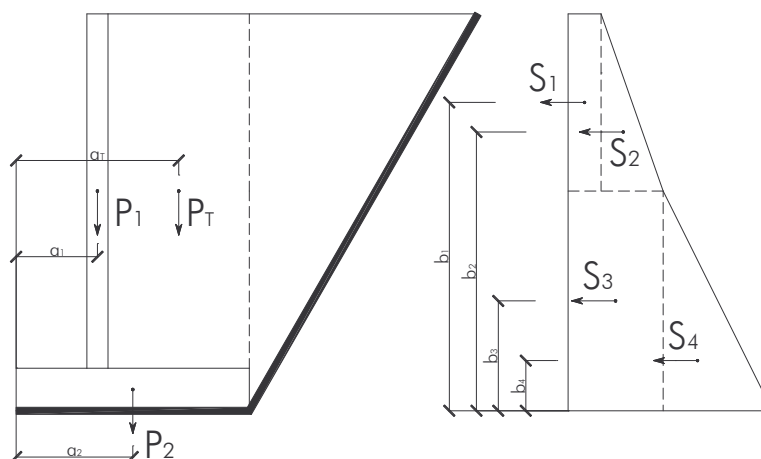


Quantitativo d'armatura:
$$A_s \cong \frac{M_{sd}}{0.9 \cdot d \cdot f_{sd}}$$

Equilibrio alla traslazione:
$$\beta_0 \cdot x \cdot 100 \cdot f_{cd} - A_s \cdot f_{sd} = 0$$

Equilibrio alla rotazione:
$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{sd} \cdot (d - \kappa_0 \cdot x) > M_{sd}$$

3) Verifiche a ribaltamento e scorrimento



Momento stabilizzante:
$$\begin{cases} M_s = P_1 \cdot a_1 + P_2 \cdot a_2 + P_T \cdot a_T \\ P_i = A_i \cdot \gamma_{CLS} \\ P_T = A_T \cdot \gamma_T \end{cases}$$

Momento ribaltante:
$$M_R = S_1 \cdot b_1 + S_2 \cdot b_2 + S_3 \cdot b_3 + S_4 \cdot b_4$$

Verifica a ribaltamento: $\frac{M_S}{M_R} > 1.5$

Carico stabilizzante: $Q_S = \sum_i P_i \cdot \tan(\delta)$

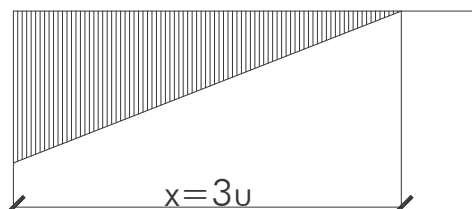
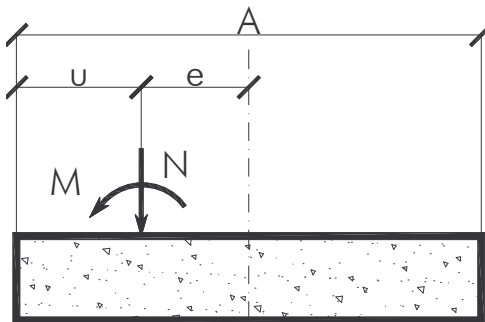
Spinta mobilitante: $Q_R = \sum_i S_i$

Verifica a scorrimento: $\frac{Q_S}{Q_R} > 1.3$

4) Verifica della pressione sul terreno

Capacità portante del terreno:

q_{lim}



Momento sollecitate:

$$M = M_R - M_S$$

Distanza tra il polo e il centro di sollecitazione:

$$u = \frac{M}{\sum_i P_i}$$

Eccentricità del carico:

$$e = \frac{A}{2} - u$$

Se $e > \frac{B}{6}$ →

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot \sum_i P_i}{3 \cdot 100 \cdot u} = \frac{2 \cdot \sum_i P_i}{100 \cdot x}$$

Se $e < \frac{B}{6}$ →

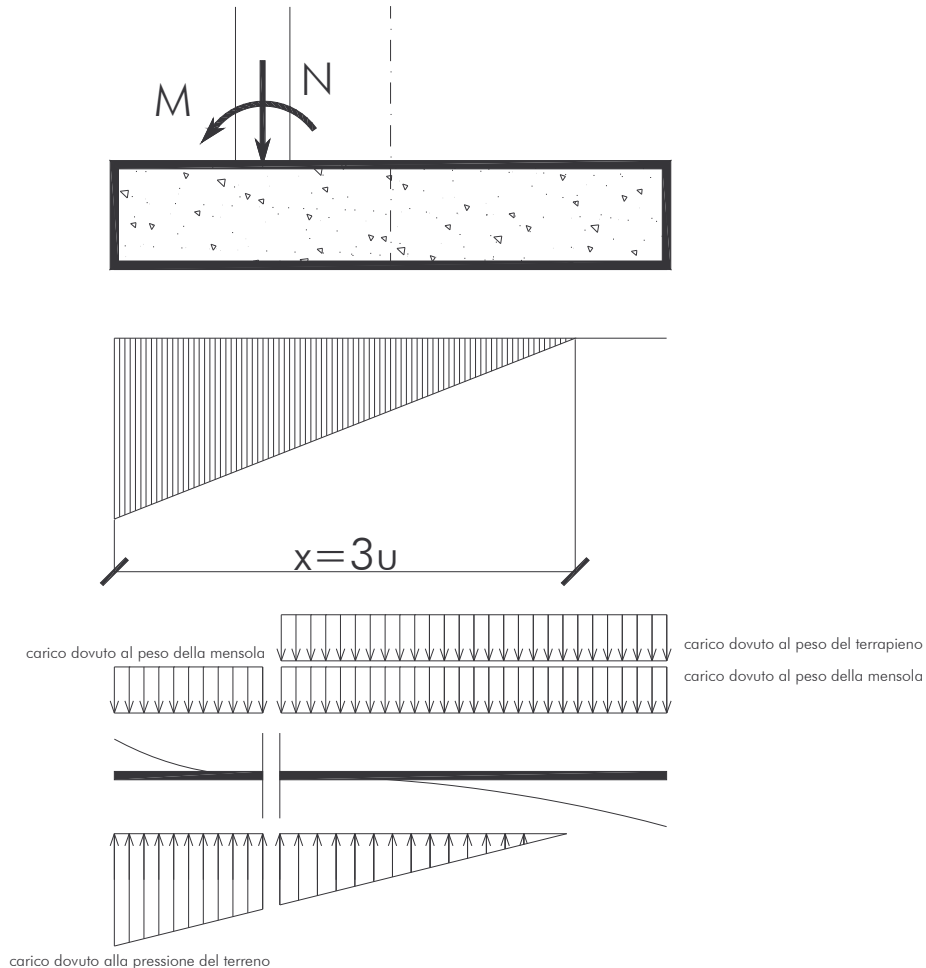
$$\sigma_t = \frac{\sum_i P_i}{A \cdot 100} + \frac{6 \cdot e \cdot \sum_i P_i}{A^2 \cdot 100}$$

Alternativamente si possono calcolare le azioni nel baricentro della fondazione.

5) **Progetto delle armature sullo sbalzo a valle**

Il progetto delle armature dello sbalzo a valle sono condotte assumendo il modello di mensola incastrata al paramento e caricata dalla pressione del terreno all'intradosso e dal carico dovuto al peso dello sbalzo e dell'eventuale terreno di ricoprimento all'estradosso.

Le armature si progettano con i metodi classici della tecnica delle costruzioni.



6) **Progetto delle armature sullo sbalzo a monte**

Analogamente a quanto detto sopra lo sbalzo a tergo del paramento si calcola come una mensola incastrata al muro caricata all'intradosso dalle pressioni del terreno e all'estradosso dal carico dovuto al peso proprio dello sbalzo sommato al carico esercitato dal terrapieno.

ESEMPIO DI PROGETTO DEI MURI DI SOSTEGNO

Progetto di un muro di sostegno "tradizionale" in calcestruzzo armato per contenere la spinta delle terre a tergo di un edificio:

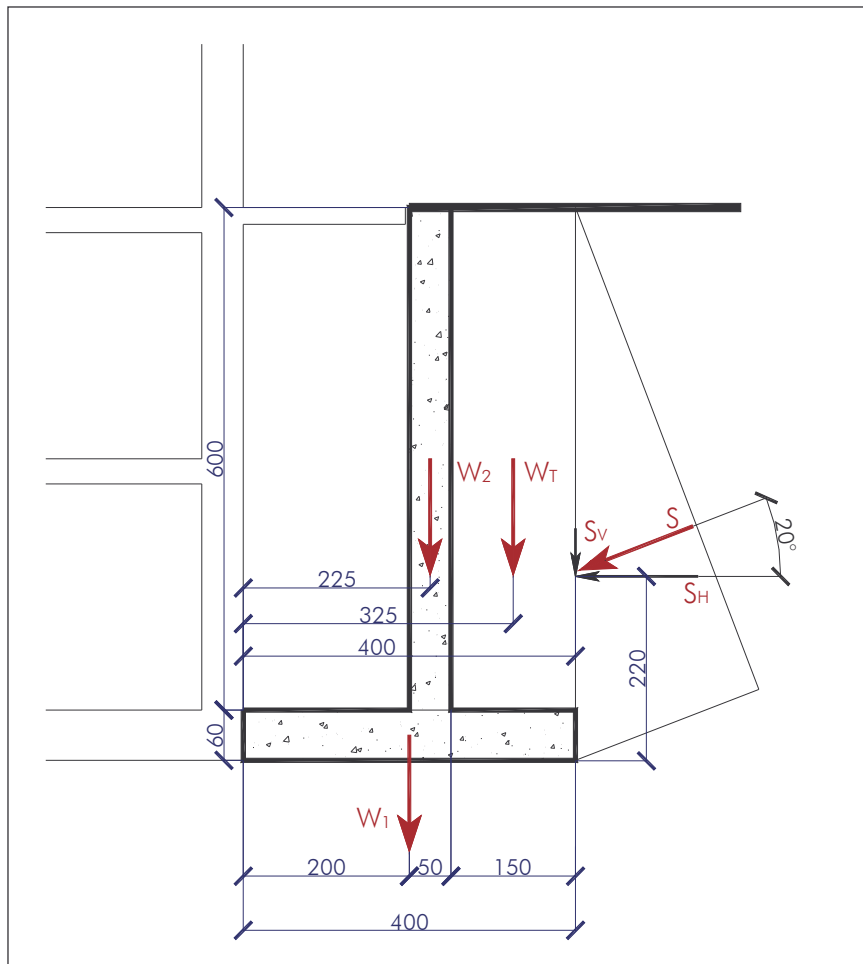
Dati di progetto:

Angolo di attrito interno del terreno: $\varphi = 30^\circ$

Angolo di attrito tra muro e terreno: $\delta \leq \frac{2}{3} \cdot \varphi = 20^\circ$

Peso specifico del terreno: $\gamma_T = 18$ $[kN/m^3]$

Peso specifico del calcestruzzo: $\gamma_{cls} = 25$ $[kN/m^3]$



Si assume che il terreno a tergo del paramento sia a grana grossa per cui incoerente, si assume inoltre l'utilizzo della teoria Coulomb per definire il coefficiente di spinta attiva delle terre:

$$K_A(\varphi; \delta) = K_A(30^\circ; 20^\circ) = 0.297$$

Pressione del terreno

La pressione del terreno varia con legge lineare lungo la parete:

$$p(z) = K_A \cdot \gamma_T \cdot z$$

La pressione esercitata dal terreno a fondo scavo, vale:

$$p(h = 6.60) = 0.297 \cdot 18 \cdot 6.6 = 35.28 \quad [kN/m^2]$$

La pressione orizzontale vale:

$$p_h = p(h) \cdot \cos \delta = 33.156 \quad [kN/m^2]$$

La pressione verticale vale:

$$p_v = p(h) \cdot \sin \delta = 12.066 \quad [kN/m^2]$$

Spinta del terreno

La spinta del terreno si ricava integrando il diagramma delle pressioni ricavato sopra:

$$S = \int_0^h p(z) \cdot dz$$

Spinta orizzontale a metro di paramento:

$$S_h = \frac{1}{2} \cdot K_A \cdot \gamma_T \cdot h^2 \cdot \cos \delta = 109.42 \quad [kN/m]$$

Spinta verticale a metro di paramento:

$$S_v = \frac{1}{2} \cdot K_A \cdot \gamma_T \cdot h^2 \cdot \sin \delta = 39.83 \quad [kN/m]$$

Calcolo del momento ribaltante

Il momento ribaltante viene calcolato rispetto ad un polo O assunto al piede della mensola di fondazione esterna:

$$M_R = S_h \cdot \frac{h}{3}$$

Momento ribaltante a metro di paramento:

$$M_R = 109.42 \cdot 2.2 = 240.724 \quad [kN \cdot m/m]$$

Calcolo del momento stabilizzante

Il momento stabilizzante viene calcolato rispetto ad un polo O assunto al piede della mensola di fondazione esterna:

$$M_S = \sum_i W_{\text{muro},i} \cdot x_{\text{muro},i} + \sum_i W_{\text{terreno},i} \cdot x_{\text{terreno},i} + S_v \cdot x_v$$

Momento stabilizzante a metro di paramento:

$$M_S = (0.6 \cdot 4 \cdot 25) \cdot 2 + (0.5 \cdot 6 \cdot 25) \cdot 2.25 + (1.5 \cdot 6 \cdot 18) \cdot 3.25 + 39.83 \cdot 4 = 974.57 \quad [kN \cdot m/m]$$

Forza normale complessiva

La forza normale complessiva che insiste sulla fondazione vale:

$$N = \sum_i W_{\text{muro},i} + \sum_i W_{\text{terreno},i} + S_v \cdot x_v$$

Forza normale complessiva a metro di paramento:

$$N = (0.6 \cdot 4 \cdot 25) + (0.5 \cdot 6 \cdot 25) + (1.5 \cdot 6 \cdot 18) + 39.83 = 336.83 \quad [kN/m]$$

Verifica a ribaltamento del muro:

La verifica a ribaltamento del muro viene condotta adottando le seguenti ipotesi:

- 1) Coefficiente di sicurezza: $\mu = 1.5$
- 2) Muro assunto come corpo rigido

$$\frac{M_S}{M_R} \geq 1.5$$

Verifica: $\frac{974.570}{240.724} = 4.05$

Verifica a scorrimento del muro:

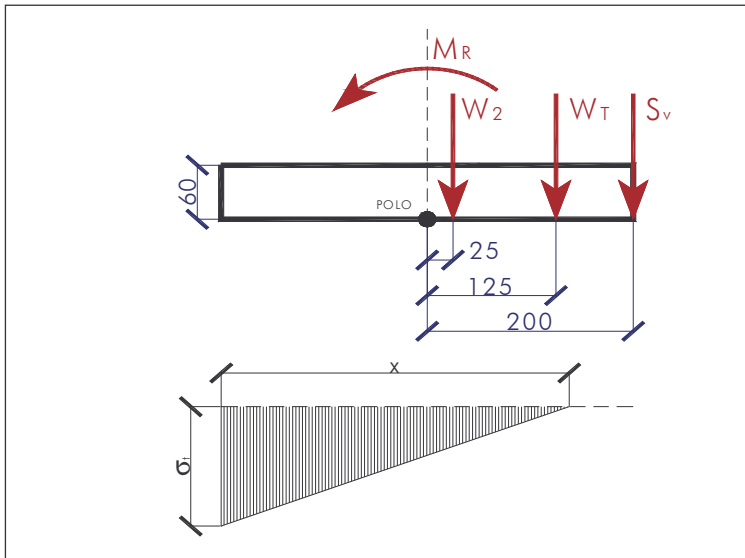
La verifica a scorrimento del muro viene condotta adottando le seguenti ipotesi:

- 3) Coefficiente di sicurezza: $\mu = 1.3$
- 4) Muro assunto come corpo rigido

$$\frac{N \cdot \tan \delta + c_a \cdot \text{base}}{S_h} \geq 1.3$$

Verifica: $\frac{336.83 \cdot \tan(20)}{109.42} = 1.12 < 1.3$ (sarebbe necessario aumentare le dimensioni)

Calcolo delle pressioni esercitate sul terreno - metodo elastico



Assumiamo che il suolo di fondazione non resista a trazione e che la tensione limite sia pari a $\sigma_{t,amm} = 0.15 \text{ [N/mm}^2\text{]}$:

Riduciamo le forze e i momenti al centroide delle masse della fondazione:

Momento ribaltante a metro di paramento:

$$\bar{M}_R = 109.42 \cdot 2.2 = 240.724 \quad [\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}]$$

Momento stabilizzante a metro di paramento:

$$\bar{M}_S = (0.5 \cdot 6 \cdot 25) \cdot 0.25 + (1.5 \cdot 6 \cdot 18) \cdot 1.25 + 39.83 \cdot 2 = 300.91 \quad [\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}]$$

Momento risultante sulla fondazione:

$$M_{\text{fondazione}} = \bar{M}_R - \bar{M}_S = -60.186 \quad [\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}]$$

Forza normale totale agente sulla fondazione:

$$N = (0.6 \cdot 4 \cdot 25) + (0.5 \cdot 6 \cdot 25) + (1.5 \cdot 6 \cdot 18) + 39.83 = 336.83 \quad [\text{kN}/\text{m}]$$

Eccentricità con la quale dovrebbe agire la forza normale per produrre lo stesso momento flettente agente sulla fondazione:

$$e = \frac{M_{\text{fondazione}}}{N} = \frac{60.186}{336.83} = 0.1786 \quad [\text{m}]$$

Calcolo delle coordinate del nocciolo d'inerzia: $\bar{x} = \text{base}/6 = 4/6 = 0.667 \quad [\text{m}]$

Poiché l'eccentricità cade all'interno del nocciolo d'inerzia la sezione non si parzializza e le tensioni sul terreno possono essere calcolate con la teoria di Navier essendo tutte di compressione:

$$\sigma_{t,\max} = \frac{N}{A} + \frac{N \cdot e}{W} = \frac{336.83 \cdot 1000}{4000 \cdot 1000} + \frac{336.83 \cdot 1000 \cdot 178.6}{\frac{1000 \cdot 4000^2}{6}} = 0.084 + 0.0226 = 0.1067 < \sigma_{t,amm}$$
$$\sigma_{t,\min} = \frac{N}{A} - \frac{N \cdot e}{W} = \frac{336.83 \cdot 1000}{4000 \cdot 1000} - \frac{336.83 \cdot 1000 \cdot 178.6}{\frac{1000 \cdot 4000^2}{6}} = 0.084 - 0.0226 = 0.0614 < \sigma_{t,amm}$$

Se la risultante fosse caduta al di fuori del nocciolo d'inerzia la sezione si sarebbe parzializzata e le formule da utilizzare sarebbero state:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{t,\max} = \frac{2 \cdot N}{x \cdot 100} \\ x = 3 \cdot \left(\frac{\text{base}}{2} - e \right) \end{array} \right.$$