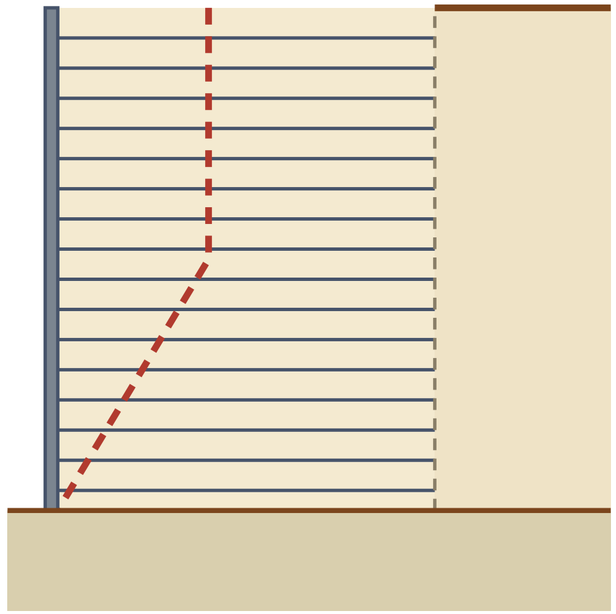
Presentazione didattica di geotecnica · Muri di sostegno

Muro in terra rinforzata (MSE)

Lezione: stabilità interna (rottura, sfilamento), stabilità esterna (ribaltamento, scorrimento, capacità portante) e verifica sismica di un muro in terra rinforzata; per ogni argomento un esempio di calcolo.



Terreno rinforzato

Rottura a trazione · sfilamento

Ribaltamento · scorrimento · capacità portante

Sisma

Introduzione

Che cosa si impara in questa lezione?

La logica del terreno rinforzato: la spinta delle terre induce trazione nel rinforzo e l'attrito tra i due li tiene insieme; il paramento trattiene soltanto il terreno

Stabilità interna: trazione a ogni livello $T = \sigma'_h S_V S_H$, **rottura a trazione** (incluso il margine per corrosione), **sfilamento** (lunghezza efficace dietro la superficie di rottura)

La **superficie di rottura** (bilineare o cuneo di Rankine) e il rapporto K_r/K_a: nel rinforzo rigido la tensione laterale in sommità è maggiore di quella di Rankine

La **stabilità esterna**: il blocco rinforzato L × H si comporta come un muro a gravità; ribaltamento, eccentricità (L/6), scorrimento e capacità portante (larghezza efficace secondo Meyerhof)

Perché il **sovraccarico variabile** produce solo un effetto stabilizzante e l'effetto del **sisma** sul blocco, sulla spinta e sui livelli di armatura

Come correggere un progetto inadeguato: lunghezza del rinforzo, tipo di rinforzo

SVOLGIMENTO DELLA LEZIONE

Ogni argomento è trattato in **tre passaggi**:

1 · **Teoria**: qual è la regola e perché è così?

2 · **Traccia**: dati e richiesto

3 · **Soluzione**: passo per passo, con i numeri

Muro di esempio: H = 10 m, strisce di acciaio zincato 75 × 6 mm (f_y = 240 MPa), L = 7.5 m, S_V = 0.6 m, S_H = 1.0 m; terrapieno γ = 16.5 kN/m³, φ′ = 36°; fondazione φ′ = 28°, c′ = 50 kPa. Le forze sono per metro di muro (per striscia).

Che cosa fa, che cosa si verifica?

TEORIA

Il muro in terra si sostiene da sé solo all'angolo di riposo del terreno. Se nel terrapieno si inseriscono sottili **elementi a trazione** (nastri di acciaio zincato, geotessile, geogriglia), il terreno porta la compressione e il rinforzo porta la trazione, e l'**attrito** tiene insieme i due. Il paramento (pannelli di calcestruzzo, blocchi o l'avvolgimento del rinforzo) trattiene il terreno e non porta altri carichi.

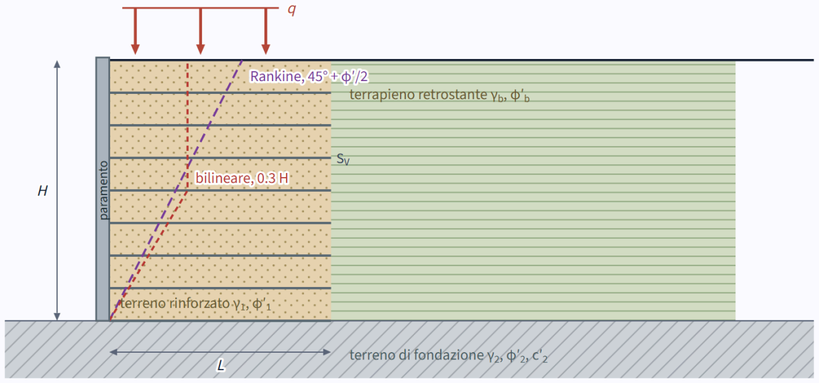
Stabilità interna: ogni livello deve sopportare il tiro (1) senza **rottura a trazione**, (2) senza **sfilamento** da dietro la superficie di rottura, (3) senza **rottura** sul paramento (connessione).

Stabilità esterna: il blocco rinforzato di larghezza L e altezza H è un **muro a gravità**: non deve ribaltarsi sotto la spinta del terrapieno retrostante, non deve scorrere alla base e il terreno di fondazione deve poterlo sopportare.

Sisma: nuovamente i due gruppi di verifiche, con spinta dinamica + blocco e inerzia della zona efficace (i fattori di sicurezza richiesti sono il 75% di quelli statici).

Il **terrapieno** deve essere granulare a drenaggio libero; la **stabilità globale** (superficie di scorrimento passante per la fondazione o superficie di scorrimento composta) è esclusa da questo modulo.

Due metodi: l'approccio di **Rankine** della fonte e il **metodo semplificato** dell'applicazione (FHWA/AASHTO) (il metodo con cui si apre il modulo).



Tensione verticale e laterale, rapporto K_r/K_a

TEORIA

z è la profondità dalla sommità del muro, γ_1, φ'_1 sono il peso dell'unità di volume e l'angolo di attrito del terreno rinforzato. Il terrapieno è in condizioni attive:

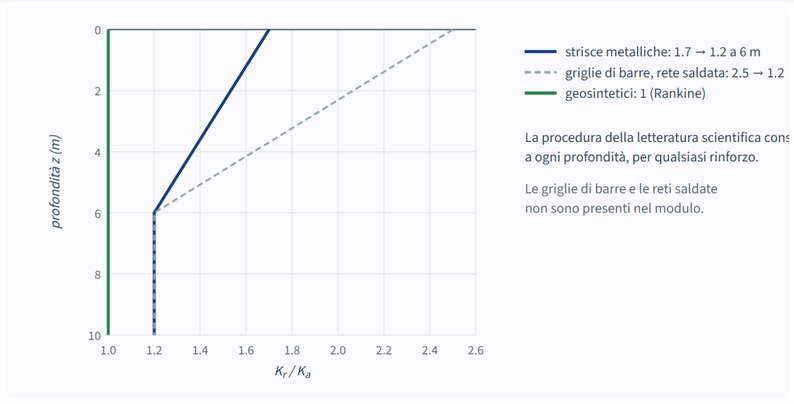
$$\sigma'_v = \gamma_1 z + q_D + q_L \qquad \sigma'_h = K_r\,(\gamma_1 z + q_D + q_L) \qquad K_a = \tan^2\!\left(45^\circ - \frac{\varphi'_1}{2}\right)$$

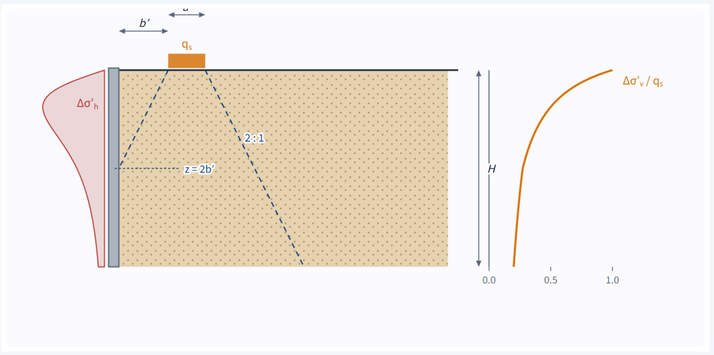
Il rinforzo rigido (ines tensibile) — strisce d'acciaio — mantiene il terrapieno nella parte superiore **più rigido** della condizione di Rankine; nel metodo semplificato K_r/K_a si assume in funzione del tipo di rinforzo:

$$\text{conci: } \frac{K_r}{K_a} = 1.7 - 0.5\frac{z}{6}\ (z \le 6\ \text{m}),\ \ 1.2 \text{ sotto} \qquad \text{geosintetico: } \frac{K_r}{K_a} = 1$$

Un sovraccarico uniforme incrementa la tensione verticale di q a ogni profondità e incrementa anche la tensione laterale tramite K_r. Un sovraccarico **variabile** (q_L) carica ma **non trattiene**: non entra nel peso che si oppone al ribaltamento allo scorrimento né nella tensione verticale che si oppone allo sfilamento (a favore di sicurezza).

Carico a striscia (Laba–Kennedy): la tensione verticale si diffonde secondo 2:1, la spinta laterale è la soluzione elastica per un muro rigido (M = 1.4 → 1).





Traccia

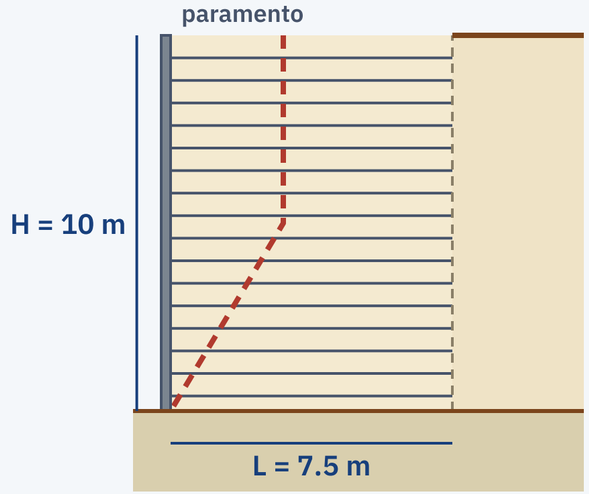
ESEMPIO

RICHIESTO

K_a, K_r/K_a, σ'_v e σ'_h a ogni profondità; dove si ha la massima tensione laterale?

Dati

Terreno di riporto	$\gamma_1 = 16.5\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi'_1 = 36°$**; strisce di acciaio; metodo semplificato; nessun sovraccarico**
Profondità	$z = 0.6;\ 3.0;\ 6.0$ **e** 10.0 **m (base)**



Soluzione

SOLUZIONE

1 Coefficiente attivo

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 18^\circ) = \mathbf{0.2596}$$

2 A ogni profondità ($K_r/K_a = 1.7 - 0.5z/6$, $z \le 6$ m; 1.2 oltre 6 m)

z (m)	$\sigma'_v = 16.5z$ (kPa)	K_r/K_a	K_r	$\sigma'_h = K_r\sigma'_v$ (kPa)
0.6	9.9	1.65	0.4284	4.24
3.0	49.5	1.45	0.3764	18.63
6.0	99.0	1.20	0.3115	30.84
10.0	165.0	1.20	0.3115	51.40

Alla base: σ'_v = **165 kPa**, $K_r = 1.2K_a = 0.3115$, σ'_h = **51.4 kPa**. Al livello superiore (z = 0.6 m) $K_r/K_a = 1.65$: 1.65 volte quello di Rankine. σ'_h aumenta con la profondità; la massima tensione laterale (e di trazione) si ha alla base.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Lunghezza efficace $L_e = L - L_a$

TEORIA

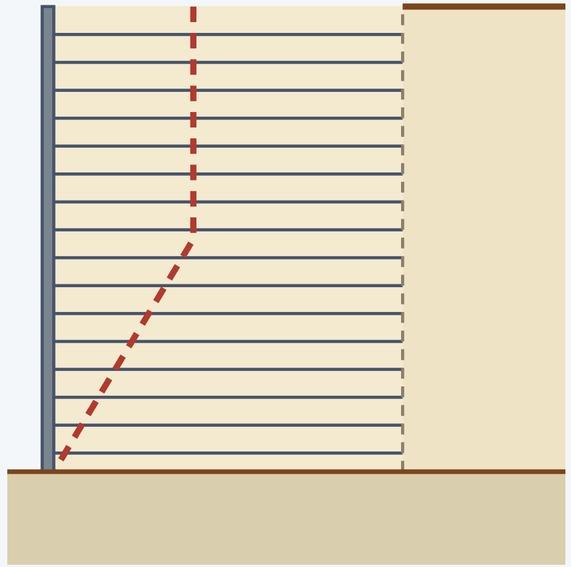
Il rinforzo lavora dove altrimenti il terrapieno collasserebbe. La **parte di ciascun livello compresa nella zona di rottura** (tra il paramento e la superficie di scorrimento) si muove con il terreno che scorre e non trattiene; solo la **parte retrostante la superficie** ancora il livello: lunghezza attiva L_a e lunghezza efficace $L_e = L - L_a$.

Rankine: $L_a = \dfrac{H - z}{\tan(45^\circ + \varphi'_1/2)}$ bilineare: $L_a = 0.3H\ (z \le H/2)$, $L_a = 0.6(H - z)\ (z > H/2)$

La **sorgente** assume per ogni rinforzo il cuneo di Rankine che inizia dall'estremità anteriore ($45° + \varphi'_1/2$ rispetto all'orizzontale): con $\varphi' = 36°$, 5.1 m dal paramento in sommità di un muro di 10 m.

Nel rinforzo rigido (nastro d'acciaio) le misure mostrano la superficie di massima trazione molto più vicina al paramento: la pratica adotta una superficie **bilineare** — verticale a 0.3H dal paramento nella metà superiore, poi rettilinea verso il tallone. Nei geosintetici si conserva Rankine.

Nel metodo semplificato del modulo la striscia d'acciaio assume la superficie bilineare e il geosintetico quella di Rankine; in entrambi i casi il metodo di riferimento è Rankine.



Tratteggiata rossa: superficie di rottura bilineare (striscia). Il cuneo di Rankine inizia a 5.1 m dal paramento.

Traccia

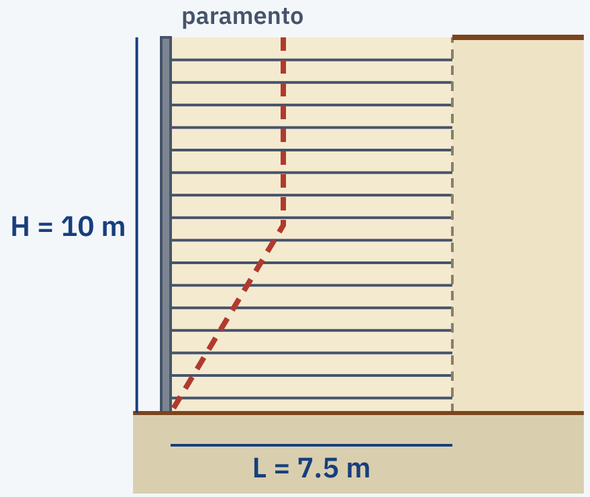
ESEMPIO

RICHIESTO

A ogni profondità $\mathbf{L_a}$ (bilineare e Rankine) e $\mathbf{L_e}$ con la superficie bilineare.

Dati

Muro	$H = 10$ **m,** $L = 7.5$ **m, strisce d'acciaio;** $\varphi'_1 = 36°$
Profondità	$z = 0;\ 0.6;\ 3;\ 5;\ 6;\ 9.4$ **m**



Soluzione

SOLUZIONE

1 Bilineare: per $z \le 5$ m, $0.3H = 3.00$ m; per $z > 5$ m, $0.6(H - z)$. Rankine: $(H - z)/\tan 63° = (H - z)/1.963$

z (m)	L_a bilineare (m)	$L_e = 7.5 - L_a$ (m)	L_a Rankine (m)	L_e Rankine (m)
0.0	3.00	4.50	5.10	2.40
0.6	3.00	4.50	4.79	2.71
3.0	3.00	4.50	3.57	3.93
5.0	3.00	4.50	2.55	4.95
6.0	2.40	5.10	2.04	5.46
9.4	0.36	7.14	0.31	7.19

La superficie bilineare è più vicina al paramento rispetto a Rankine ai livelli superiori ($z = 0.6$ m: $L_a = 3.00$ m, Rankine 4.79 m); pertanto la **lunghezza efficace risulta maggiore** (4.50 m, Rankine 2.71 m). I livelli superiori, a loro volta, sopportano una trazione K_r/K_a volte maggiore (Esempio 4).

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Il livellamento del livello e la capacità portante dell'armatura

TEORIA

Ogni livello porta la tensione laterale del terrapieno entro un'**altezza contribuente** (S_V) limitata, alle mezzeria dei livelli adiacenti. La striscia trattiene una larghezza di terrapieno pari all'interasse orizzontale S_H; poiché lo strato e la griglia sono continui, la trazione è riferita al metro di muro:

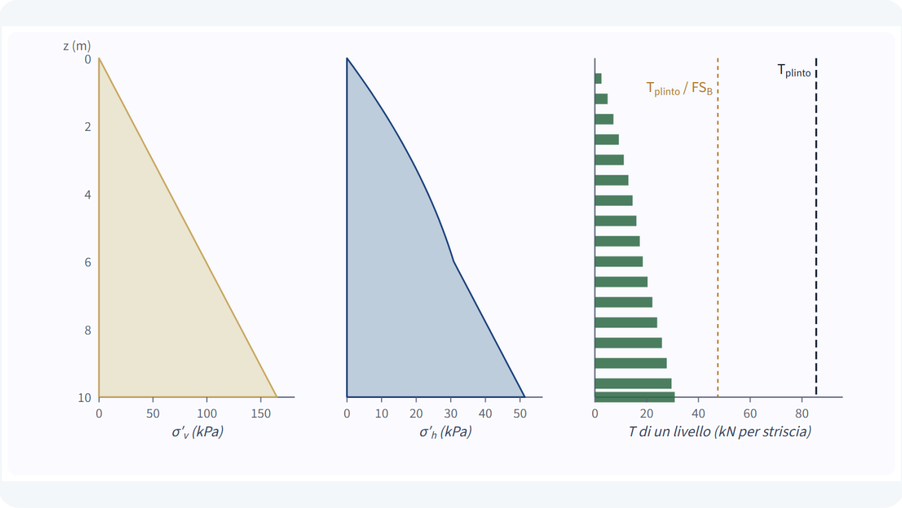
$$T = \sigma'_h S_V S_H \ \text{(per striscia)} \qquad T = \sigma'_h S_V \ \text{(per metro di muro)}$$

Striscia (larghezza w, spessore t, snervamento f_y): l'acciaio zincato del rinforzo si corrode di 0.025–0.050 mm all'anno; per una vita di progetto n lo spessore si riduce di r n:

$$t_{eff} = t - rn \qquad T_{diameter} = w\, t_{eff}\, f_y \qquad FS_B = \frac{T_{diameter}}{T} \qquad t_{req} = \frac{FS_B T_{max}}{w\, f_y} + rn$$

Geosintetico: la resistenza a lungo termine è la resistenza a trazione ultima divisa per i coefficienti di danneggiamento, scorrimento viscoso e degradazione; la geogriglia non copre sempre l'intera pianta (C_r):

$$T_{all} = \frac{T_{ult}}{RF_{id}\, RF_{cr}\, RF_{cbd}} \qquad FS_B = \frac{T_{all} C_r}{T} \qquad S_{V,req} = \frac{T_{all} C_r}{\sigma'_h(H)\, FS_B}$$



Traccia

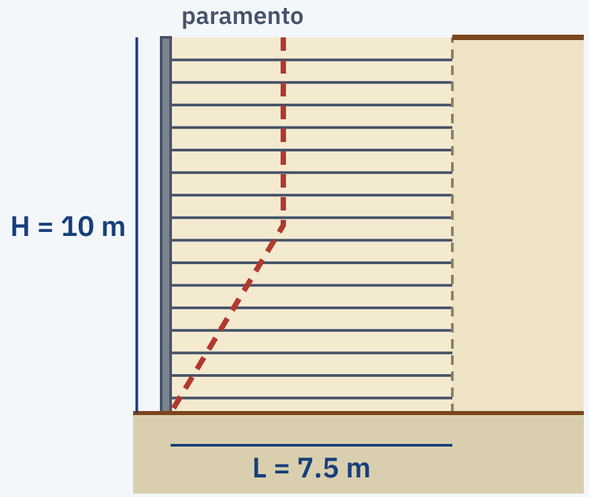
ESEMPIO

RICHIESTO

La trazione massima $\mathbf{T_{max}}$ (per striscia); $\mathbf{T_{cap}}$, $\mathbf{FS_B}$; lo spessore richiesto $\mathbf{t_{req}}$.

Dati

Striscia	**75 × 6 mm installati; $f_y = 240$ MPa; corrosione 0.025 mm/anno, vita utile di progetto 50 anni; $S_V = 0.6$ m, $S_H = 1.0$ m**
Richiesto	**$FS_B \geq 1.8$ (applicazione: 0.55 f_y in una sezione corrosa)**



Soluzione

SOLUZIONE

1 La trazione massima si ha alla quota di base (z = 10 m; σ'_h = 51.40 kPa)

$$T_{max} = \sigma'_h S_V S_H = 51.40(0.6)(1.0) = \mathbf{30.84}\ \text{kN/striscia}$$

2 Sezione corrosa e capacità portante

$$t_{eff} = 6 - 0.025(50) = 4.75\ \text{mm} \quad (1.25\ \text{mm di perdita})$$

$$T_{diameter} = w\, t_{eff} f_y = 0.075(0.00475)(240\,000) = \mathbf{85.5}\ \text{kN}$$

$$FS_B = 85.5/30.84 = \mathbf{2.772} \ \geq 1.80\ \checkmark$$

3 Spessore richiesto (reintroducendo il margine di corrosione)

$$t_{req} = \frac{1.8(30.84)}{0.075(240\,000)} + rn = 3.084 + 1.25 = \mathbf{4.33}\ \text{mm}$$

FS_B = **2.77** ≥ 1.80: una striscia di 6 mm è sufficiente; lo spessore richiesto è **4.33 mm**. Il livello critico è la base (k = 17).

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Attrito a tergo della superficie di scorrimento

TEORIA

Un livello che non si rompe può comunque **sfilarsi** dal terreno di riporto. Dietro la superficie di rottura il terreno di riporto trattiene il rinforzo per attrito sulle due facce; l'attrito è dato dalla tensione verticale al di sopra del livello moltiplicata per il coefficiente mobilitato dal rinforzo:

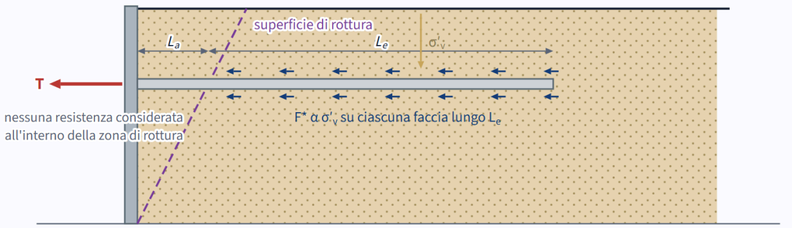
$$P_r = 2R_c\,F^*\alpha\,\sigma'_v\,L_e \qquad FS_P = \frac{P_r}{T} \qquad L_{req} = L_a + \frac{FS_P\,T}{2R_c F^*\alpha\,\sigma'_v}$$

F* coefficiente di resistenza allo sfilamento: tan φ′ per le strisce (limite inferiore), ⅔ tan φ′ per i geosintetici (limite inferiore del modulo; determinato mediante prova di sfilamento). **α** effetto scala: 1.0 per le strisce, 0.8 per la geogriglia, 0.6 per il geotessile.

Copertura **R_c**: w nella striscia (per striscia), C_r nella geogriglia (per metro di muro), 1 nella copertura. **σ'_v** è la tensione verticale nella zona resistente: $\gamma_1 z$ + sovraccarico permanente; **il carico variabile non è incluso** (non trattiene).

Nella striscia T e P_r crescono con la profondità: nel metodo della fonte la lunghezza efficace richiesta è la stessa a ogni livello; nel metodo semplificato i livelli superiori portano una trazione K_r/K_a volte maggiore e la lunghezza efficace cresce nello stesso rapporto.

Collegamento: la trazione T_{max} si trasferisce al paramento; la resistenza si inserisce dalle prove di collegamento e si verifica con il coefficiente di rottura.



Traccia

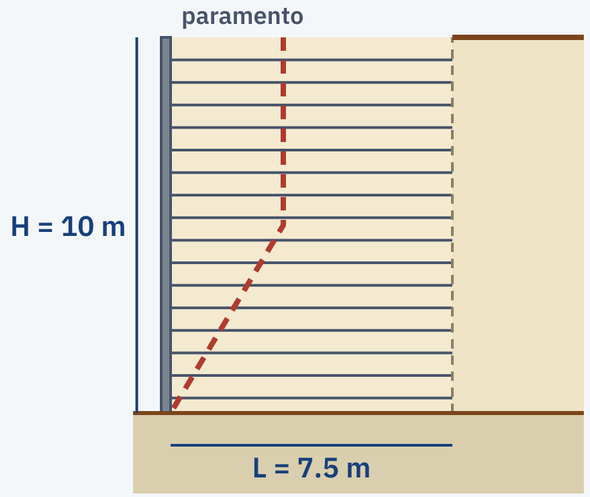
ESEMPIO

RICHIESTO

Al livello 1 $\mathbf{P_r}$, $\mathbf{FS_P}$, la lunghezza richiesta $\mathbf{L_{req}}$; sintesi di tutti i livelli.

Dati

Striscia e terreno	**Il muro degli Esempi 1–3;** $F^* = \tan 36^\circ = 0.727$, $\alpha = 1$; $FS_P \geq 1.5$
Livelli	**z = 0.6 m (1° livello) e altri livelli**



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Livello 1 (z = 0.6 m): $K_r/K_a = 1.65$; $\sigma'_h = 4.24$ kPa

$$T = \sigma'_h S_V S_H = 4.24(0.6) = 2.54 \text{ kN} \qquad L_a = 0.3H = 3.00, \quad L_e = 4.50 \text{ m}$$

$$P_r = 2(0.075)(0.727)(1.0)(9.9)(4.50) = \mathbf{4.86} \text{ kN}$$

$$FS_P = \frac{4.86}{2.54} = \mathbf{1.908} \ \geq 1.5 \ \checkmark$$

2 Lunghezza richiesta: $L_{req} = L_a + FS_P T/(F^* \alpha \, \sigma'_v \cdot 2w)$

$$L_{req} = 3.00 + \frac{1.5(2.54)}{0.727(1)(9.9)(2)(0.075)} = 3.00 + 3.54 = \mathbf{6.54} \text{ m}$$

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

3 Sintesi di tutti i livelli

Livello	z (m)	T (kN)	L_a	L_e	P_r (kN)	FS_P	L_{req} (m)
1	0.6	2.54	3.00	4.50	4.86	1.91	6.54
2	1.2	4.93	3.00	4.50	9.71	1.97	6.43
5	3.0	11.18	3.00	4.50	24.28	2.17	6.11
10	6.0	18.51	2.40	5.10	55.02	2.97	4.97
17	10.0	30.84	0.00	7.50	134.86	4.37	2.57

La sicurezza minima nei confronti dello sfilamento è **FS_P = 1.91 al livello 1** (richiesto 1.5); la lunghezza massima richiesta è **6.54 m** (L = 7.5 m è sufficiente). Al livello superiore la trazione è piccola, ma poiché anche σ'_V è piccola, lo sfilamento è più critico proprio in quella sede.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Il blocco è un muro a gravità

TEORIA

Il blocco rinforzato che garantisce la stabilità interna è **un blocco di terreno di dimensioni L × H** che trattiene il terrapieno retrostante. Il terrapieno trattenuto (γ_b, φ'_b) esercita sulla faccia posteriore verticale del blocco la spinta attiva di Rankine; il sovraccarico aggiunge ulteriore spinta:

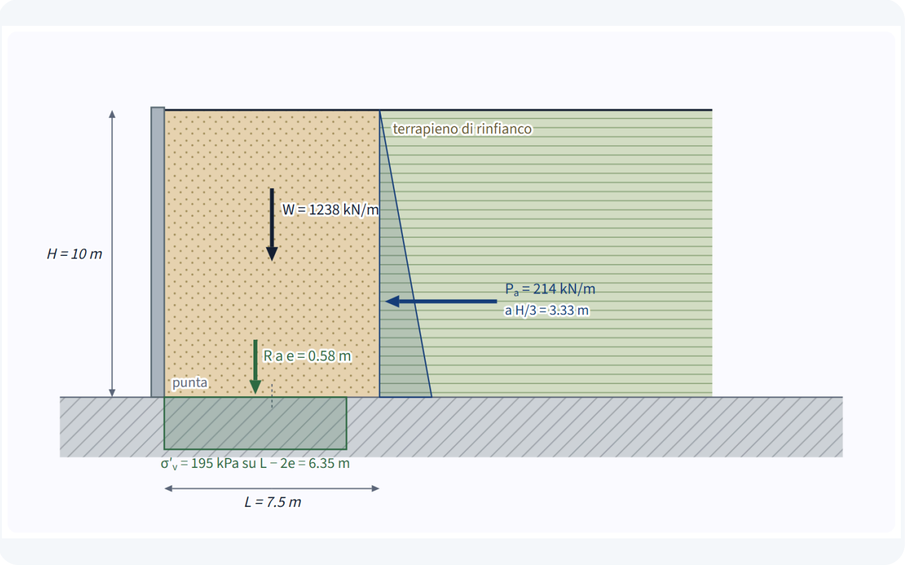
$$P_a = \tfrac{1}{2} K_a \gamma_b H^2 \;\; (H/3) \qquad P_q = K_a\, q\, H \;\; (H/2) \qquad W = \gamma_1 H L \;\; (L/2)$$

$$FS_{ot} = \frac{M_R}{M_o} = \frac{W\, L/2}{P_a H/3 + P_q H/2} \qquad x_R = \frac{M_R - M_o}{\Sigma V} \qquad e = \frac{L}{2} - x_R$$

Resistente: il peso del blocco e il sovraccarico **permanente**. Quando agisce la spinta, il **carico variabile non è resistente**, poiché può non essere presente (solo carichi).

La stessa verifica si legge in due modi: **rapporto dei momenti** ($FS_{ot} \geq 2$) e posizione della risultante: **e ≤ L/6** affinché la base resti interamente in compressione (L/3 in condizioni sismiche).

Il paramento e la parte infissa antistante non sono inclusi nel peso resistente (a favore di sicurezza).



Traccia

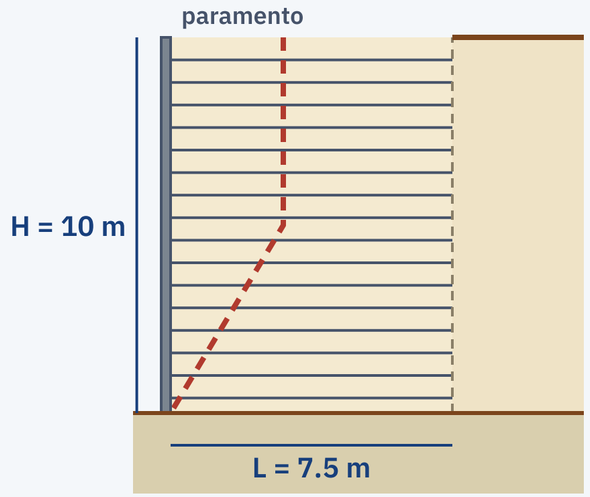
ESEMPIO

Dati

Blocco	$H = 10$ **m,** $L = 7.5$ **m; terreno di riporto rinforzato** $\gamma_1 = 16.5$ **kN/m³**
Terrapieno trattenuto	**stesso terreno (**$\gamma_b = 16.5$**,** $\varphi'_b = 36°$**); nessun sovraccarico**

RICHIESTO

P_a e M_o; **W** e M_R; **FS_{ot}**; posizione della risultante x_R ed **e** (limite L/6).



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Spinta attiva (K_a = 0.2596) e momento ribaltante

$$P_a = \tfrac{1}{2} K_a \gamma_b H^2 = \tfrac{1}{2}(0.2596)(16.5)(10)^2 = \mathbf{214.18}\ \text{kN/m}$$

$$M_o = P_a\, H/3 = 214.18(3.333) = \mathbf{713.9}\ \text{kN·m/m}$$

2 Peso del blocco e momento resistente

$$W = \gamma_1 H L = 16.5(10)(7.5) = \mathbf{1{,}237.5}\ \text{kN/m}$$

$$M_R = W\, L/2 = 1{,}237.5(3.75) = \mathbf{4{,}640.6}\ \text{kN·m/m}$$

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

3 Ribaltamento e posizione della risultante

$$FS_{ot} = M_R / M_o = 4{,}640.6 / 713.9 = \mathbf{6.50} \;\geq 2.0 \;\checkmark$$

$$x_R = (M_R - M_o)/\Sigma V = (4{,}640.6 - 713.9)/1{,}237.5 = 3.173 \text{ m}$$

$$e = L/2 - x_R = 3.75 - 3.173 = \mathbf{0.577} \text{ m} \;\leq L/6 = 1.25 \;\checkmark$$

Sicurezza al ribaltamento **6.50** (≥ 2.0); la risultante si è spostata solo di **0.58 m** dal centro della base verso la punta: la base è interamente in compressione (e ≤ L/6 = 1.25 m).

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Attrito alla base

TEORIA

Se la spinta supera l'attrito alla base, il blocco scorre sulla propria base. La **fonte** assume l'attrito con k ≈ ⅔, come in un muro di calcestruzzo poggiato sul terreno; alla base di un blocco rinforzato, invece, **il terreno poggia sul terreno**: la pratica si basa sull'angolo di attrito del **più debole** tra il terrapieno rinforzato e il terreno di fondazione. Il modulo mantiene il coefficiente ⅔, sceglie il terreno più debole e trascura la coesione del terreno di fondazione:

$$FS_{sl} = \frac{\Sigma V \, \tan\left(\frac{2}{3}\varphi'_{min}\right)}{\Sigma H} \qquad \varphi'_{min} = \min\left(\varphi'_1, \varphi'_2\right)$$

ΣH: spinta del terrapieno trattenuto e (se presente) spinta dovuta al sovraccarico; ΣV: peso del blocco e sovraccarico permanente. **Il carico variabile entra nella spinta ma non in ΣV.**

Si calcola anche il percorso della sorgente (solo terrapieno, φ'_1); se il terreno di fondazione è debole, il valore del modulo è inferiore ed è **quello determinante**.

Lo scorrimento si risolve ampliando il blocco (ΣV cresce linearmente con L); la lunghezza migliora inoltre lo sfilamento e l'eccentricità.

FATTORI DI SICUREZZA RICHIESTI

Verifica	Statica (richiesta)	Sisma (richiesto, 75%)
Rottura FS_B	1.80	1.35
FS_P allo sfilamento	1.50	1,125
Ribaltamento FS_{ot}	2.00	1.50
Eccentricità e	≤ L/6	≤ L/3
FS_{sl} per scorrimento	1.50	1,125
Capacità portante FS_{bc}	2.50	1,875

I valori sismici sono il 75% di quelli statici (eccentricità L/6 → L/3). Il carico variabile è mantenuto in entrambi i casi.

Traccia

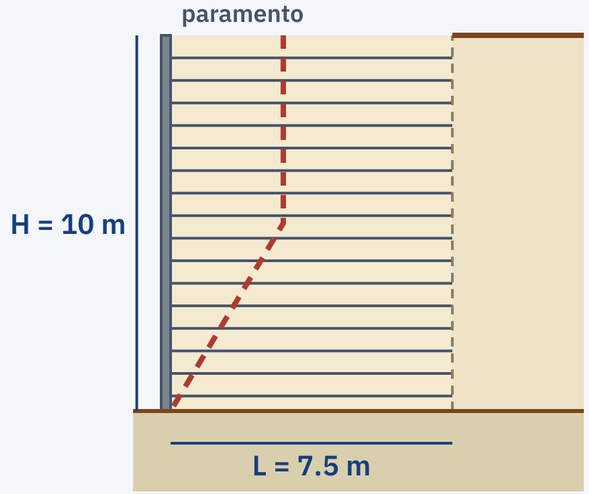
ESEMPIO

Dati

Blocco	**Il blocco dell'Esempio 5 ($\Sigma V = 1\,237.5$ kN/m, $\Sigma H = P_a = 214.18$ kN/m)**
Terreni	**terreno di riporto rinforzato $\varphi'_1 = 36°$; terreno di fondazione $\varphi'_2 = 28°$ ($c'_2 = 50$ kPa, coesione trascurata)**

RICHIESTO

FS_{sl} dall'attrito alla base; confronto con l'approccio della fonte (solo terrapieno).



Soluzione

SOLUZIONE

1 Terreno debole: φ'_{min} = min(36°, 28°) = 28° (terreno di fondazione)

$$\tan\left(\tfrac{2}{3}\cdot 28^\circ\right) = \tan 18.67^\circ = 0.3378$$

$$R = \Sigma V \tan(\ldots) = 1{,}237.5(0.3378) = 418.1 \text{ kN/m}$$

$$FS_{sl} = \frac{R}{\Sigma H} = \frac{418.1}{214.18} = \mathbf{1.952} \geq 1.5 \checkmark$$

2 Percorso della sorgente (solo terrapieno, φ'_1 = 36°)

$$\tan\left(\tfrac{2}{3}\cdot 36^\circ\right) = \tan 24^\circ = 0.4452$$

$$FS_{sl} = \frac{1{,}237.5(0.4452)}{214.18} = \mathbf{2.572}$$

Poiché il terreno di fondazione è più debole, la sicurezza allo scorrimento vale **1.95** (2.57 secondo il percorso della fonte): il modulo assume come determinante il **minore**; è superiore al valore richiesto di 1.5.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Il blocco di terreno di fondazione porta come una fondazione continua

TEORIA

La sorgente confronta la capacità portante di una fondazione di larghezza L alla superficie del terreno con la tensione verticale alla base, senza il termine di profondità. Fattori di capacità portante generali (Vesic): $N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2(45° + \varphi'/2)$, $N_c = (N_q - 1)\cot \varphi'$, $N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan \varphi'$:

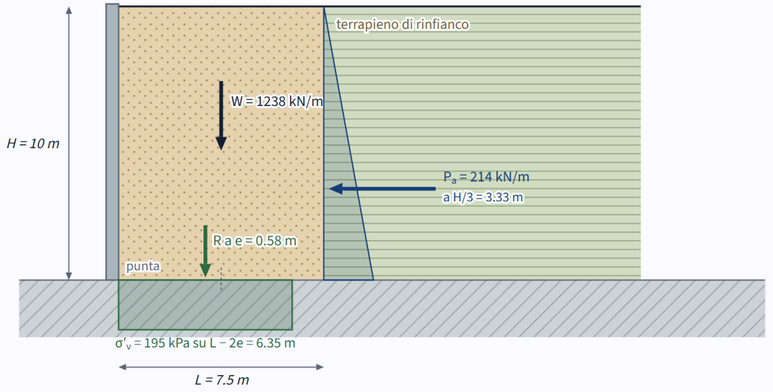
$$q_u = c'_2 N_c + \tfrac{1}{2}\gamma_2 L N_\gamma \qquad FS_{bc} = \frac{q_u}{\sigma'_o},\ \ \sigma'_o = \gamma_1 H + q_D$$

Applicazione (FHWA/AASHTO): la risultante non è in mezzeria (e), la pressione alla punta è maggiore della media; pertanto l'intero carico verticale si ripartisce uniformemente sulla **larghezza efficace di Meyerhof** L′ = L − 2e e si calcola il carico limite di una fondazione di tale larghezza:

$$L' = L - 2e \qquad \sigma'_v = \frac{\Sigma V}{L'} \qquad q_u = c'_2 N_c + \tfrac{1}{2}\gamma_2 L' N_\gamma \qquad FS_{bc} = \frac{q_u}{\sigma'_v}$$

La pressione è maggiore e la fondazione più stretta: il fattore di sicurezza secondo Meyerhof è più basso; il modulo **calcola entrambi e assume il minore** come determinante.

Questa pagina costituisce una verifica a breve termine (senza pressione interstiziale); la stabilità globale e i cedimenti sono al di fuori del modulo.



Traccia

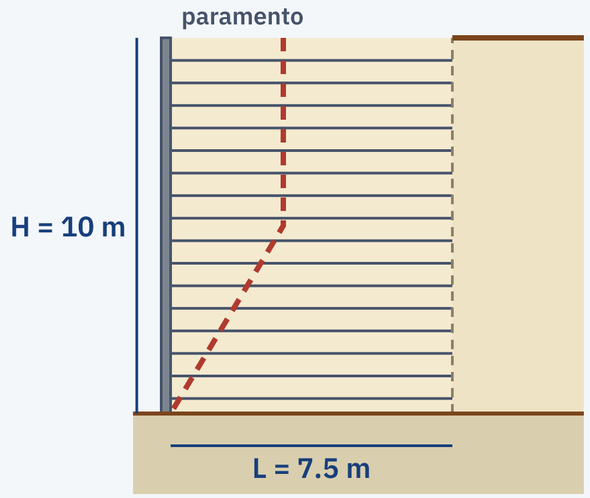
ESEMPIO

RICHIESTO

FS$_{bc}$ secondo l'approccio della fonte, **FS$_{bc}$** con la larghezza efficace di Meyerhof; quale risulta determinante.

Dati

Blocco	**Blocco dell'Esempio 5:** $\Sigma V = 1\,237.5$ **kN/m,** $e = 0.577$ **m**
Terreno di fondazione	$\varphi'_2 = 28°$**,** $c'_2 = 50$ **kPa,** $\gamma_2 = 17.3$ **kN/m³**



Soluzione

SOLUZIONE

1 Coefficienti (Vesic, $\varphi'_2 = 28°$): $N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2(45° + \varphi'/2)$, $N_c = (N_q - 1)\cot \varphi'$, $N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan \varphi'$

$$N_q = 14.72 \qquad N_c = 25.80 \qquad N_\gamma = 16.72$$

2 Percorso della sorgente (larghezza $L = 7.5$ m, $\sigma'_o = \gamma_1 H = 165$ kPa)

$$q_u = 50(25.80) + \tfrac{1}{2}(17.3)(7.5)(16.72) = 2{,}375 \text{ kPa} \qquad FS_{bc} = 2{,}375/165 = \mathbf{14.39}$$

3 Larghezza efficace di Meyerhof ($e = 0.577$ m)

$$L' = 7.5 - 2(0.577) = 6.346 \text{ m} \qquad \sigma'_v = \Sigma V / L' = 1{,}237.5/6.346 = 195 \text{ kPa}$$

$$q_u = 50(25.80) + \tfrac{1}{2}(17.3)(6.346)(16.72) = 2{,}208 \text{ kPa}$$

$$FS_{bc} = 2{,}208/195 = \mathbf{11.32} \ \geq 2.5 \ \checkmark$$

Il percorso della fonte fornisce **14.39**, la larghezza efficace **11.32**: poiché l'eccentricità aumenta la pressione e restringe la fondazione, **il valore di Meyerhof è determinante**; entrambi sono ben al di sopra di 2.5.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

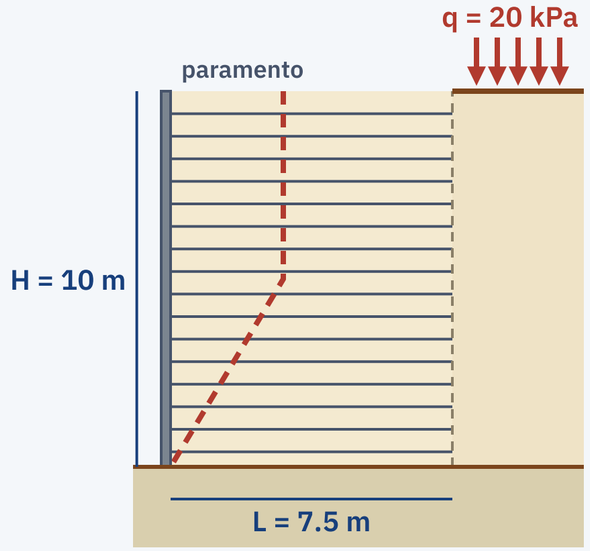
ESEMPIO

Dati

Muro	**Muro dell'Esempio 1–7 (H = 10 m, L = 7.5 m, strisce)**
Carico	**sovraccarico ripartito variabile $q_L = 20$ kPa sulla sommità del muro (sopra e dietro il blocco)**

RICHIESTO

Al livello 1 **FS_P**; alla base **T_{max}**, FS_B; verifiche esterne (spinta, ribaltamento, scorrimento, capacità portante).



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Livello 1 (z = 0.6 m): il sovraccarico incrementa la tensione laterale ma non la resistenza allo sfilamento

$$\sigma'_h = K_r\,(\gamma_1 z + q_L) = 0.4284(9.9 + 20) = 12.81\ \text{kPa} \quad T = 12.81(0.6) = 7.68\ \text{kN}$$

$$P_r = 4.86\ \text{kN} \quad (\sigma'_v = \gamma_1 z = 9.9\ \text{kPa; il carico variabile non si conta})$$

$$FS_P = \frac{4.86}{7.68} = \mathbf{0.632} \ < 1.5 \ \text{✗}$$

2 Base: trazione massima e rottura

$$\sigma'_h = 0.3115(165 + 20) = 57.63\ \text{kPa} \quad T_{max} = 57.63(0.6) = 34.58\ \text{kN}$$

$$FS_B = \frac{85.5}{34.58} = \mathbf{2.47} \ \geq 1.8 \ \text{✓} \qquad L_{req} = 13.68\ \text{m} \ > 7.5 \ \text{✗}$$

Al Livello 1, mentre la trazione aumenta da 2.54 a **7.68 kN**, la resistenza allo sfilamento **resta invariata**: FS_P 1.91 → **0.63**. La rottura a trazione è sufficiente (2.47), ma la lunghezza necessaria diventa 13.68 m: il carico variabile **carica, non trattiene**.

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

3 Verifiche esterne: la spinta aumenta; non è inclusa nel peso

$$P_q = K_a q_L H = 0.2596(20)(10) = 51.92\ \text{kN/m}\ \ (H/2) \qquad P_a = 266.11\ \text{kN/m}$$

$$M_o = 713.9 + 51.92(5) = 973.6\ \text{kN·m/m} \qquad W = 1{,}237.5\ \text{kN/m}\ (\text{senza carico variabile})$$

$$FS_{ot} = 4{,}640.6/973.6 = \mathbf{4.77} \qquad e = \mathbf{0.787}\ \text{m}\ \le 1.25\ \checkmark$$

4 Scorrimento e capacità portante (nella capacità portante il carico variabile carica anch'esso la base)

$$FS_{sl} = 1{,}237.5(0.3378)/266.11 = \mathbf{1.57}\ \ge 1.5\ \checkmark$$

$$V = 1\,237.5 + 20(7.5) = 1{,}387.5\ \Rightarrow\ e_b = 0.702,\ \ L' = 6.10\ \text{m},\ \ \sigma'_v = 227.6\ \text{kPa}$$

$$q_u = 2{,}172\ \text{kPa} \qquad FS_{bc} = \mathbf{9.54}\ \ge 2.5\ \checkmark$$

La stabilità esterna è adeguata (ribaltamento 4.77, scorrimento 1.57, carico limite 9.54), ma **lo sfilamento non è verificato** (FS_P = 0.63): nel muro con carico variabile è la lunghezza dei livelli superiori a governare.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Spinta dinamica, inerzia del blocco e inerzia della zona attiva

TEORIA

Il sisma (pseudostatico, k_h; $k_v = 0$) aggiunge tre forze: la spinta dinamica del terrapieno trattenuto (Mononobe–Okabe), l'inerzia del blocco rinforzato e l'inerzia della **zona attiva** trattenuta dal rinforzo:

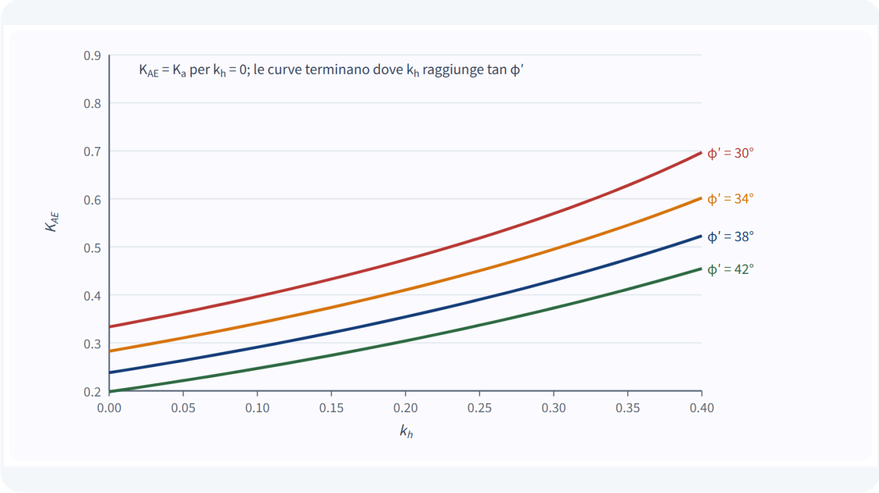
$$\psi = \tan^{-1} k_h \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi'_b - \psi)}{\cos^2\psi \left[1 + \sqrt{\dfrac{\sin\varphi'_b \sin(\varphi'_b - \psi)}{\cos\psi}}\right]^2}$$

$$\Delta P_{AE} = \tfrac{1}{2}\gamma_b H^2 (K_{AE} - K_a) \;\; (0.6H) \qquad P_{IR} = \tfrac{1}{2} k_h \gamma_1 H^2 \;\; (H/2) \qquad P_i = k_h W_a \;\Rightarrow\; T_{md} = P_i \frac{L_e}{\Sigma L_e}$$

Si assume la **metà** di ΔP_{AE} (la spinta e l'inerzia non raggiungono contemporaneamente i valori massimi); P_{IR} solo per il blocco di larghezza 0.5H retrostante il paramento. Il sovraccarico non genera forza d'inerzia.

Verifiche esterne: $\Sigma H = P_a + \tfrac{1}{2}\Delta P_{AE} + P_{IR}$; $e \le L/3$; i fattori di sicurezza sono il 75% di quelli statici.

Verifiche interne: ogni livello è riverificato a rottura a trazione con $T + T_{md}$ e a sfilamento con l'**80%** di F*; il carico variabile è mantenuto come nel caso statico.



Traccia

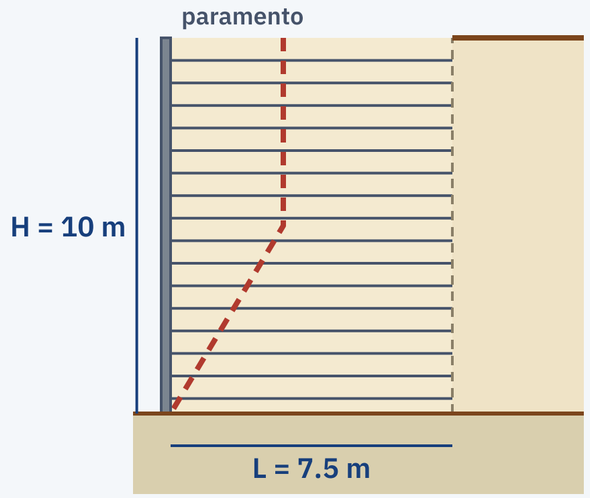
ESEMPIO

Dati

Muro	**Muro degli Esempi 1–7; senza sovraccarico**
Sisma	**$k_h = 0.15$ ($k_v = 0$); FS richiesto pari al 75% del valore statico; $e \leq L/3$; allo sfilamento F^* pari all'80% del valore statico**

RICHIESTO

K_{AE}, ΔP_{AE}, P_{IR}; verifiche esterne; inerzia della zona attiva e verifica a rottura e a sfilamento di ogni livello con **T + T_{md}**.



Soluzione (1/4)

SOLUZIONE

1 Angolo e coefficiente sismico

$$\psi = \tan^{-1} 0.15 = 8.53^\circ \qquad \sqrt{\sin 36^\circ \sin(27.47^\circ)/\cos 8.53^\circ} = 0.5236$$

$$K_{AE} = \cos^2(27.47^\circ)/\left[\cos^2 8.53^\circ (1+0.5236)^2\right] = \mathbf{0.3468} \quad (K_a = 0.2596)$$

2 Incremento della spinta dinamica, inerzia del blocco e forza orizzontale totale

$$\Delta P_{AE} = \tfrac{1}{2}(16.5)(10)^2(0.3468 - 0.2596) = \mathbf{71.89}\ \text{kN/m} \ \ (6.0\ \text{m})$$

$$P_{IR} = \tfrac{1}{2}(0.15)(16.5)(10)^2 = \mathbf{123.75}\ \text{kN/m} \ \ (5.0\ \text{m})$$

$$P_s = 214.18 + \tfrac{1}{2}(71.89) + 123.75 = \mathbf{373.88}\ \text{kN/m}$$

3 Momento ribaltante

$$M_{o,E} = 214.18(3.333) + 35.94(6.0) + 123.75(5.0)$$

$$= 713.9 + 215.7 + 618.8 = \mathbf{1{,}548.4}\ \text{kN}\cdot\text{m/m}$$

Soluzione (2/4)

SOLUZIONE

4 Ribaltamento ed eccentricità (limite L/3 = 2.50 m)

$$FS_{ot,E} = 4{,}640.6/1{,}548.4 = \mathbf{3.00} \ \geq 1.5 \ \checkmark$$

$$x_R = (4{,}640.6 - 1{,}548.4)/1{,}237.5 = 2.499 \text{ m} \qquad e = 3.75 - 2.499 = \mathbf{1.251} \text{ m} \ \leq 2.50 \ \checkmark$$

5 Scorrimento (senza resistenza frontale)

$$FS_{sl,E} = 1{,}237.5(0.3378)/373.88 = 418.1/373.88 = \mathbf{1.118} \ < 1.125 \ \times$$

6 Capacità portante (Meyerhof)

$$L' = 7.5 - 2(1.251) = 4.998 \text{ m} \qquad \sigma'_v = 1{,}237.5/4.998 = 247.6 \text{ kPa}$$

$$q_u = 50(25.80) + \tfrac{1}{2}(17.3)(4.998)(16.72) = 2{,}013 \text{ kPa} \quad FS_{bc,E} = \mathbf{8.13} \ \geq 1.875 \ \checkmark$$

Soluzione (3/4)

SOLUZIONE

7 Inerzia della zona attiva e sua distribuzione tra i livelli

$$W_a = \gamma_1 A_a = 16.5(22.50) = 371.25\ \text{kN/m} \qquad P_i = 0.15(371.25) = 55.69\ \text{kN/m}$$

$$T_{md} = P_i L_e / \Sigma L_e \qquad \Sigma L_e = 91.5\ \text{m} \quad (17\ \text{livello})$$

8 Livello 1 (z = 0.6 m, L_e = 4.50 m): forza di rottura e sfilamento

$$T_{md} = 55.69(4.50)/91.5 = 2.739\ \text{kN} \qquad T + T_{md} = 2.54 + 2.739 = 5.283\ \text{kN}$$

$$P_{r,E} = 0.8(4.855) = 3.884\ \text{kN} \quad (F^* \text{ l'}80\%\ \text{dello statico})$$

$$FS_{P,E} = 3.884/5.283 = \mathbf{0.735} \ < 1.125 \quad ✗$$

9 Livello 17 (base, L_e = 7.50 m): rottura

$$T_{md} = 55.69(7.50)/91.5 = 4.565\ \text{kN} \qquad FS_{B,E} = 85.5/(30.84 + 4.565) = \mathbf{2.415} \ \geq 1.35\ ✓$$

Soluzione (4/4)

SOLUZIONE

10 Sintesi dei risultati (k_h = 0.15)

Verifica	Statico	Sisma	Richiesto (statico / sisma)	Decisione (sisma)
Rottura FS_B (minimo)	2.77	2.41	1.80 / 1.35	Soddisfatto
Fattore di sicurezza allo sfilamento FS_P (minimo)	1.91	**0.74**	1.50 / 1,125	**Non soddisfatta** (livello 1)
Ribaltamento FS_{ot}	6.50	3.00	2.00 / 1.50	Soddisfatto
Eccentricità e (m)	0.58	1.25	≤ 1.25 / ≤ 2.50	Soddisfatto
FS_{sl} per scorrimento	1.95	**1.118**	1.50 / 1,125	**Non soddisfatta** (al limite)
Capacità portante FS_{bc}	11.32	8.13	2.50 / 1,875	Soddisfatto

Il sisma riduce **lo sfilamento ($FS_{P,E}$ = 0.74) e lo scorrimento ($FS_{sl,E}$ = 1.12)** al di sotto del valore richiesto; ribaltamento, eccentricità, capacità portante e rottura a trazione risultano soddisfatti. Ai livelli superiori la trazione è piccola, ma essendo piccolo anche σ'_V, **lo sfilamento è l'anello più debole**: occorre aumentare la lunghezza del rinforzo (Esempio 10).

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

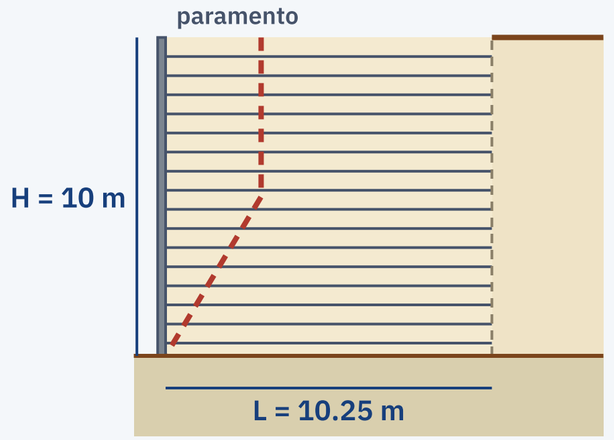
ESEMPIO

Dati

Iniziale	**Esempio 9: sfilamento ($FS_{P,E} = 0.74$) e scorrimento ($FS_{sl,E} = 1.12$) insufficienti per il sisma**
Variabile	**lunghezza della striscia L (aumentata con passi di 0.25 m); S_V, S_H, la sezione della striscia e il rilevato restano invariati**

RICHIESTO

L minimo: devono risultare soddisfatte le verifiche sismiche ($FS_{P,E} \geq 1.125$; $FS_{sl,E} \geq 1.125$; $e \leq L/3$); **tabella di L**.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Fattori di sicurezza all'aumentare della lunghezza (in grassetto: al di sotto del valore richiesto)

L (m)	$FS_{P,E}$ (≥ 1,125)	$FS_{sl,E}$ (≥ 1,125)	e_E / (L/3) (m)	FS_P statico	FS_{sl} statico	FS_{bc} statico
7.5	**0.735**	**1.118**	1.25 / 2.50	1.91	1.95	11.32
8.5	**0.884**	1.267	1.10 / 2.83	2.33	2.21	12.65
9.5	**1.033**	1.416	0.99 / 3.17	2.76	2.47	13.87
10.5	1.182	1.565	0.89 / 3.50	3.18	2.73	15.02
11.5	1.331	1.715	0.82 / 3.83	3.60	2.99	16.11
12.5	1.480	1.864	0.75 / 4.17	4.03	3.25	17.16

Per L = 7.5 m lo sfilamento (0.74) e lo scorrimento (1.12) risultano insufficienti; **lo sfilamento è determinante**: anche per L = 9.5 m vale 1.03 < 1.125. All'aumentare della lunghezza crescono sia la lunghezza efficace L_e (sfilamento) sia il peso del blocco (scorrimento, eccentricità).

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

2 Lunghezza minima con passi di 0.25 m: L = 10.25 m

$$FS_{P,E} = 1.145 \geq 1.125 \checkmark \qquad FS_{sl,E} = 1.528 \geq 1.125 \checkmark$$

$$e_E = 0.916 \leq \frac{L}{3} = 3.42\ \text{m} \checkmark \qquad FS_{ot,E} = 5.60 \quad FS_{bc,E} = 12.48$$

3 Caso statico con questa lunghezza (verifica)

$$FS_P = 3.07 \quad FS_{sl} = 2.67 \quad FS_{ot} = 12.14 \quad e = 0.422\ \text{m} \quad FS_{bc} = 14.74$$

Per il sisma è necessario **L = 10.25 m** (≈ 1.02 H); con questa lunghezza i fattori di sicurezza statici risultano molto elevati. Lo stesso risultato può essere ricercato anche infittendo il rinforzo (S_V, S_H) oppure con rinforzo a striscia più largo o rivestito; la lunghezza è il fattore più diretto.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

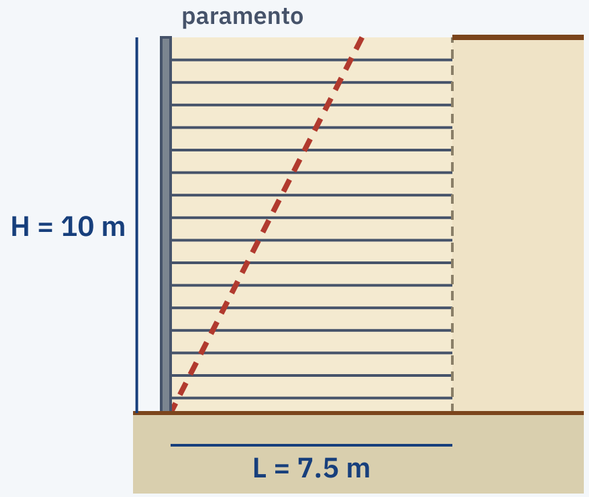
ESEMPIO

Dati

Geogriglia	$T_{ult} = 150$ **kN/m;** $RF_{id} = 1.2$, $RF_{cr} = 2.5$, $RF_{cbd} = 1.25$**; sovraccarico** $C_r = 0.8$**;** $S_V = 0.6$ **m**
Sfilamento	$F^* = \frac{2}{3}\tan 36°$, $\alpha = 0.8$**; superficie di rottura di Rankine (**$K_r = K_a$**);** $FS_B \geq 1.8$, $FS_P \geq 1.5$

RICHIESTO

T_{all}, T_{cap}, T_{max} (per metro di muro), **FS_B**, S_V richiesto; al livello 1, **FS_P** e L_{req}.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Resistenza e capacità a lungo termine

$$RF = 1.2(2.5)(1.25) = 3.75 \qquad T_{all} = \frac{T_{ult}}{RF} = \frac{150}{3.75} = 40.0\ \text{kN/m}$$

$$T_{diameter} = T_{all} C_r = 40.0(0.8) = 32.0\ \text{kN/m}$$

2 Trazione e rottura ($K_r = K_a$)

$$\sigma'_h(H) = K_a(165) = 42.84\ \text{kPa} \qquad T_{max} = 42.84(0.6) = 25.70\ \text{kN/m}$$

$$FS_B = \frac{32.0}{25.70} = \mathbf{1.245} < 1.8\ \text{✗} \qquad S_{V,req} = \frac{T_{all} C_r}{\sigma'_h FS_B} = \frac{32.0}{42.84(1.8)} = \mathbf{0.415}\ \text{m}$$

L'interasse installato (0.6 m) è eccessivo: il fattore di sicurezza a rottura è 1.25 < 1.8; l'interasse richiesto è **$S_V \le 0.415$ m** (oppure una geogriglia più resistente).

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

3 Livello 1 (z = 0.6 m): superficie di Rankine

$$L_a = (H - z)/\tan 63^\circ = 4.79\ \text{m} \qquad L_e = 7.5 - 4.79 = 2.71\ \text{m}$$

$$\sigma'_h = K_a(9.9) = 2.57\ \text{kPa} \qquad T = 2.57(0.6) = 1.542\ \text{kN/m}$$

4 Sfilamento (per metro di muro, $R_c = C_r = 0.8$)

$$F^* = \tfrac{2}{3}\tan 36^\circ = 0.4844$$

$$P_r = 2C_rF^*\alpha\sigma'_vL_e = 2(0.8)(0.4844)(0.8)(9.9)(2.71) = 16.64\ \text{kN/m}$$

$$FS_P = 16.64/1.542 = \mathbf{10.79}\ \geq 1.5\ \checkmark \qquad L_{req} = L_a + \frac{1.5\,T}{2C_rF^*\alpha\sigma'_v} = \mathbf{5.17}\ \text{m}$$

Nel geosintetico lo sfilamento è ampiamente soddisfatto (FS_P = 10.79); la lunghezza richiesta segue il cuneo di Rankine: **L_{req} = 5.17 m** (< 7.5 m). Il modo determinante è la **rottura a trazione**: si regola con la resistenza di progetto e l'interasse.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

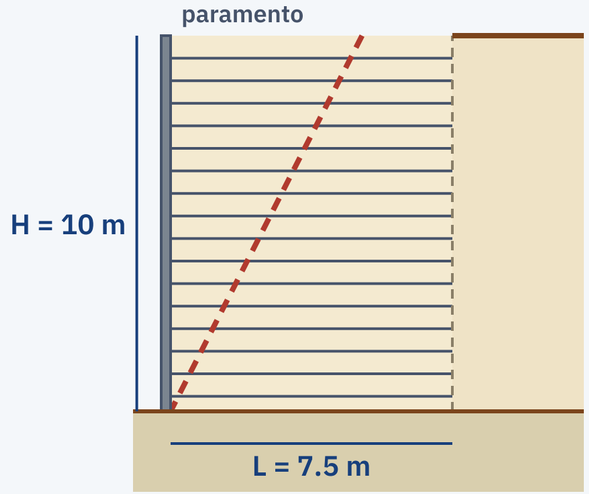
ESEMPIO

Dati

Muro	**H = 10 m, L = 7.5 m, $S_V = 0.6$ m; terrapieno $\varphi'_1 = 36°$; stesso terreno di fondazione**
Casi	**metodo semplificato, approccio di Rankine della sorgente, carico variabile, carico a striscia, geogriglia, rinforzo corto**

RICHIESTO

Scrivere affiancati i **fattori di sicurezza** dei sette casi e commentare le differenze.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Lo stesso muro, sette casi (statico)

Condizione	FS_B	FS_P	L_{req} (m)	FS_{ot}	e (m)	FS_{sl}	FS_{bc}
Apertura: semplificato, conci, L = 7.5 m	2.77	1.91	6.54	6.50	0.58	1.95	11.32
Approccio di Rankine della fonte (stesse strisce)	3.33	1.90	6.93	6.50	0.58	1.95	11.32
Approccio di Rankine, L = 13.5 m	3.33	6.09	6.93	21.06	0.32	3.51	18.18
Sovraccarico variabile q_L = 20 kPa	2.47	0.63	13.68	4.77	0.79	1.57	9.54
Carico a striscia 60 kPa (a′ = 2 m, b′ = 1 m)	2.74	1.32	8.13	3.66	1.14	1.55	7.87
Geogriglia 150 kN/m (Rankine, α = 0.8)	1.25	10.79	5.17	6.50	0.58	1.95	11.32
Strisce L = 7 m (0.7H)	2.77	1.70	6.54	5.66	0.62	1.82	10.60

L'approccio di Rankine utilizza K_a alla base: la trazione è piccola (T_{max} 25.7 kN), la rottura è elevata (3.33), ma la lunghezza richiesta in sommità è 6.93 m. Il **carico variabile** riduce ogni fattore di sicurezza (FS_P 0.63: i carichi non tengono); il **carico a striscia** lo riduce meno (FS_P 1.32), perché si oppone come peso sopra il blocco. Nella geogriglia lo sfilamento è abbondante, la **rottura è determinante** (FS_B 1.25). Con L = 7 m le strisce sono ancora sufficienti (FS_P 1.70, e = 0.62 m).

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Ambito della soluzione

TEORIA

Il **terreno di riporto** è granulare a drenaggio libero (nessuna pressione interstiziale); **non** vi è falda freatica entro o dietro il muro né terrapieno inclinato sopra il muro.

I livelli si trovano alle profondità S_V, $2S_V$, ...; non si modellano un'unica lunghezza del rinforzo, la sezione trapezoidale né livelli di lunghezza diversa. Le reti di barre/fili ($K_r/K_a \geq 2.5$) e il valore di F* variabile con la profondità delle strisce nervate sono esclusi dal campo di applicazione.

Carichi: sovraccarico distribuito (permanente/variabile) e carichi a striscia (Laba–Kennedy; sovrapposti). I carichi concentrati e lineari non sono modellati.

Il **paramento** non porta carico; il collegamento è verificato con un fattore di sicurezza nei confronti della rottura solo quando si inserisce una resistenza; la porzione infissa antistante non viene conteggiata.

Non verificati: stabilità globale e composta (analisi di stabilità dei pendii), cedimenti e cedimenti differenziali, drenaggio, rivestimento del paramento, fasi costruttive.

Le verifiche sono in forma di **tensione ammissibile** (fattori di sicurezza globali); non si utilizzano i coefficienti di carico e resistenza AASHTO LRFD/GEC 11. Per un muro importante si devono eseguire inoltre i dati di prodotto, la stabilità globale e i cedimenti.

Sintesi

Punti chiave

Terreno rinforzato: la pressione del terreno è sostenuta dalla trazione del rinforzo e collegata dall'attrito. Stabilità interna: rottura a trazione, sfilamento, (collegamento); stabilità esterna: ribaltamento, scorrimento, capacità portante del blocco L × H

Tensione: $\sigma'_h = K_r\sigma'_v$; nella striscia $K_r/K_a = 1.7 \rightarrow 1.2$ (fino a 6 m), nel geosintetico 1. **Trazione** $T = \sigma'_h S_V S_H$; la trazione massima è alla base

Rottura a trazione: $T_{cap} = w(t - rn)f_y$ (striscia) oppure $T_{all}C_r$ (geosintetico); **sfilamento**: $P_r = 2R_cF^*\alpha\sigma'_vL_e$, con L_e dietro la superficie di rottura (bilineare / Rankine)

Verifiche esterne: FS_{ot}, $e \le L/6$, $FS_{sl} = \Sigma V \tan(⅔\varphi'_{min})/\Sigma H$, carico limite (secondo la fonte e Meyerhof con $L' = L - 2e$, il minore)

Il carico variabile gravita, non resiste: aumenta la trazione e la spinta, e non entra nello sfilamento né nel peso; nell'esempio FS_P 1.91 → 0.63

Sisma: ΔP_{AE} (metà, 0.6H), P_{IR}, $P_i \rightarrow T_{md}$; il fattore di sicurezza richiesto è il 75% di quello statico; il muro dell'esempio **non è verificato allo sfilamento (0.74) e allo scorrimento (1.12)**, e la verifica è soddisfatta con L = 10.25 m

Geogriglia: $T_{all} = T_{ult}/(RF_{id}RF_{cr}RF_{cbd})$; la rottura a trazione è determinante ($S_{V,req}$ = 0.415 m), lo sfilamento è ampiamente soddisfatto

Bibliografia

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, Boston. Chapter 13, Sections 13.10 to 13.17: soil reinforcement, the design of walls with metallic strips, geotextiles and geogrids; Table 4.2 for the bearing capacity factors.

Berg, R.R., Christopher, B.R. and Samtani, N.C. (2009). Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Vol. I, FHWA-NHI-10-024. Federal Highway Administration, Washington, D.C.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th ed., Section 11.10, Mechanically stabilized earth walls.

Vidal, H. (1966). La terre armée. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, July–August, 888–938.

Laba, J.T. and Kennedy, J.B. (1986). Reinforced earth retaining wall analysis and design. Canadian Geotechnical Journal, 23(3), 317–326.

Koerner, R.M. (2005). Designing with Geosynthetics, 5th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Binquet, J. and Lee, K.L. (1975). Bearing capacity analysis of reinforced earth slabs. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101(GT12), 1257–1276.

Martin, J.P., Koerner, R.M. and Whitty, J.E. (1984). Experimental friction evaluation of slippage between geomembranes, geotextiles and soils. Proceedings, International Conference on Geomembranes, Denver, 191–196.

Mononobe, N. and Matsuo, H. (1929). On the determination of earth pressures during earthquakes. Proceedings, World Engineering Congress, Tokyo, 9, 177–185.

Okabe, S. (1926). General theory of earth pressure. Journal of the Japanese Society of Civil Engineers, 12(1).

Vesic, A.S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 99(SM1), 45–73.

NOTA

Tutti gli esempi numerici sono stati prodotti con il motore di calcolo del modulo stesso; il modulo restituisce gli stessi valori. Anche l'esempio di calcolo passo per passo nella pagina del modulo è questo muro (H = 10 m, nastro zincato 75 × 6 mm, L = 7.5 m, S_V = 0.6 m, S_H = 1.0 m).

GeoTerva

Calcoli geotecnici online

Dalla teoria alla pratica

Inserire in GeoTerva l'altezza del proprio muro, il rinforzo (nastro, geogriglia, geotessile), il terrapieno, il sovraccarico e il coefficiente sismico; il modulo fornisce insieme la sicurezza a rottura a trazione e a sfilamento di ogni livello, le verifiche esterne del blocco e la lunghezza richiesta.

Aprire il modulo →

Pagina di teoria →

Aprire dallo smartphone

I moduli di prova non richiedono registrazione.

Se si desidera utilizzarli nelle proprie lezioni: info@geoterva.com