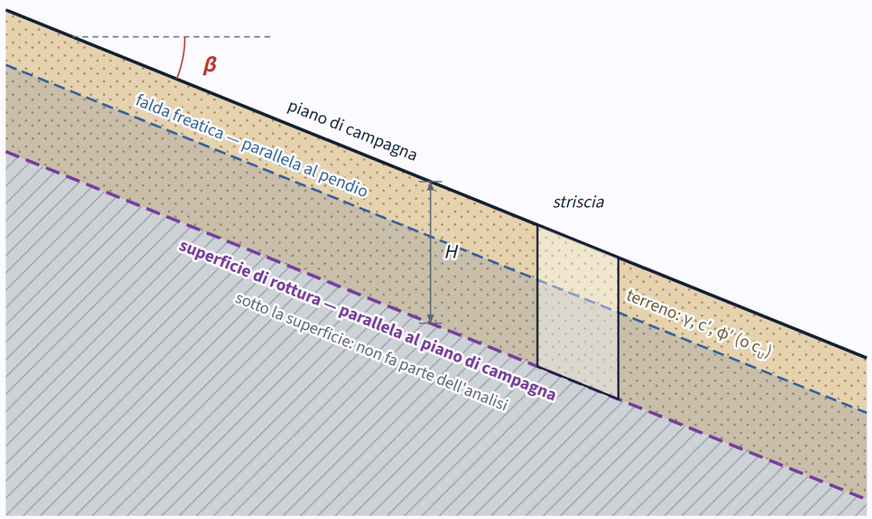
Presentazione della lezione di geotecnica · Stabilità dei pendii

Stabilità del pendio indefinito

Lezione: modello di pendio indefinito (superficie di scorrimento parallela alla superficie); tensioni, fattore di sicurezza, argilla non drenata, acqua, coefficiente di snervamento in condizioni sismiche, profondità critica e angolo richiesto; un esempio di calcolo per ogni argomento.

Pendio indefinito
Resistenza al taglio e FS
Acqua · sisma
Profondità critica · angolo necessario
Risolvibile a mano



Introduzione

Che cosa si impara in questa lezione?

Perché per gli scorrimenti superficiali si utilizza il modello del **pendio indefinito**: un sottile strato di terreno che scivola su un piano parallelo alla superficie

Le tensioni sul piano dovute a un singolo **carico a striscia** ($\sigma = \sigma_v \cos^2\beta$, $\tau = \sigma_v \sin\beta \cos\beta$) e la relazione **$\tau/\sigma = \tan\beta$**

Mohr–Coulomb con fattore di sicurezza: $FS = c'/(\gamma H \cos^2\beta \tan\beta) + \tan\varphi'/\tan\beta$; profondità critica H_{cr}, profondità richiesta H_{req}, angolo richiesto β_{req}

Argilla non drenata (c_u, $\varphi = 0$) e l'effetto dell'**acqua**: falda freatica (filtrazione parallela al pendio), rapporto delle pressioni interstiziali r_u

Il fattore di sicurezza in **condizioni sismiche pseudostatiche** e il **coefficiente di snervamento k_y** (l'accelerazione orizzontale alla quale la massa inizia a scorrere)

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

Pendio di esempio: $\beta = 15°$, superficie di scorrimento verticale a 6 m di profondità; terreno $\gamma = 17.8$ kN/m³ (saturo 19.5), $c' = 10$ kPa, $\varphi' = 20°$; inizialmente nessuna pressione interstiziale. Le tensioni sono riferite all'unità di area del piano parallelo alla superficie.

Un concio dal volume di terreno

TEORIA

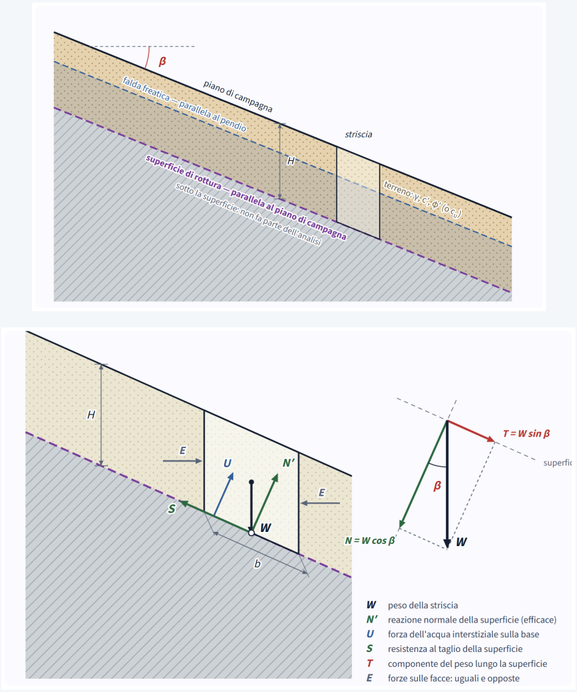
Molti scorrimenti di pendio sono superficiali: un sottile strato di terreno scivola lungo una superficie parallela alla superficie, a pochi metri di profondità; il pendio è così lungo che le sue estremità contano poco (un pendio di scavo o di rilevato dopo una stagione piovosa, un pendio naturale in argilla). Il **pendio indefinito** è il modello concepito per questo caso: la superficie di scorrimento è nelle stesse condizioni ovunque, perciò un concio della massa rappresenta l'insieme, e il suo equilibrio si riduce a poche righe.

Concio: lunghezza b lungo la superficie di scorrimento, 1 m di larghezza lungo il pendio; il piano si trova alla profondità verticale H sotto la superficie; le facce laterali sono verticali e **si annullano a vicenda** (il pendio è infinitamente lungo, il terreno è ovunque lo stesso).

$$W = \gamma H b \cos\beta \qquad N = W\cos\beta \quad T = W\sin\beta$$

$$\sigma = \frac{N}{b} = \sigma_v \cos^2\beta \qquad \tau = \frac{T}{b} = \sigma_v \sin\beta\cos\beta \qquad \frac{\tau}{\sigma} = \tan\beta$$

Nel concio privato delle facce laterali le tensioni sul piano sono inclinate quanto il pendio: τ/σ = tan β. Se al di sopra del piano sono presenti due pesi dell'unità di volume (falda freatica), si ha $\sigma_v = \gamma(H - h_w) + \gamma_{sat} h_w$; le equazioni restano invariate.



Traccia

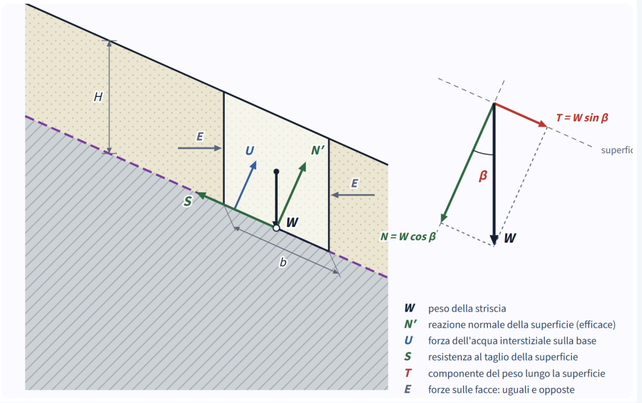
ESEMPIO

Dati

Pendio	$\beta = 15°$; **piano di scorrimento verticale a profondità** $H = 6$ **m**
Terreno	$\gamma = 17.8$ **kN/m³; assenza di pressione interstiziale**

RICHIESTO

Tensione verticale σ_V, tensione normale al piano σ e tensione tangenziale τ.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Tensione verticale

$$\sigma_v = \gamma H = 17.8 \times 6 = \mathbf{106.80}\ \text{kPa}$$

2 Tensione normale e tangenziale al piano

$$\sigma = \sigma_v \cos^2\beta = 106.80 \times 0.93301 = \mathbf{99.65}\ \text{kPa}$$

$$\tau = \sigma_v \sin\beta\cos\beta = 106.80 \times 0.25000 = \mathbf{26.70}\ \text{kPa} \qquad \frac{\tau}{\sigma} = 0.2679 = \tan 15^\circ \ \checkmark$$

Su un'area unitaria del piano agiscono una tensione normale **σ = 99.65 kPa** e una tensione tangenziale **τ = 26.70 kPa**; il rapporto τ/σ = 0.2679 = tan 15°, cioè la tensione è inclinata quanto il pendio.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Mohr–Coulomb, soluzione in forma chiusa, profondità critica

TEORIA

Il terreno lungo il piano porta la resistenza al taglio τ_f: nell'analisi drenata, la resistenza di Mohr–Coulomb dipendente dalla tensione normale efficace ($\sigma' = \sigma - u$). Il fattore di sicurezza è il rapporto tra resistenza e sollecitazione: coesione e attrito vengono ridotti dello stesso fattore finché la striscia è appena in equilibrio:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan\varphi' \qquad FS = \frac{\tau_f}{\tau} \qquad \sigma' = \sigma - u$$

In assenza di pressione interstiziale $\sigma' = \sigma$ e dalle tensioni si ricava una **soluzione in forma chiusa**:

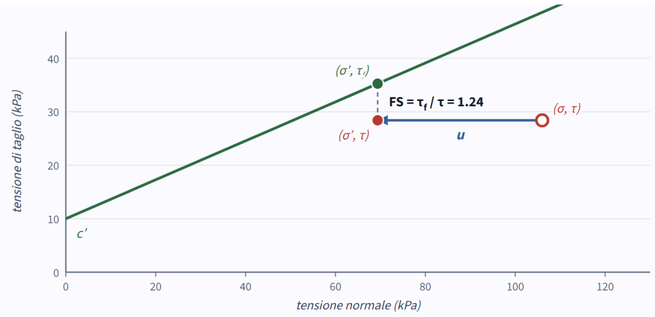
$$FS = \frac{c'}{\gamma H \cos^2\beta \, \tan\beta} + \frac{\tan\varphi'}{\tan\beta}$$

Terreno incoerente ($c' = 0$): $FS = \tan\varphi'/\tan\beta$; se il pendio è meno inclinato di φ', è stabile a qualsiasi profondità.

Terreno coesivo: la coesione sostiene il piano superficiale (FS elevato); all'aumentare della profondità FS diminuisce e si riduce alla sola attrito.

Se $\beta > \varphi'$ esistono una **profondità critica** in cui FS = 1 e una **profondità necessaria** in cui FS = FS_{req}; per il terreno incoerente β_{req}: $\tan\beta_{req} = \tan\varphi'/FS_{req}$:

$$H_{cr} = \frac{c'}{\gamma} \frac{1}{\cos^2\beta(\tan\beta - \tan\varphi')} \qquad H_{req} = \frac{c'}{\gamma \cos^2\beta \, (FS_{req} \tan\beta - \tan\varphi')}$$



Traccia

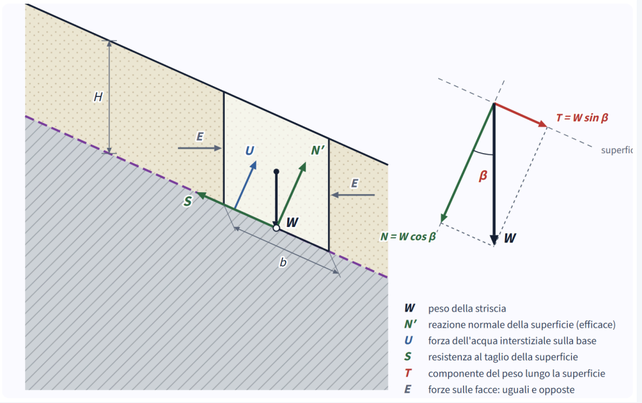
ESEMPIO

Dati

Pendio e terreno	**Esempio 1:** $\beta = 15°$, $H = 6$ **m,** $\gamma = 17.8$ **kN/m³;** $c' = 10$ **kPa,** $\varphi' = 20°$**; assenza di pressione interstiziale**

RICHIESTO

Il τ_f e il **FS** del piano; verifica mediante soluzione in forma chiusa.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Resistenza e fattore di sicurezza (con le tensioni dell'Esempio 1)

$$\tau_f = c' + \sigma \tan\varphi' = 10 + 99.65 \times 0.36397 = \mathbf{46.27}\ \text{kPa}$$

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{46.27}{26.70} = \mathbf{1.733}$$

2 Soluzione in forma chiusa (verifica)

$$FS = \frac{10}{17.8(6)(0.93301)(0.26795)} + \frac{0.36397}{0.26795} = 0.3745 + 1.3584 = \mathbf{1.7329}$$

Fattore di sicurezza **1.733**. Il termine di coesione vale 0.3745, il termine di attrito tan 20°/tan 15° = 1.3584: la somma dà lo stesso numero. Poiché il pendio (15°) è meno inclinato dell'angolo di attrito (20°), l'attrito da solo lo sostiene; la coesione aumenta il margine.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

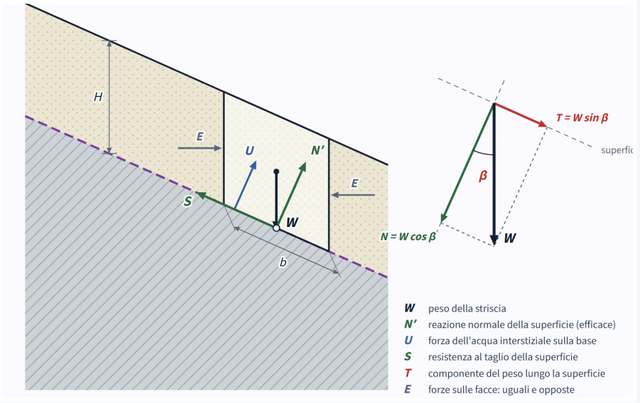
ESEMPIO

Dati

Terreno	**Terreno dell'Esempio 2 ($c' = 10$ kPa, $\varphi' = 20°$, $\gamma = 17.8$ kN/m³)**
Richiesto	**fattore di sicurezza richiesto $FS_{req} = 2.0$; inoltre la profondità critica per un pendio più ripido $\beta = 25°$**

RICHIESTO

H_{req} (β = 15°); **β_{req}** (H = 6 m); **H_{cr}** per β = 25°.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Profondità necessaria (β = 15°; FS_{req} = 2)

$$H_{req} = \frac{c'}{\gamma \cos^2\beta(FS_{req}\tan\beta - \tan\varphi')} = \frac{10}{17.8(0.93301)(2(0.26795) - 0.36397)} = \mathbf{3.50}\ \mathrm{m}$$

2 Angolo richiesto (H = 6 m): radice dell'equazione FS(β) = 2; profondità critica (β = 25°)

$$FS(\beta) = \frac{10}{106.8\cos^2\beta\tan\beta} + \frac{0.36397}{\tan\beta} = 2 \Rightarrow \beta_{req} = \mathbf{13.02}^\circ$$

$$H_{cr}(25^\circ) = \frac{10}{17.8(0.8214)(0.4663 - 0.3640)} = \mathbf{6.68}\ \mathrm{m}$$

Per FS = 2 il piano può trovarsi al massimo a **3.50 m** di profondità; a 6 m, per la stessa sicurezza, il pendio non deve essere più ripido di **13.0°**. Poiché β = 25° > φ′, esiste una profondità critica alla quale FS scende a 1: **6.68 m**. Nel pendio esistente (β < φ′) non vi è alcuna profondità critica.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Tensione totale: c_u e $\varphi = 0$

TEORIA

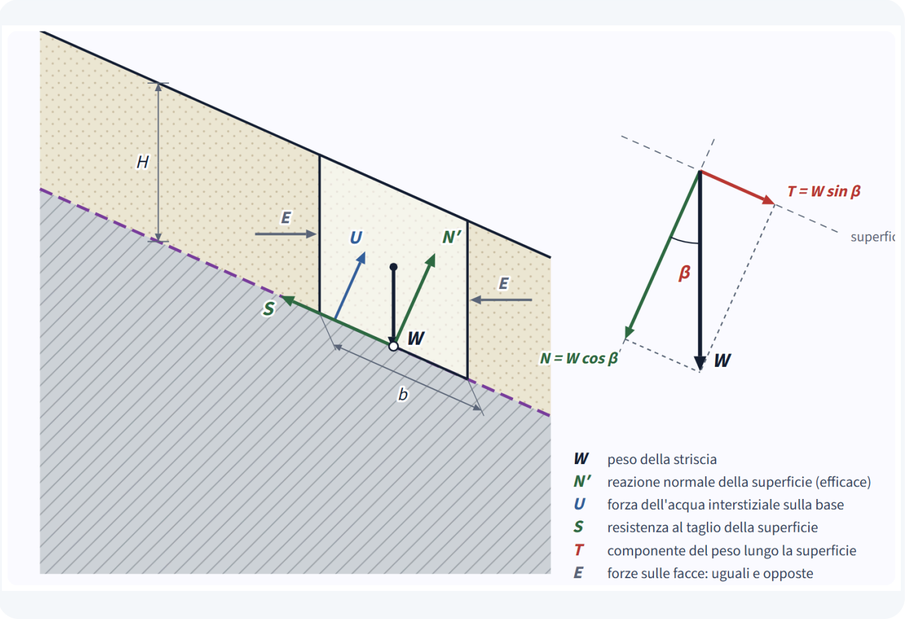
L'argilla satura caricata o scavata troppo rapidamente perché il drenaggio possa avvenire (condizione a breve termine di uno scavo in argilla molle) si risolve **in tensioni totali** con c_u e $\varphi = 0$. La resistenza non dipende dalla tensione normale; la pressione interstiziale non viene inserita:

$$FS = \frac{c_u}{\tau} = \frac{c_u}{\gamma H \sin\beta \cos\beta} = \frac{2c_u}{\gamma H \sin 2\beta}$$

$\tau = (\gamma H/2)\sin 2\beta$ è massimo per un pendio a 45°; FS è **inversamente proporzionale** alla profondità: un piano due volte più profondo ha un FS dimezzato.

Un'argilla stabile in condizioni non drenate a breve termine può non esserlo più una volta drenata: il lungo termine è un'**analisi drenata** con le pressioni interstiziali della falda freatica e i parametri drenati c', φ'.

$H_{cr} = c_u/(\gamma \sin\beta \cos\beta)$; $H_{req} = c_u/(FS_{req}\, \gamma \sin\beta \cos\beta)$; $\sin 2\beta_{req} = 2c_u/(FS_{req}\, \gamma\, H)$.



Traccia

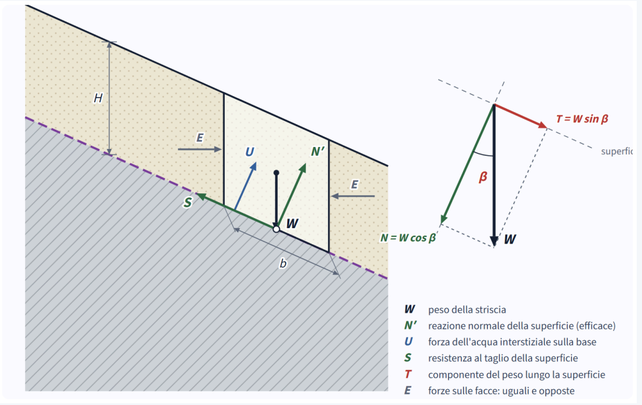
ESEMPIO

Dati

Pendio	$\beta = 15°$, $H = 6$ **m**, $\gamma = 17.8$ **kN/m³; argilla non drenata** $c_u = 40$ **kPa** ($\varphi = 0$)
Richiesto	$FS_{req} = 2.0$

RICHIESTO

FS, H_{cr}, H_{req}, β_{req}.



Soluzione

SOLUZIONE

1 Fattore di sicurezza e profondità critica

$$FS = \frac{c_u}{\gamma H \sin\beta \cos\beta} = \frac{40}{17.8(6)(0.2500)} = \frac{40}{26.70} = \mathbf{1.498}$$

$$H_{cr} = \frac{c_u}{\gamma \sin\beta \cos\beta} = \frac{40}{17.8(0.2500)} = \mathbf{8.99}\ \text{m}$$

2 Profondità e angolo necessari (FS_{req} = 2)

$$H_{req} = \frac{c_u}{FS_{req}\,\gamma \sin\beta \cos\beta} = \frac{8.99}{2} = \mathbf{4.49}\ \text{m}$$

$$\sin 2\beta_{req} = \frac{2c_u}{FS_{req}\gamma H} = \frac{80}{2(106.8)} = 0.3745 \;\Rightarrow\; \beta_{req} = \mathbf{11.00}^\circ$$

Con c_u = 40 kPa, **FS = 1.50** (1.73 in condizioni drenate). Per FS = 2 il pendio ha al massimo **11.0°**; H_{cr} = 8.99 m.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Filtrazione parallela al pendio; rapporto delle pressioni interstiziali r_u

TEORIA

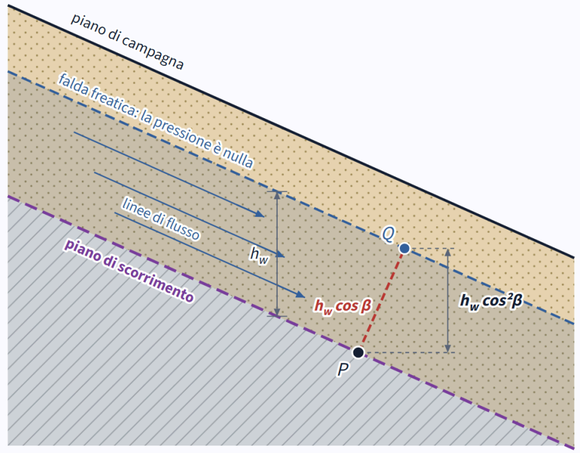
L'acqua riduce la tensione efficace tramite la pressione interstiziale u, annullando così la resistenza. Se la falda freatica si trova alla profondità z_W sotto la superficie (verticale), il terreno sovrastante ha peso dell'unità di volume γ e quello sottostante γ_{sat}; l'altezza d'acqua sopra il piano è $h_W = H - z_W$. Se l'acqua filtra parallelamente alla superficie, la linea equipotenziale passante per il punto P è perpendicolare al pendio; l'altezza di pressione vale $h_W \cos^2\beta$:

$$u = \gamma_w h_w \cos^2\beta \qquad \sigma' = \sigma - u \qquad FS = \frac{c' + \sigma' \tan\varphi'}{\tau}$$

$$\text{acqua in superficie: } FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} H \cos^2\beta \tan\beta} + \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \frac{\tan\varphi'}{\tan\beta} \qquad r_u = \frac{u}{\gamma H} : \; FS = \frac{c'}{\gamma H \cos^2\beta \tan\beta} + \left(1 - \frac{r_u}{\cos^2\beta}\right) \frac{\tan\varphi'}{\tan\beta}$$

Per il terreno incoerente con la falda freatica in superficie, FS = (γ′/γ_{sat}) tan φ′/tan β: poiché γ′/γ_{sat} ≈ ½, un pendio in sabbia che in condizioni asciutte si mantiene con β prossimo a φ′ richiede, in presenza di filtrazione, un pendio la cui tangente si riduce alla metà.

Se la pressione interstiziale proviene da un piezometro o da una rete di flusso, il rapporto del peso del terreno è fornito come r_u. Se risulta σ′ ≤ 0 (l'acqua solleva il terreno dal piano), l'attrito si annulla, resta solo la coesione e ciò viene segnalato.



Sulla linea equipotenziale
PQ il carico idraulico è il medesim in P e in Q.

In Q la pressione è nulla, quindi il carico di pressione in P è il dislivello tra P e Q:

$u / \gamma_w = h_w \cos^2\beta$

Traccia

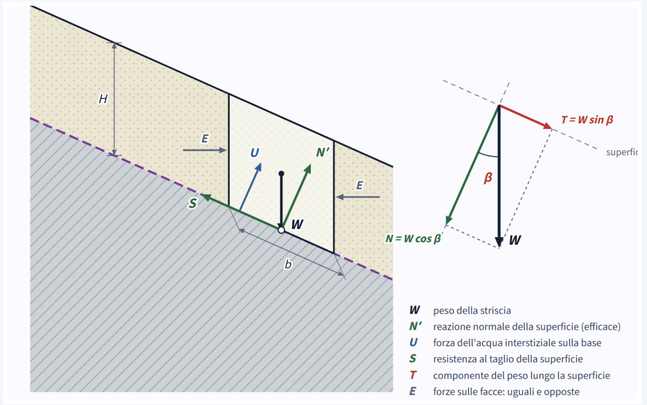
ESEMPIO

Dati

Pendio e terreno	**Il pendio dell'Esempio 2; $\gamma = 17.8$ (secco), $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m³**
Condizioni idriche	**(a) falda freatica a $z_w = 2$ m, filtrazione parallela al pendio; (b) acqua in superficie ($z_w = 0$); (c) $r_u = 0.25$**

RICHIESTO

In ogni caso **u**, **σ′**, **τ_f** e **FS**; confronto con il FS in condizioni asciutte.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 (a) Falda freatica a 2 m: $h_W = 6 - 2 = 4$ m

$$\sigma_v = 17.8(2) + 19.5(4) = 113.6 \text{ kPa}$$

$$\sigma = \sigma_v \cos^2\beta = 105.99 \text{ kPa} \quad \tau = \sigma_v \sin\beta\cos\beta = 28.40 \text{ kPa}$$

$$u = \gamma_w h_w \cos^2\beta = 9.81(4)(0.9330) = 36.61 \text{ kPa} \quad \sigma' = \sigma - u = 69.38 \text{ kPa}$$

$$FS = \frac{10 + 69.38(0.36397)}{28.40} = \frac{35.25}{28.40} = \mathbf{1.241}$$

Con la falda freatica a 2 m, FS diminuisce dal valore di 1.73 del caso asciutto a **1.24**: l'acqua aumenta sia il peso del terreno (σ_v) sia la pressione interstiziale (36.6 kPa).

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

2 Sintesi delle tre condizioni di falda (stesse equazioni)

Condizione	σ_v (kPa)	σ (kPa)	τ (kPa)	u (kPa)	σ' (kPa)	τ_f (kPa)	FS
Asciutto	106.8	99.65	26.70	0.00	99.65	46.27	**1.733**
(a) z_w = 2 m	113.6	105.99	28.40	36.61	69.38	35.25	**1.241**
(b) acqua in superficie	117.0	109.16	29.25	54.92	54.25	29.74	**1.017**
(c) r_u = 0.25	106.8	99.65	26.70	26.70	72.95	36.55	**1.369**

Con acqua in superficie FS = **1.02**, quasi al valore limite; per r_u = 0.25 vale **1.37**. Un pendio con ampio margine di sicurezza allo stato asciutto non ha alcun margine allo stato umido: il modulo mostra, accanto al risultato, i valori di FS per il caso asciutto e per acqua in superficie.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Forza orizzontale e verticale; coefficiente di snervamento k_y

TEORIA

La scossa sismica viene sostituita da un'accelerazione costante (una frazione di g) applicata alla massa al di sopra del piano. Oltre al peso W, il concio porta una forza orizzontale $\mathbf{k_h W}$ diretta verso valle lungo il pendio e una forza verticale $\mathbf{k_v W}$ verso l'alto o verso il basso; k_h e k_v sono coefficienti scelti dal progettista (il modulo non li ricava dalla normativa). Per unità di area $W/A = \sigma_v \cos\beta$:

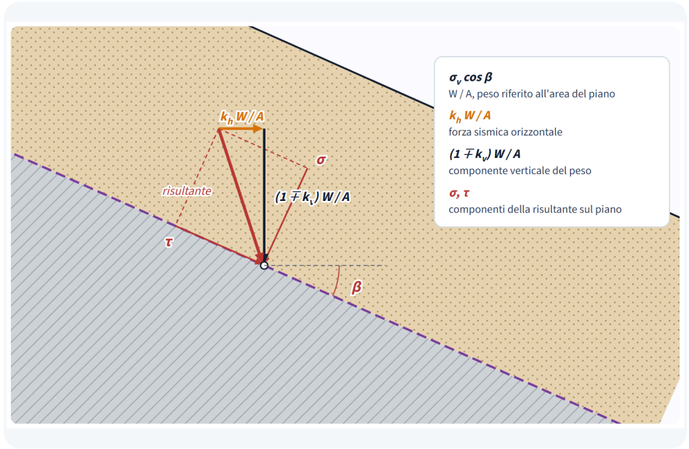
$$\sigma = \sigma_v \cos\beta\,[(1 \mp k_v)\cos\beta - k_h \sin\beta] \qquad \tau = \sigma_v \cos\beta\,[(1 \mp k_v)\sin\beta + k_h \cos\beta]$$

La pressione interstiziale è il valore statico (non si aggiunge la scossa): $\sigma' = \sigma - u$; $FS_{eq} = \tau_f/\tau$ con i nuovi σ e τ. La forza orizzontale riduce la tensione normale e aumenta la tensione tangenziale.

Si provano entrambi i versi della forza verticale e si adotta quello che fornisce il **FS minore**: nel terreno attritivo è di solito quello rivolto verso l'alto (alleggerisce la massa e riduce la tensione normale); nell'argilla in condizioni di tensione totale, poiché c_u non dipende dalla tensione normale, è quello rivolto verso il basso, che incrementa la tensione tangenziale.

Coefficiente di snervamento k_y: il coefficiente orizzontale che rende $FS_{eq} = 1$. Terreno asciutto, incoerente, $k_v = 0$: $k_y = \tan(\varphi' - \beta)$; negli altri casi si determina aumentando k_h a partire da zero. Una scossa che non supera $k_y g$ non mette in movimento la massa; una che la supera sì (di quanto si sposti è oggetto dell'analisi del blocco scorrevole, non inclusa nel modulo).

$$k_y = \frac{\tan\varphi' - \tan\beta}{1 + \tan\varphi' \tan\beta} = \tan(\varphi' - \beta)$$



Traccia

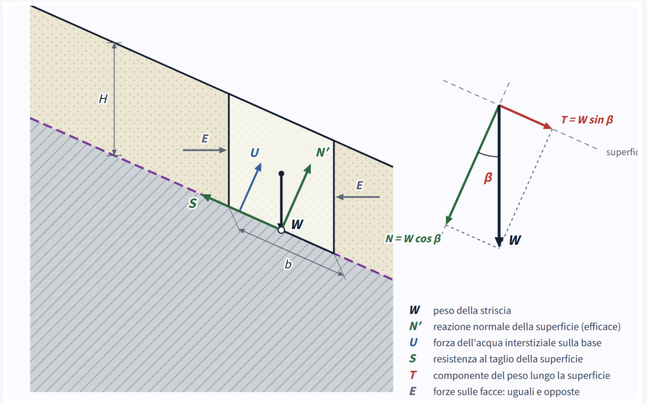
ESEMPIO

Dati

Pendio e terreno	**Pendio in condizioni asciutte dell'Esempio 2 ($c' = 10$ kPa, $\varphi' = 20°$, $\beta = 15°$, $H = 6$ m)**
Sisma	**$k_h = 0.15$, $k_v = 0.05$ (si provano due direzioni); inoltre per sabbia asciutta $\varphi' = 32°$, $\beta = 25°$**

RICHIESTO

σ, **τ**, **FS_{eq}** (direzione critica); la tabella $FS(k_h)$ e **k_y**; k_y in sabbia asciutta.



Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

1 Direzione critica: forza verticale verso l'alto (k_v = +0.05 alleggerisce)

$$\sigma = \sigma_v \cos\beta\,[0.95\cos\beta - 0.15\sin\beta] = 103.16\,[0.8788] = 90.66\ \text{kPa}$$

$$\tau = \sigma_v \cos\beta\,[0.95\sin\beta + 0.15\cos\beta] = 103.16\,[0.3908] = 40.31\ \text{kPa}$$

$$FS_{eq} = \frac{10 + 90.66(0.36397)}{40.31} = \frac{43.00}{40.31} = \mathbf{1.067} \qquad (k_v \text{ di seguito: } 1.085)$$

La forza verticale verso l'alto è determinante: FS_{eq} = **1.067** (1.085 verso il basso).

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

2 FS(k_h) e coefficiente di snervamento (dove FS = 1)

k_h	σ (kPa)	τ (kPa)	τ_f (kPa)	FS_{eq}
0.00	94.66	25.36	44.45	**1.753**
0.05	93.33	30.35	43.97	**1.449**
0.10	91.99	35.33	43.48	**1.231**
0.15	90.66	40.31	43.00	**1.067**
0.1746	90.00	42.76	42.76	**1.000**
0.20	89.32	45.29	42.51	**0.939**

Il sisma riduce FS da 1.73 a **1.07** (la forza verticale diretta verso l'alto risulta determinante). **k_y = 0.175**: se k_h supera questo valore, la massa inizia a scorrere. In sabbia asciutta (φ′ = 32°, β = 25°) k_y = tan 7° = 0.1228.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

FS; H_{req}, β_{req}, H_{cr}

TEORIA

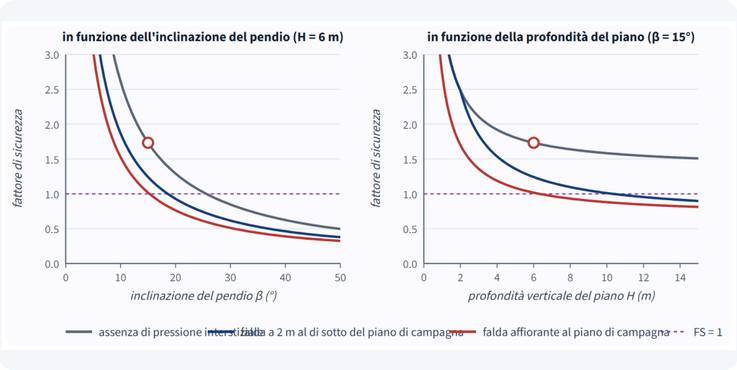
FS nei confronti dell'inclinazione: FS diminuisce regolarmente con β; la distanza tra le curve indica quanto margine sottrae l'acqua; l'angolo in cui la curva interseca FS_{req} è β_{req}.

FS in funzione della profondità: la curva del terreno coesivo scende da un valore elevato in superficie al livello governato dall'attrito; il punto in cui interseca FS = 1 è la profondità critica. La falda freatica lascia una traccia alla profondità in cui l'acqua raggiunge per la prima volta il piano; al di sopra si segue la curva in condizioni asciutte.

FS nei confronti dell'acqua: aumenta all'approfondirsi della falda freatica e diminuisce all'aumentare di r_u; mostra quanto un pendio drenato dipenda dalla pressione interstiziale, difficile da conoscere.

In condizioni sismiche ogni grafico presenta una seconda linea (arancione); il quinto grafico di FS in funzione di k_h fornisce k_y nel punto in cui interseca FS = 1.

Oltre a FS e al confronto con il valore richiesto, la scheda Risultati fornisce: **H_{req}** (la prima profondità alla quale FS scende a FS_{req}; “nessun limite” se non scende), **β_{req}** (l'angolo più ripido, a partire dall'angolo piatto, al quale FS_{req} è ancora soddisfatto), **H_{cr}**, i due estremi dell'acqua (nessuna pressione interstiziale / acqua in superficie) e, per il sisma, FS_{eq}, k_y.



Traccia

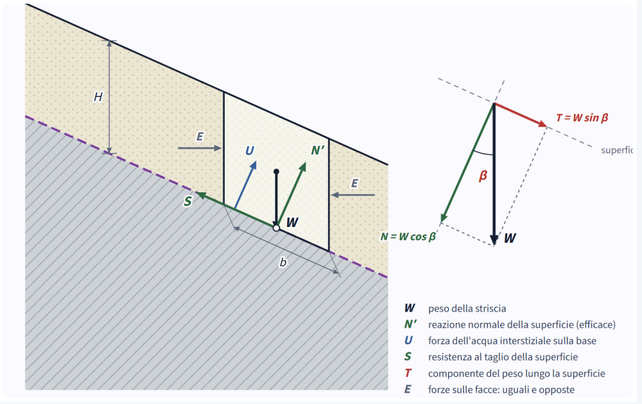
ESEMPIO

Dati

Terreno	**Il terreno dell'Esempio 2 ($c' = 10$ kPa, $\varphi' = 20°$, $\gamma = 17.8$, $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m³)**
Tabella	**Valori di FS per $\beta = 10,\ 15,\ 20,\ 25,\ 30°$ e $H = 2,\ 4,\ 6,\ 8$ m in condizioni asciutte e con falda freatica a $z_w = 2$ m (con soluzione in forma chiusa)**

RICHIESTO

Tabella $FS_{kuru}(\beta, H)$; per falda freatica a H = 6 m; oltre quale angolo risulta FS < 1?



Soluzione

SOLUZIONE

1 FS = c′/(γH cos²β tan β) + tan φ′/tan β (secco); nel caso di falda freatica, dalle tensioni (in grassetto: FS < 1)

β (°)	H = 2 m	H = 4 m	H = 6 m	H = 8 m	H = 6, z_w = 2 m
10	3.707	2.885	2.612	2.475	1.866
15	2.482	1.920	1.733	1.639	1.241
20	1.874	1.437	1.291	1.219	**0.928**
25	1.514	1.147	1.025	**0.964**	**0.741**
30	1.279	**0.955**	**0.847**	**0.793**	**0.616**

FS diminuisce regolarmente con l'angolo e si riduce con la profondità (il contributo della coesione). A partire da β = 20° e H = 8 m anche un pendio asciutto si avvicina al limite; una falda freatica a z_w = 2 m, con H = 6 m, porta FS **al di sotto di 1** a partire da 20° (0.62 a 30°). Per questo si ricercano β_{req} e H_{req}.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Che cosa assume il modello

TEORIA

Modello: pendio indefinito: piano di campagna piano, superficie di scorrimento a esso parallela a profondità verticale H; le estremità della massa non hanno ruolo; le condizioni sono identiche ovunque; bidimensionale, 1 m lungo il pendio.

Terreno: un unico terreno al di sopra del piano (resistenza e peso dell'unità di volume assegnati); strati, terreno variabile lungo il pendio o con la profondità e resistenza crescente con la profondità non sono inclusi in questo modello; per l'interfaccia con uno strato debole si possono utilizzare le proprietà di quello strato oppure il modulo Stabilità dei pendii.

Acqua: falda freatica con flusso parallelo al pendio ($u = \gamma_w h_w \cos^2\beta$) oppure r_u; la pressione interstiziale non si calcola dalle precipitazioni né dalla permeabilità. **Resistenza**: Mohr–Coulomb in tensioni efficaci oppure c_u; se $\sigma' \leq 0$ l'attrito è nullo. Nessuna resistenza residua, nessuna rottura progressiva, nessun effetto delle radici.

Sisma: solo pseudostatico; la scossa non incrementa la pressione interstiziale; non si analizzano amplificazione, durata, pressione interstiziale residua di terreni sciolti saturi e spostamento permanente; i coefficienti sono a scelta del progettista.

Nessuno: sovraccarico, fessura di trazione, rinforzo, muro al piede. FS è il valore relativo a un unico piano a un'unica profondità; non si ricerca un piano più debole non parallelo alla superficie. Se il pendio è corto rispetto alla profondità, oppure il terreno o l'acqua variano lungo il pendio, gli effetti di estremità sono rilevanti: si utilizza il modulo Stabilità dei pendii.

Sintesi

Punti chiave

Carico a striscia: $\sigma = \sigma_v \cos^2\beta$, $\tau = \sigma_v \sin\beta \cos\beta$, $\tau/\sigma = \tan\beta$ (nell'esempio $\sigma = 99.65$, $\tau = 26.70$ kPa)

FS = $(c' + \sigma' \tan\varphi')/\tau = c'/(\gamma H \cos^2\beta \tan\beta) + \tan\varphi'/\tan\beta$ = **1,733**; $H_{req} = 3.50$ m ($FS_{req} = 2$), $\beta_{req} = 13.0°$; se $\beta > \varphi'$ allora H_{cr}

Argilla non drenata: $FS = c_u/(\gamma H \sin\beta \cos\beta) = 1.50$; inversamente proporzionale alla profondità

Acqua: $u = \gamma_w h_w \cos^2\beta$; FS 1.73 → 1.24 ($z_w = 2$ m) → 1.02 (in superficie); $r_u = 0.25$ → 1.37

Sisma: $k_h W$ orizzontale e $k_v W$ verticale; si assume la direzione critica (verso l'alto); FS 1.73 → 1.07; **$k_y = 0.175$**; $\tan(\varphi' - \beta)$ per terreno asciutto incoerente

Limite: piano singolo, pendio indefinito; se le estremità o gli strati sono significativi, si utilizza Stabilità dei pendii (conci)

Bibliografia

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage Learning, Boston. Chapter 15, Slope Stability: the infinite slope in Sections 15.2–15.4.

Skempton, A.W. and DeLory, F.A. (1957). Stability of natural slopes in London Clay. Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, 2, 378–381.

Bishop, A.W. and Morgenstern, N.R. (1960). Stability coefficients for earth slopes. Géotechnique, 10(4), 129–150.

Duncan, J.M., Wright, S.G. and Brandon, T.L. (2014). Soil Strength and Slope Stability, 2nd ed. Wiley, Hoboken.

Newmark, N.M. (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments. Géotechnique, 15(2), 139–160.

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 nella pagina del modulo è questo pendio (β = 15°, H = 6 m, γ = 17.8, c′ = 10 kPa, φ′ = 20°).

GeoTerva

Calcoli geotecnici online

Dalla teoria alla pratica

Inserire in GeoTerva l'angolo del proprio pendio, la profondità del piano, la resistenza del terreno (drenata o non drenata), l'acqua e i coefficienti sismici; il modulo fornisce insieme le tensioni, il fattore di sicurezza, la profondità critica e quella necessaria, l'angolo necessario, il coefficiente di snervamento e i grafici.

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