

8. Muri di sostegno e NTC 2008

■ Normativa (NTC 2008, par. 5.3.1.1)

Le combinazioni di carico per le azioni sono poste nella forma:

$$F_d = \gamma_{G1} G_1 + \gamma_{G2} G_2 + \gamma_{Q1} Q_1 + \gamma_{Q2} Q_2 + \gamma_{Q3} Q_3 + \dots$$

Le spinte della terra e dell'acqua sono considerate *carichi permanenti strutturali*, di tipo G_1 .

I coefficienti di sicurezza parziali vanno scelti (punto 6.2.3.1) «nell'ambito di due approcci progettuali distinti e alternativi. Nel primo approccio progettuale (Approccio 1), sono previste due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti: la prima combinazione è generalmente più severa nei confronti del dimensionamento strutturale delle opere a contatto con il terreno, mentre la seconda combinazione è generalmente più severa nei riguardi del dimensionamento geotecnico. Nel secondo approccio progettuale (Approccio 2) è prevista un'unica combinazione di gruppi di coefficienti, da adottare sia nelle verifiche strutturali sia nelle verifiche geotecniche».

Per i muri di sostegno, o per altre strutture miste a essi assimilabili, devono essere effettuate le verifiche con riferimento almeno ai seguenti stati limite:

- *SLU di tipo geotecnico (GEO) e di equilibrio di corpo rigido (EQU)*:

- stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno;
- scorrimento sul piano di posa;
- collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno;
- ribaltamento.

- *SLU di tipo strutturale (STR)*:

- raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali.

In ogni caso si deve accertare che sia soddisfatta la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove:

- E_d è il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione;
- R_d è il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

La verifica di stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno deve essere effettuata secondo l'Approccio 1, Combinazione 2 (A2 + M2 + R2), tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle tabelle 6.2.I e 6.2.II per le azioni e i parametri geotecnici.

Le rimanenti verifiche devono essere effettuate secondo almeno uno dei seguenti approcci, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.5.I:

- Approccio 1: Combinazione 1 (A1 + M1 + R1),
Combinazione 2 (A2 + M2 + R2);
- Approccio 2: (A1 + M1 + R3).

Lo stato limite di ribaltamento non prevede la mobilitazione della resistenza del terreno di fondazione e deve essere trattato come uno stato limite di equilibrio di corpo rigido (EQU), utilizzando i coefficienti parziali sulle azioni della tabella 2.6.I e adoperando coefficienti parziali del gruppo (M2) per il calcolo delle spinte.



TABELLA 6.2.I Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

Carichi	Effetto	Coefficiente parziale	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (per esempio i carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

TABELLA 6.2.II Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (SLU)

Parametro	Simbolo	M1	M2
Angolo di attrito	φ	1	1,25
Coesione drenata	c'	1	1,25
Coesione non drenata	c_u	1	1,40
Peso specifico	γ	1	1

TABELLA 6.5.I Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi STR e GEO di muri di sostegno

Verifica	Coefficiente parziale γ_r		
	(R1)	(R2)	(R3)
Capacità portante della fondazione	1,0	1,0	1,4
Scorrimento	1,0	1,0	1,1
Resistenza del terreno a valle	1,0	1,0	1,4

■ Un esempio

Eeguire secondo le prescrizioni delle NTC le verifiche agli stati limite di ribaltamento, di scorrimento e di collasso per carico limite del muro già dimensionato con il metodo delle tensioni ammissibili nel paragrafo 6 (►1).

Si faccia riferimento alla ►FIGURA 1. I parametri caratteristici del terreno sono:

- angolo di attrito interno: $\varphi = 32^\circ$;
- peso specifico del terreno: $\gamma_t = 17 \text{ kN/m}^3$.

Con questi parametri si calcolano i valori caratteristici delle spinte:

$$k_a = \text{tg}^2(45 - 32/2) = 0,307$$

$$S_a(t) = \frac{1}{2} \gamma_t \cdot H^2 \cdot k_a = 41,75 \text{ kN}$$

applicata alla quota $y_1 = H/3 = 4/3 = 1,33 \text{ m}$

$$S_a(q) = q \cdot k_a \cdot H = 10 \cdot 0,307 \cdot 4 = 12,28 \text{ kN}$$

applicata alla quota $y_2 = H/2 = 4/2 = 2,00 \text{ m}$

►1 *Tavilog Titanium*. Entrando nel modulo MURI con l'opzione NTC 2008 il calcolo viene eseguito secondo le prescrizioni di questa normativa.

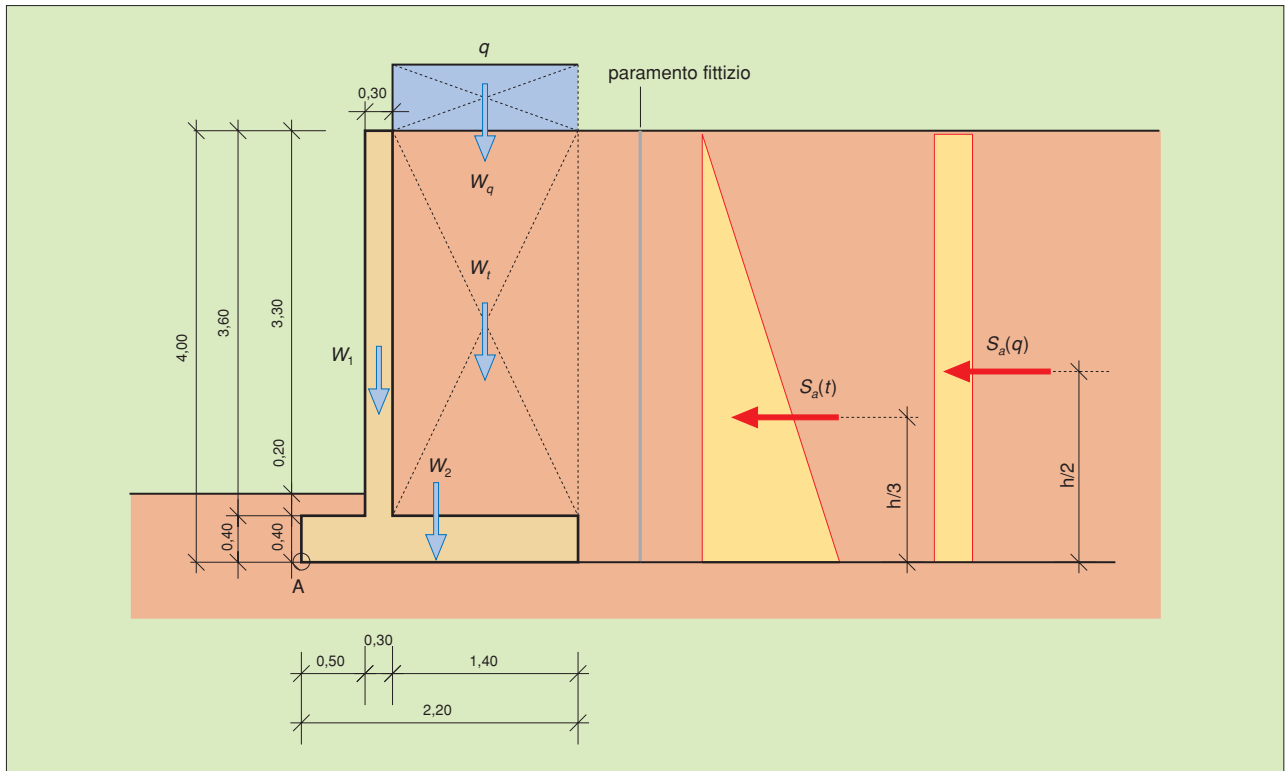


FIGURA 1

I pesi nominali agenti sono:

$$W_1 = 0,30 \cdot 3,60 \cdot 1 \cdot 25 = 27 \text{ kN}$$

$$W_2 = 0,40 \cdot 2,20 \cdot 1 \cdot 25 = 22 \text{ kN}$$

$$W_t = 1,40 \cdot 3,60 \cdot 1 \cdot 17 = 85,68 \text{ kN}$$

$$W_q = 10 \cdot 1 \cdot 1,40 = 14 \text{ kN}$$

Tutti i valori precedenti, caratteristici e nominali, si utilizzano direttamente nelle verifiche con il metodo alle tensioni ammissibili. Procedendo agli stati limite, invece, occorre intervenire sugli stessi valori utilizzando opportuni coefficienti parziali.

■ Verifica allo stato limite di ribaltamento

Secondo la norma, questo stato limite deve essere trattato come uno stato limite di equilibrio di corpo rigido.

Approccio: EQU + M2 + R2

Calcolo dell'azione E_a (momento spingente). I valori caratteristici dei parametri geotecnici vanno corretti utilizzando i coefficienti parziali del gruppo (M2) della tabella 6.2.II. Si ha quindi:

- angolo di attrito interno: $\varphi = 32 / 1,25 = 25,6^\circ$;
- peso specifico del terreno: $\gamma_t = 17 \cdot 1 = 17 \text{ kN/m}^3$

e, di conseguenza:

$$k_a = \operatorname{tg}^2 (45 - 25,6/2) = 0,396$$

$$S(t) = \frac{1}{2} \gamma_i \cdot H^2 \cdot k_a = \frac{1}{2} \cdot 17 \cdot 4^2 \cdot 0,396 = 53,85 \text{ kN}$$

$$S(q) = q \cdot k_a \cdot H = 10 \cdot 0,396 \cdot 4 = 15,84 \text{ kN}$$

Applicando ora i coefficienti parziali della tabella 2.6.I, colonna (EQU), si hanno infine le spinte di calcolo:

$$S_d(t) = 1,1 \cdot S(t) = 1,1 \cdot 53,85 = 59,23 \text{ kN}$$

$$S_d(q) = 1,5 \cdot q \cdot k_a \cdot H = 1,5 \cdot 15,84 = 23,76 \text{ kN}$$

e il momento spingente di calcolo:

$$M_{Sd} = 59,23 \cdot 1,33 + 23,76 \cdot 2 = 126,29 \text{ kNm}$$

Si ha infine:

$$E_d = M_{Sd} = 126,29 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Calcolo della resistenza R_d (momento resistente). Le azioni di calcolo si determinano moltiplicando le azioni nominali per i coefficienti parziali della tabella 2.6.I, colonna (EQU). Quindi:

- i carichi permanenti (favorevoli) W_1 , W_2 e W_t vanno moltiplicati per il coefficiente parziale $\gamma_{G1} = 0,9$;
- il carico variabile W_q (favorevole) va moltiplicato per il coefficiente parziale $\gamma_Q = 0$.

Si ha quindi, riassumendo:

Azioni di calcolo (kN)	Distanze da A (m)	Momenti resistenti (kNm)
$W_{1d} = 27 \cdot 0,9 = 24,30$	0,65	15,80
$W_{2d} = 22 \cdot 0,9 = 19,80$	1,10	21,78
$W_{td} = 85,68 \cdot 0,9 = 77,11$	1,50	115,66
$W_{qd} = 14 \cdot 0 = 0,00$	1,50	0,00
		$M_{Rd} = 153,24$

Ponendo uguale a 1 il coefficiente parziale γ_R riduttore della resistenza, si ha infine:

$$R_d = \frac{M_{Rd}}{\gamma_R} = 153,24 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

La verifica è soddisfatta, essendo:

$$E_d < R_d$$

■ Verifica allo stato limite di scorrimento sul piano di posa

$$\text{Approccio: } A1 + M1 + R3$$

Calcolo dell'azione E_d (componente orizzontale delle forze agenti). I valori di calcolo dei parametri geotecnici coincidono con i corrispondenti valori caratteristici,

perché tutti i coefficienti parziali del gruppo (M1) della tabella 6.2.II hanno valore unitario. Si ha quindi:

- $\varphi = 32^\circ$;
- $\gamma_t = 17 \text{ kN/m}^3$;

e, di conseguenza:

$$S(t) = 41,75 \text{ kN}$$

$$S(q) = 12,28 \text{ kN}$$

Applicando ora i coefficienti parziali della tabella 6.II.1, colonna (A1), si hanno le spinte di calcolo e, infine, la forza orizzontale totale:

$$S_d = 1,3 \cdot 41,75 + 1,5 \cdot 12,28 = 72,69 \text{ kN}$$

che coincide con l'azione di progetto:

$$E_d = 72,69 \text{ kN}$$

Calcolo della resistenza R_d (forza di attrito). Ai pesi nominali agenti:

$$W_1 = 27 \text{ kN}$$

$$W_2 = 22 \text{ kN}$$

$$W_t = 85,68 \text{ kN}$$

$$W_q = 14 \text{ kN}$$

vanno applicati i coefficienti parziali della tabella 2.6.I, colonna (A2), ottenendo i pesi di calcolo:

$$W_{1d} = 27 \cdot 1 = 27 \text{ kN}$$

$$W_{2d} = 22 \cdot 1 = 22 \text{ kN}$$

$$W_{td} = 85,68 \cdot 1 = 85,68 \text{ kN}$$

$$W_{qd} = 14 \cdot 0 = 0$$

e il peso totale:

$$W_d = 134,68 \text{ kN}$$

Ponendo:

- $f = \text{tg } \varphi = \text{tg } 32^\circ = 0,62$;
- $\gamma_R = 1,1$ (tab. 6.5.I, colonna R3);

si ha:

$$R_d = f \frac{W_d}{\gamma_R} = 0,62 \cdot \frac{134,68}{1,1} = 75,9 \text{ kN}$$

La verifica è soddisfatta, essendo:

$$E_d < R_d$$

■ Verifica allo SLU di collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno

Approccio: A1 + M1 + R3

Calcolo dell'azione E_d (componente verticale delle forze agenti). Ai pesi nominali agenti:

$$W_1 = 27 \text{ kN}$$

$$W_2 = 22 \text{ kN}$$

$$W_t = 85,68 \text{ kN}$$

$$W_q = 14 \text{ kN}$$

vanno applicati i coefficienti parziali della tabella 2.6.I, colonna (A1), ottenendo i pesi di calcolo:

$$W_{1d} = 27 \cdot 1,3 = 35,1 \text{ kN}$$

$$W_{2d} = 22 \cdot 1,3 = 28,6 \text{ kN}$$

$$W_{td} = 85,68 \cdot 1,3 = 111,38 \text{ kN}$$

$$W_{qd} = 14 \cdot 1,5 = 21,00 \text{ kN}$$

e quindi il peso totale:

$$W_d = N_d = 196,08 \text{ kN}$$

Si ha quindi

$$E_d = 196,08 \text{ kN}$$

Il momento di questa forza rispetto al punto A , che coincide con il momento resistente, è dato da:

$$M_R = 35,1 \cdot 0,65 + 28,6 \cdot 1,10 + 111,38 \cdot 1,50 + 21,00 \cdot 1,50 = 252,84 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Per trovare l'eccentricità della forza occorre determinare anche il momento spingente M_S . I valori di calcolo dei parametri geotecnici coincidono con i corrispondenti valori caratteristici, perché tutti i coefficienti parziali del gruppo (M1) della tabella 6.2.II hanno valore unitario. Si ha quindi, come nel caso precedente:

$$S(t) = 41,75 \text{ kN}$$

$$S(q) = 12,28 \text{ kN}$$

Tali spinte vanno moltiplicate per i coefficienti parziali della tabella 6.II.1, colonna (A1). Si ha quindi:

$$S_d(t) = 1,3 \cdot 41,75 = 54,27 \text{ kN}$$

$$S_d(q) = 1,5 \cdot 12,28 = 18,42 \text{ kN}$$

Il momento spingente vale:

$$M_S = 54,27 \cdot 1,33 + 18,42 \cdot 2 = 89 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Si ha quindi:

$$c = M_R - \frac{M_S}{N_d} = 252,84 - \frac{89}{196,08} = 0,83 \text{ m}$$

$$e = \frac{B}{2} - c = 1,10 - 0,83 = 0,27 \text{ m}$$

Calcolo dell'azione R_d (capacità portante del terreno). Data l'eccentricità del carico, le norme suggeriscono di utilizzare la formula di Brinch-Hansen, che si differenzia dalla formula di Terzaghi (v. unità E1, volume 1) solo per l'insieme dei coefficienti correttivi posti tra parentesi. In questo caso la formula diventa:

$$q_{lim} = \gamma \cdot D \cdot N_q(d_q i_q) + 0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma(d_\gamma \cdot i_\gamma)$$

dove:

- $\gamma = 1,7 \text{ N/m}^3$ è il peso specifico del terreno;
- $D = 0,60 \text{ m}$ è la profondità del piano di posa della fondazione;
- $B = 2,20 \text{ m}$ è la larghezza della fondazione;
- N_q e N_γ sono coefficienti che si ricavano dalla tabella 4 (unità E1, volume 2) in funzione dell'angolo di attrito φ (si ha, interpolando: $N_q = 23,18$; $N_\gamma = 20,79$);
- i coefficienti d e i tengono conto, rispettivamente, della profondità della fondazione e dell'inclinazione del carico e sono ricavati da formule semiempiriche ⁽¹⁾.

Sostituendo, si ha:

$$q_{lim} = 17 \cdot 0,60 \cdot 23,18 \cdot 1,17 \cdot 0,66 +$$

$$+ 0,5 \cdot 17 \cdot 3 \cdot 20,79 \cdot 0,40 = 182,57 + 212 = 349,57 \text{ N/m}$$

che si immagina distribuito su una larghezza efficace della fondazione pari a

$$B - 2e = 2,20 - 2 \cdot 0,27 = 1,66 \text{ m}$$

Si ha quindi:

$$Q_{lim} = 349,57 \cdot 1,66 = 580 \text{ kN}$$

Il coefficiente parziale $\gamma_R = 1,4$ riduttore della resistenza si ricava dalla tabella 6.5.I, colonna (R3). Si ottiene infine:

$$R_d = \frac{Q_{lim}}{\gamma_R} = \frac{580}{1,4} = 414,28 \text{ kN}$$

La verifica è soddisfatta, essendo:

$$E_d < R_d$$

Il modulo MURI di *Travilog Titanium* valuta le spinte del terreno con il metodo di Coulomb o Rankine, traccia i diagrammi delle sollecitazioni agenti sul muro e sulla fondazione e mostra l'andamento delle pressioni sul terreno. Esegue le verifiche con i metodi EQU e GEO secondo gli approcci 1 e 2 delle NTC 2008 per scorrimento, ribaltamento e collasso del terreno, e con il metodo STR.

⁽¹⁾ Calcolo dei coefficienti di profondità d

$$D/B = 0,60/2,20 = 0,273$$

$$d_q = 1 + 2 \operatorname{tg} 32^\circ (1 - \operatorname{sen} 32^\circ) \cdot$$

$$\cdot 0,273 = 1,17$$

$$d_\gamma = 1$$

Calcolo dei coefficienti di inclinazione i

Componente orizzontale del carico:

$$S = 54,27 + 18,42 = 72,69 \text{ kN}$$

Componente verticale del carico:

$$N = 196,08 \text{ kN}$$

$$S/N = 72,69/196,08 = 0,37$$

$$i_q = (1 - 0,5 \cdot 0,37)^2 = 0,66$$

$$i_\gamma = (1 - 0,7 \cdot 0,37)^3 = 0,40$$