

QUADERNI PER LA PROGETTAZIONE

---

# ESERCIZI RISOLTI DI INGEGNERIA GEOTECNICA E GEOLOGIA APPLICATA

Paratie, spinta delle terre, tiranti di ancoraggio, abbassamento della falda, filtrazione e sifonamento, geopedologia, meccanica delle rocce, idrochimica, pericolosità geologiche. Concetti di base, equazioni, metodi di calcolo ed esempi applicativi

VOLUME 2

di  
GIULIO RIGA

 **EPC**  
EDITORE

# INDICE GENERALE

Premessa .....	11
Introduzione .....	13

---

## CAPITOLO 1

PARATIE .....	15
1.1 Paratie .....	15
1.2 Paratia in terreno coerente .....	16
1.3 Paratia in terreno incoerente .....	18
1.4 Paratia con pali .....	19

---

## CAPITOLO 2

SPINTA DELLE TERRE .....	33
2.1 Teoria di Rankine .....	34
2.2 Teoria di Coulomb .....	35
2.3 Teoria di Okabe e Mononobe .....	36

---

## CAPITOLO 3

TIRANTI DI ANCORAGGIO .....	49
3.1 Caratteristiche geometriche .....	49
3.2 Parti funzionali del tirante .....	50
3.3 Durata di esercizio .....	50
3.4 Tipologia di tiranti .....	50
3.5 Denominazione in base alla tensione iniziale .....	51
3.6 Situazioni ambientali e geotecniche .....	52
3.7 Progetto dei tiranti .....	53



3.8	Determinazione della lunghezza attiva .....	55
3.9	Determinazione della forza ultima della fondazione .....	57
3.10	Verifiche di sicurezza (SLU) .....	58

---

## CAPITOLO 4

<b>ABBASSAMENTO DELLA FALDA</b> .....	69	
4.1	Introduzione .....	69
4.2	Sistema di Wellpoints .....	70
4.3	Dreni orizzontali .....	70
4.4	Trincee drenanti .....	71
4.5	Dreni sub-orizzontali .....	72
4.6	Pozzi .....	74
4.7	Raggio d'influenza .....	75
4.8	Portata di un pozzo singolo completo in falda freatica ed artesiane .....	77
4.9	Abbassamento in un pozzo singolo completo in falda freatica ....	80
4.10	Distanziamento dei wellpoints .....	81
4.11	Portata complessiva emungibile da un sistema di wellpoints .....	83
4.12	Abbassamento con due file di wellpoints incompleti in falda freatica .....	85

---

## CAPITOLO 5

<b>FILTRAZIONE E SIFONAMENTO</b> .....	105	
5.1	Linea di saturazione .....	105
5.2	Portata di filtrazione .....	106

---

## CAPITOLO 6

<b>ESERCIZI DI GEOPEDOLOGIA</b> .....	119	
6.1	Classificazione del suolo .....	119



6.1.1	<i>Rocciosità</i> .....	119
6.1.2	<i>Pietrosità superficiale del suolo</i> .....	119
6.1.3	<i>Scheletro</i> .....	120
6.1.4	<i>Tessitura</i> .....	121
6.2	Capacità di accettazione delle piogge .....	125
6.3	Conducibilità idraulica verticale satura .....	127
6.4	Reazione del suolo (pH) .....	133
6.5	Aspetto e gradiente del pendio .....	135
6.6	Profondità del suolo .....	135
6.7	Umidità del suolo .....	136
6.8	Umidità equivalente .....	138
6.9	Capacità di campo .....	139
6.10	Peso specifico apparente .....	139
6.11	Indice del tipo pedologico .....	140
6.12	Salinità del terreno .....	142
6.13	Carta dell'uso del suolo .....	143

---

## CAPITOLO 7

	MECCANICA DELLE ROCCE .....	149
7.1	Resistenza alla compressione monoassiale .....	149
7.2	ROD (Rock Quality Designation Index) .....	157
7.3	Proiezioni stereografiche .....	160
7.4	Classificazione di Bieniawski .....	168
7.5	Classificazione di Barton .....	174
7.6	Classificazione di Hoek .....	179

---

## CAPITOLO 8

	IDROCHIMICA .....	191
8.1	Bilancio ionico .....	191

8.2	Concentrazioni limite .....	191
8.3	Rapporti caratteristici .....	195
8.4	Formula ionica .....	198
8.5	Durezza dell'acqua .....	203
8.6	Conducibilità elettrica .....	205
8.7	Classificazione dell'acqua .....	207
8.8	Potere incrostante ed aggressività dell'acqua .....	210
8.9	Rappresentazioni grafiche del chimismo .....	213
8.9.1	<i>Diagramma Piper</i> .....	213
8.9.2	<i>Diagramma di Langelier e Ludwig</i> .....	214
8.9.3	<i>Diagramma Schoeller</i> .....	216
8.9.4	<i>Diagramma di Stiff</i> .....	217
8.9.5	<i>Diagramma di Collins</i> .....	218
8.9.6	<i>Diagramma a torta</i> .....	219
8.9.7	<i>Diagramma radiale</i> .....	219
8.10	Classificazione di un corpo idrico sotterraneo .....	226
8.11	Classificazione di un corpo idrico superficiale .....	233
8.12	Percentile .....	240
8.13	Monitoraggio delle acque sotterranee .....	242

---

## CAPITOLO 9

PERICOLOSITÀ GEOLOGICHE .....	251
9.1 Pericolosità geologiche .....	251
9.2 Liquefazione dei terreni .....	251
9.3 Analisi qualitativa .....	252
9.4 D.M. Infrastrutture 14 gennaio 2008 .....	253
9.5 Analisi quantitativa .....	254
9.5.1 <i>Metodo raccomandato dalla NCEER Report</i> .....	254
9.5.2 <i>Valutazione del rapporto di sforzo ciclico CSR (Cyclic Stress Ratio)</i> .....	255



9.5.3	Fattore di riduzione delle tensioni ( $r_d$ ) .....	255
9.5.4	Calcolo di $N_{60}$ e $(N1)_{60}$ .....	256
9.5.5	Influenza del contenuto in fini .....	260
9.5.6	Capacità di resistenza alla liquefazione, $CRR_{7,5}$ dai dati SPT.....	261
9.5.6.1	Metodo modificato di Robertson e Wride's .....	263
9.5.6.2	Calcolo della resistenza penetrometrica statica normalizzata, $(q_{c1N})$ .....	264
9.5.6.3	Influenza del contenuto in fini .....	264
9.5.6.4	Valutazione della resistenza alla liquefazione $CRR$ (Cyclic Resistance Ratio).....	265
9.5.7	Capacità di resistenza alla liquefazione, $CRR_{7,5}$ da prove sismiche .....	266
9.5.7.1	Valutazione della velocità delle onde di taglio corretta .....	266
9.5.7.2	Valutazione della resistenza alla liquefazione, $CRR$ (Cyclic Resistance Ratio) .....	267
9.6	Curve per probabilità di liquefazione .....	268
9.7	Calcolo della resistenza alla liquefazione corretta della magnitudo .....	271
9.8	Calcolo di $CRR_{eq}$ corretta dello sforzo di sovrappressione .....	271
9.9	Fattore di sicurezza alla liquefazione .....	272
9.10	Livelli di prestazione .....	272
9.11	Stima della probabilità di liquefazione .....	273
9.12	Indice di severità della liquefazione, $L_s$ .....	274
9.13	Accelerazione critica (Back analysis) .....	275
9.14	Valutazione degli effetti della liquefazione .....	275
9.15	Liquefazione nei terreni ghiaiosi .....	278
9.16	Dislocazioni laterali (lateral spreading) .....	303
9.16.1	Metodi empirici.....	304
9.16.2	Metodo Hamada e al. (1986).....	304
9.16.3	Metodo di Youd e Perkins (1987).....	305
9.16.4	Metodo di Bartlett e Youd (1995).....	305

9.16.5	<i>Metodo di Youd e al. (2002)</i> .....	307
9.17	Cedimenti sismici .....	309
9.18	Rottura di faglia in superficie .....	312
9.19	Amplificazione sismica .....	314
9.19.1	<i>Categorie di sottosuolo</i> .....	314
9.19.2	<i>Condizioni topografiche</i> .....	317
9.19.3	<i>Volume significativo</i> .....	318
9.20	Frane .....	323
9.20.1	<i>Procedura Prefettura di Fukuoka modificata</i> .....	323
9.21	Tsunami .....	328
9.21.1	<i>Procedura Hills and Mader (1997)</i> .....	328
 Bibliografia .....		 331

# PREMESSA

Dopo aver passato anni a sviluppare procedure di calcolo per software tecnici, ho deciso di diffondere sia i presupposti teorici che le metodologie di calcolo necessarie per la determinazione dei risultati numerici.

Questo volume, ideato non solo per gli studenti ma anche per il giovane professionista, può essere considerato come un manuale dove trovare i presupposti teorici e le metodologie di base per la risoluzione di problemi di geologia applicata e di ingegneria geotecnica.

Vi invito a segnalarmi non solo gli errori, ma eventuali suggerimenti o commenti in modo da effettuare le modifiche necessarie per un continuo miglioramento del testo.

Voglio concludere ringraziando il Dr. Alessandro Cittadino per l'aiuto dato nella preparazione dei grafici contenuti nel testo

Giulio Riga





# INTRODUZIONE

Questo testo nasce essenzialmente da una raccolta di esercizi sviluppati per essere utilizzati nelle diverse situazioni di lavoro che si sono presentate e nei programmi di calcolo automatico realizzati a partire dal 1985.

Il libro, sia nelle sue parti che nel suo insieme, si configura come un manuale pratico aggiornato e di duttile impiego che contiene una vasta selezione di esercizi svolti.

Lo scopo è quello di offrire una panoramica delle possibilità di calcolo che si hanno nel campo dell'ingegneria geotecnica e della geologia applicata e di far acquisire il metodo di calcolo per lo svolgimento dei problemi proposti utilizzando solo carta e penna.

Le procedure di calcolo proposte, sperimentate da vari autori in casi reali, presuppongono un minimo di conoscenze teoriche delle tematiche trattate.

Al tal fine, ho ritenuto utile presentare ciascun esercizio accompagnato da una breve descrizione del tema trattato, dei metodi di calcolo utilizzati e delle formule necessarie per risolverlo.

Per maggiori approfondimenti si consiglia al lettore di consultare i testi dove i temi proposti e le procedure utilizzate sono trattati con maggior dettaglio.

Il volume esplora alcuni dei più importanti argomenti dell'ingegneria geotecnica e della geologia applicata:

1. *Paratie*
2. *Spinta delle terre*
3. *Tiranti di ancoraggio*
4. *Abbassamento della falda*
5. *Filtrazione e sifonamento*
6. *Geopedologia*
7. *Meccanica delle rocce*
8. *Idrochimica*
9. *Pericolosità geologiche*



# PARATIE

## 1.1 Paratie

Le paratie sono strutture di sostegno, costituite in genere da pali o pannelli continui o accostati, infissi nel terreno per una sufficiente profondità al di sotto del piano di scavo in modo da contrastare la spinta del terrapieno, dell'acqua e di eventuali sovraccarichi.

Queste strutture di sostegno risultano abbastanza economiche solo se l'altezza è moderata, poiché la sezione di esse aumenta rapidamente con l'aumentare dell'altezza.

Nella figura 1.1 è schematizzata una paratia infissa in un terreno incoerente. Sul lato destro agisce una spinta attiva  $S_a$  su un'altezza  $h+d$  che deve essere contrastata dalla resistenza passiva del suolo che agisce sul lato sinistro nel tratto  $d$ .

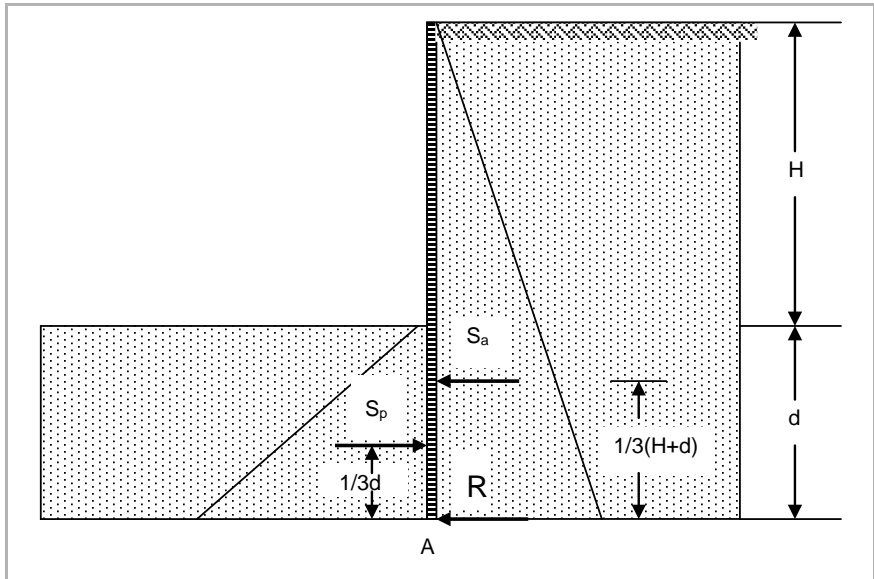
La minor profondità d'infissione affinché la paratia risulti in equilibrio sotto l'azione della spinta attiva e passiva è ottenuta facendo l'equilibrio dei momenti attorno al punto A, tenendo conto anche della spinta dell'acqua e di eventuali sovraccarichi.

Per maggior sicurezza, la profondità d'infissione calcolata deve essere aumentata del 20%, in modo da sviluppare la controspinta  $R$  su un'area maggiore oppure si può dividere il coefficiente di spinta passiva  $k_p$  per un coefficiente di sicurezza usualmente pari a 1.5 per ottenere una profondità d'infissione maggiore di  $d$ .

In caso di terreni coerenti, il metodo di calcolo è lo stesso di quello dei suoli granulari eccetto che per la stabilità la quale deve essere esaminata per la condizione a breve termine ( $c \neq 0$   $\varphi = 0$ ) e a lungo termine ( $c = 0$   $\varphi \neq 0$ ).



**Figura 1.1**  
Paratia infissa  
in un terreno  
incoerente



## 1.2 Paratia in terreno coerente

Formule utilizzate

$$Z_c = \frac{2 \cdot c}{\gamma}$$

dove

$Z_c$  = punto in cui la pressione è zero;

$c$  = coesione;

$\gamma$  = peso di volume.

$$P_a = \gamma \cdot H - 2 \cdot c \quad P_p = 4 \cdot c - \gamma \cdot H$$

dove

$P_a$  = pressione attiva;

$P_p$  = pressione passiva;

$H$  = altezza della paratia.

$$S_a = 0.5 \cdot P_a \cdot (H - Z_c)$$

dove

$S_a$  = spinta attiva

$$X_a = d \cdot 1/3 \cdot (H - Z_c)$$

dove

$X_a$  = distanza dal punto C;

$d$  = profondità d'infissione.

$$S_p = P_p \cdot d$$

dove

$S_p$  = spinta passiva

$$X = 0.5 \cdot d$$

dove

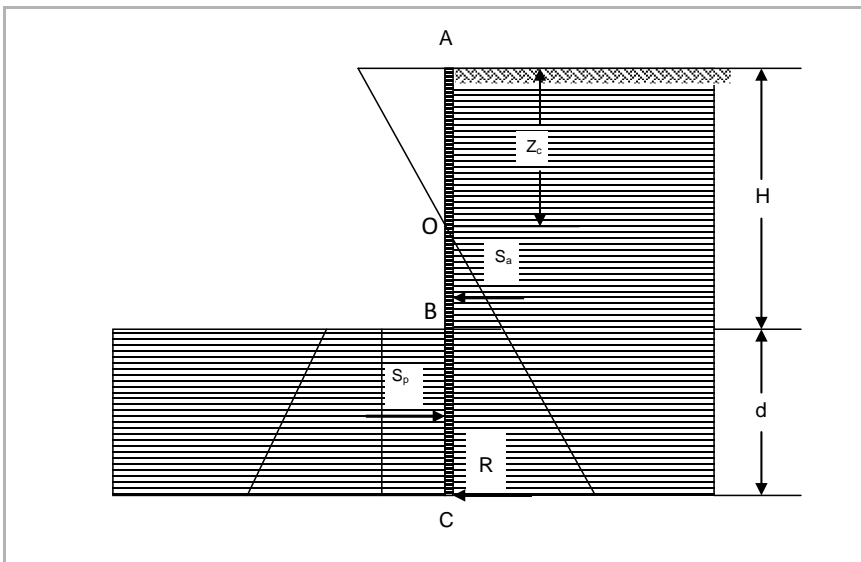
$X_p$  = distanza dal punto C

$$M_a = S_a \cdot X_a$$

$$M_p = S_p \cdot X_p$$

dove

$M_a - M_p$  = momenti rispetto al punto C



**Figura 1.2**  
Paratia infissa in  
un terreno  
coerente

### 1.3 Paratia in terreno incoerente

Formule utilizzate

$$k_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

$$k_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

dove

$k_a$  = coefficiente di spinta attiva;

$k_p$  = coefficiente di spinta passiva.

Pressioni attive

Al punto A  $P_a = k_a \cdot q$

$$B \quad P_b = P_a + k_a \cdot \gamma \cdot H_1$$

$$D \quad P_d = P_b + k_a \cdot \gamma' \cdot H$$

$$E \quad P_e = P_d + k_a \cdot \gamma' \cdot d$$

Pressione passiva

$$P_p = k_p / C_c \cdot \gamma' \cdot d$$

dove

$q$  = sovraccarico;

$\gamma$  = peso di volume;

$\gamma'$  = peso di volume immerso;

$H_1$  = profondità della falda;

$H$  = spessore della falda tra B e D;

$d$  = profondità d'infissione

$C_s$  = coefficiente di sicurezza

Spinte agenti sulla paratia

$$S_1 = P_a \cdot H_1$$

$$S_2 = 0,5 \cdot (P_b - P_a) \cdot H_1$$

$$S_3 = P_b \cdot H$$

$$S_4 = 0,5 \cdot (P_d - P_b) \cdot H$$

$$S_5 = P_e \cdot d$$

$$S_6 = 0,5 \cdot (P_e - P_d) \cdot d$$

$$S_7 = -0,5 \cdot P_p \cdot d$$

Profondità d'infissione

$$\sum M_i = 0$$

dove

M = momento della spinta

Forza dell'ancoraggio

$$T = \sum S_i$$

dove:

S = spinta

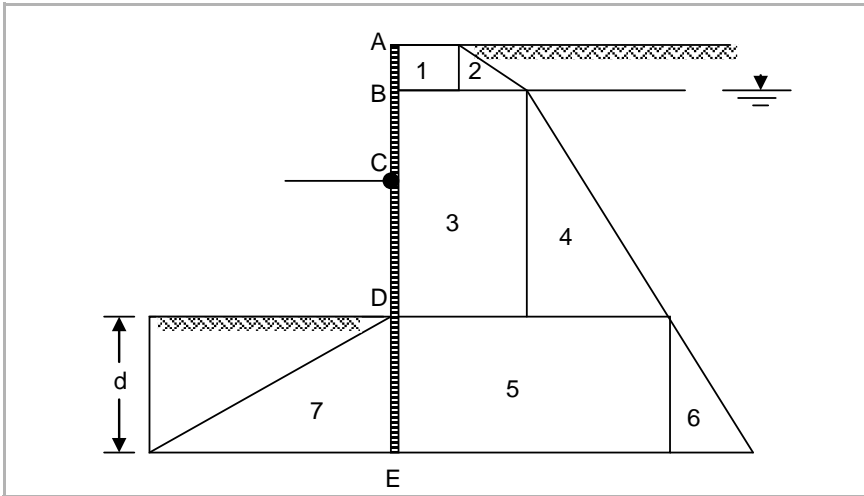


Figura 1.3  
Paratia infissa  
in un terreno  
incoerente

## 1.4 Paratia con pali

Formule utilizzate

Spinta attiva

$$F = 0,5 \cdot k_a \cdot \gamma \cdot H^2$$

dove

$k_a$  = coefficiente di spinta attiva;

- $\gamma$  = peso di volume;  
 $H$  = altezza della paratia.

$$k_a = \cos \beta \cdot \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}$$

- dove  
 $\beta$  = inclinazione del terrapieno  
 $\varphi$  = angolo di attrito interno

Controspinta  $R$  ( $\sum M = 0$ )

$$R = \frac{F \cdot X_1}{X_2}$$

- dove:  
 $F$  = spinta del terrapieno;  
 $X_1$  = distanza di  $F$  rispetto il punto  $P$ ;  
 $X_2$  = distanza di  $R$  rispetto il punto  $P$ .

Spinta passiva

$$P = R + F$$

Pressione passiva ultima ( $P_u$ ) a  $L/3$

$$P_u = \gamma_1 \cdot L/3 + \gamma \cdot H + 2 \cdot c$$

- dove  
 $\gamma_1$  = peso di volume del substrato;  
 $L$  = profondità d'infissione;  
 $\gamma$  = peso di volume del terrapieno;  
 $H$  = altezza della paratia;  
 $c$  = coesione del substrato.

Pressione massima  $P_{\max}$

$$P_{\max} = 1.5 \cdot P / (2/3 \cdot L \cdot D)$$

- $D$  = diametro del palo

Coefficiente di sicurezza

$$C_s = P_u / P_{\max} > 2$$

Pressione passiva ultima ( $R_u$ ) a  $8/9 L$

$$R_u = \gamma_1 \cdot (8/9 \cdot L) + \gamma \cdot H + 2 \cdot c$$

Pressione media  $R_m$

$$R_m = R/(1/3 \cdot L \cdot D)$$

Coefficiente di sicurezza

$$C_s = R_u/R_m > 2$$

Pressione passiva ultima ( $R_u$ ) a  $L$

$$R_u = \gamma_1 \cdot L + \gamma \cdot H + 2 \cdot c$$

Pressione massima  $R_{max}$

$$R_{max} = 2 \cdot R_{media}$$

Coefficiente di sicurezza

$$C_s = R_u/R_{max} > 2$$

Per ottenere dei buoni risultati si consigliano pali del diametro maggiore a 400 mm posti ad interasse di  $2\div 3D$  e di lunghezza di  $6\div 10$  metri.





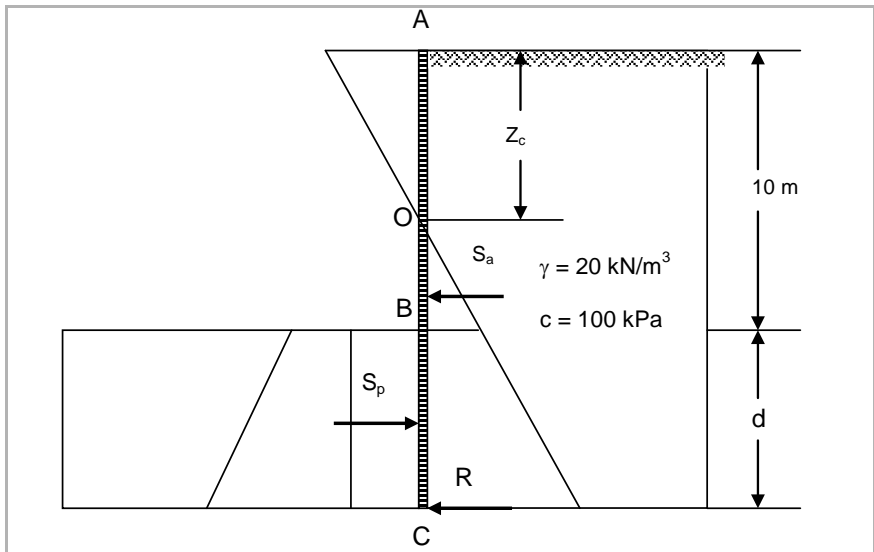


### ESERCIZIO N. 1 - Stima della profondità d'infissione di una paratia

Calcolare l'infissione di una paratia, in un terreno coerente utilizzando i seguenti dati:

DATI DI CALCOLO	VALORE
Altezza della paratia	10 m
Coesione	100 kPa
Peso di volume	20 kN/m <sup>3</sup>
Coefficiente di sicurezza	1.5

**Figura 1.4**  
Schema  
di calcolo



### SOLUZIONE

Riduzione della resistenza dell'argilla per aumentare la sicurezza

Coesione = Coesione / fattore di sicurezza =  $100/1,5 = 66,6$  kPa

Calcolo del punto  $Z_c$  dove inizia a svilupparsi la spinta attiva

$$Z_c = \frac{2 \cdot c}{\gamma} = \frac{2 \cdot 66,6}{20} = 6,66 \text{ m}$$

Calcolo della spinta attiva

$$P_a = \gamma \cdot H - 2 \cdot c = 20 \cdot 10 - 2 \cdot 66,6 = 66,8 \text{ kN/m}$$



$$S_a = 0,5 \cdot P_a \cdot (H - Z_c) = 0,5 \cdot 66,6 \cdot (10 - 6,66) = 111,22 \text{ kN/m}$$

Punto di applicazione rispetto al punto B

$$X_a = 1/3 \cdot (H - Z_c) = 1/3 \cdot (10 - 6,66) = 1,11 \text{ m}$$

Calcolo della spinta passiva sotto la linea d'inflessione del lato dello scavo

$$P_p = 4 \cdot c - \gamma \cdot H = 4 \cdot 66,6 - 20 \cdot 10 = 66,4 \text{ kN/m}$$

$$d = \frac{S_a + \sqrt{S_a^2 + 4 \cdot (P_p/2) \cdot (X_a \cdot P_a)}}{(2 \cdot P_p/2)}$$

$$d = \frac{111,22 + \sqrt{111,22^2 + 4 \cdot (66,4/2) \cdot (1,11 \cdot 66,8)}}{(2 \cdot 66,4/2)} = 3,92 \text{ m}$$

$$S_p = P_p \cdot d = 66,4 \cdot 3,92 = 260,28 \text{ kN/m}$$

Calcolo della distanza della spinta attiva dal punto C

$$X_{ac} = X_a + d = 1,11 + 3,92 = 5,03 \text{ m}$$

Calcolo del momento attorno al punto C

$$M_a = S_a \cdot X_{ac} = 111,22 \cdot 5,03 = 559,43 \text{ kNm/m}$$

Calcolo della distanza della spinta passiva dal punto C

$$X_{pc} = 0,5 \cdot d = 0,5 \cdot 3,92 = 1,96 \text{ m}$$

Calcolo del momento attorno al punto C

$$M_p = S_p \cdot X_{pc} = 260,28 \cdot 1,96 = 510,14 \text{ kNm/m}$$

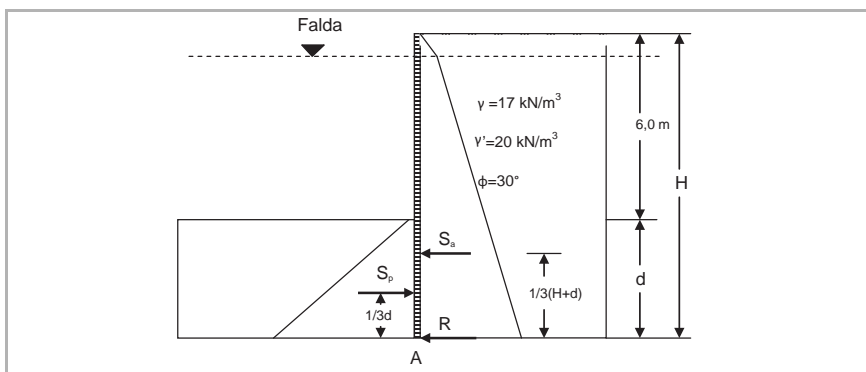


## ESERCIZIO N. 2 - Stima della profondità di infissione di una paratia

Calcolare l'infissione di una paratia, in un terreno incoerente utilizzando i dati riportati nella figura 1.5.

DATI DI CALCOLO	VALORE
Altezza della paratia	6 m
Profondità della falda	0,5 m
Angolo di attrito	30°
Peso di volume immerso ( $\gamma'$ )	20 kN/m <sup>3</sup>
Peso di volume immerso ( $\gamma$ )	17 kN/m <sup>3</sup>

**Figura 1.5**  
Schema di calcolo



## SOLUZIONE

Calcolo del coefficiente di spinta attiva

$$k_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \frac{1 - \sin 30}{1 + \sin 30} = 0,33$$

Calcolo del coefficiente di spinta passiva

$$k_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{1 + \sin 30}{1 - \sin 30} = 3$$

Calcolo delle pressioni sulla paratia nel punto A

$$P_a = K_a \cdot H \cdot \gamma' = 0,33 \cdot H \cdot \gamma'$$

$$P_p = K_p \cdot d \cdot \gamma' = 3 \cdot d \cdot \gamma'$$

Calcolo delle spinte

$$S_a = 0,5 \cdot K_a \cdot H^2 \cdot \gamma' = 0,165 \cdot H^2 \cdot \gamma'$$



$$S_p = 0,5 \cdot K_p \cdot d^2 \cdot \gamma' = 1,5 \cdot d^2 \cdot \gamma'$$

Equilibrio dei momenti attorno al punto A

$$S_a \cdot 1/3H = S_p \cdot 1/3d$$

$$0,5 \cdot K_a \cdot H^3/3 \cdot \gamma' = 0,5 \cdot K_p \cdot d^3/3 \cdot \gamma'$$

da cui

$$\frac{H^3}{d^3} = \frac{K_p}{K_a} = 9,09$$

Da questa relazione si ricava H/d

$$\frac{H}{d} = \sqrt[3]{9,09} = 2,09$$

Da cui  $H = d \cdot 2,09$

Dai dati di calcolo

$$H = d + 6$$

Sostituendo ad H il valore sopra trovato si ottiene:

$$d + 6 = d \cdot 2,09$$

da cui

$$d = 5,50 \text{ m}$$

Per la sicurezza si aumenta la profondità di infissione del 20%

$$d_1 = 5,5 \cdot 1,2 = 6,6 \text{ m}$$

Calcolo delle spinte

$$S_a = 0,5 \cdot K_a \cdot H^2 \cdot \gamma' = 0,165 \cdot (6+6,6)^2 \cdot 20 = 523,9 \text{ kN/m}$$

$$S_p = 0,5 \cdot K_p \cdot d^2 \cdot \gamma' = 1,5 \cdot 6,6^2 \cdot 20 = 1306,8 \text{ kN/m}$$

Calcolo della distanza della spinta attiva dal punto A

$$X_a = 1/3 \cdot (H+d) = 1/3 \cdot 12,6 = 4,02 \text{ m}$$

Calcolo del momento attorno al punto A

$$M_a = S_a \cdot X_a = 523,9 \cdot 4,02 = 2106,07 \text{ kNm/m}$$

Calcolo della distanza della spinta passiva dal punto A

$$X_p = 1/3 \cdot d = 1/3 \cdot 6,6 = 2,20 \text{ m}$$

Calcolo del momento attorno al punto A

$$M_p = S_p \cdot X_p = 1306,8 \cdot 2,20 = 2874,96 \text{ kNm/m}$$

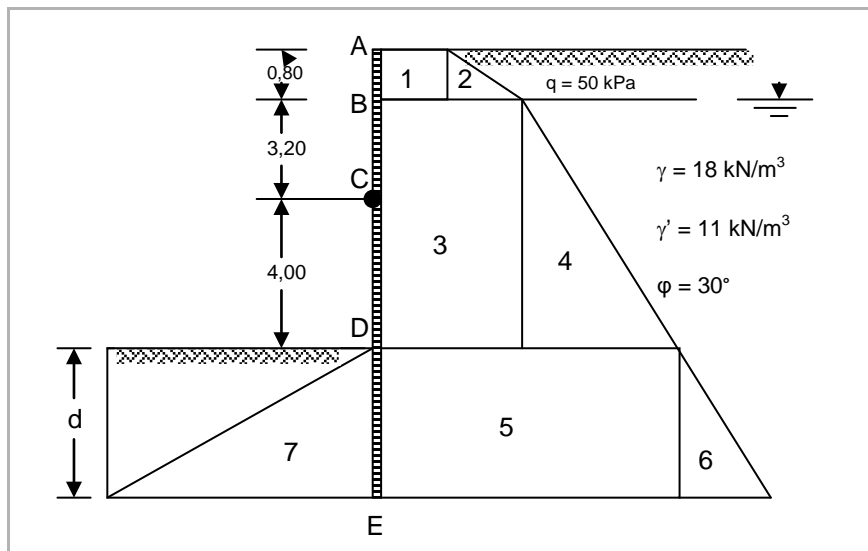


### ESERCIZIO N. 3 - Stima della profondità di infissione di una paratia

Calcolare l'infissione di una paratia, in un terreno incoerente utilizzando i dati riportati nella figura 1.6.

DATI DI CALCOLO	VALORE
Altezza della paratia	8 m
Sovraccarico	50 kPa
Profondità della falda	0,8 m
Angolo di attrito	30°
Peso di volume ( $\gamma$ )	18 kN/m <sup>3</sup>
Peso di volume immerso ( $\gamma'$ )	11 kN/m <sup>3</sup>
Profondità degli ancoraggi	4 m
Coefficiente di sicurezza	1.5

Figura 1.6  
Schema di calcolo



### SOLUZIONE

Calcolo del coefficiente di spinta attiva

$$k_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \frac{1 - \sin 30}{1 + \sin 30} = 0,33$$



Calcolo del coefficiente di spinta passiva

$$k_a = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{1 + \sin 30}{1 - \sin 30} = 3$$

Riduzione del coefficiente di spinta passiva per aumentare la sicurezza

$$K_a = K_a / \text{fattore di sicurezza} = 3 / 1,5 = 2$$

Calcolo delle pressioni sui lati della paratia

Pressioni attive

$$P_{a1} = K_a \cdot q = 0,33 \cdot 50 = 16,5 \text{ kPa}$$

$$P_{a2} = P_{a1} + K_a \cdot \gamma \cdot AB = 16,5 + 0,33 \cdot 18 \cdot 0,80 = 21,25 \text{ kPa}$$

$$P_{a3} = P_{a2} + K_a \cdot \gamma' \cdot BD = 21,25 + 0,33 \cdot 11 \cdot 7,2 = 47,38 \text{ kPa}$$

$$P_{a4} = P_{a3} + K_a \cdot \gamma' \cdot d = 47,38 + 0,33 \cdot 11 \cdot d = 47,38 + 3,63 \cdot d$$

Pressione passiva

$$P_p = K_p \cdot \gamma' \cdot d = 2 \cdot 11 \cdot d = 22 \cdot d$$

Calcolo delle spinte sulla paratie

$$\text{Zona 1- } S_{a1} = P_{a1} \cdot AB = 16,5 \cdot 0,80 = +13,2 \text{ kPa}$$

$$\text{Zona 2- } S_{a2} = \frac{1}{2} \cdot (P_{a2} - P_{a1}) \cdot AB = 0,5 \cdot (21,25 - 16,5) \cdot 0,80 = +1,9 \text{ kPa}$$

$$\text{Zona 3- } S_{a3} = P_{a2} \cdot BD = 21,25 \cdot 7,2 = +153 \text{ kPa}$$

$$\text{Zona 4- } S_{a4} = \frac{1}{2} \cdot (P_{a3} - P_{a2}) \cdot BD = 0,5 \cdot (47,38 - 21,25) \cdot 7,2 = +94,06 \text{ kPa}$$

$$\text{Zona 5- } S_{a5} = P_{a3} \cdot d = 47,38 \cdot d$$

$$\text{Zona 6- } S_{a6} = \frac{1}{2} \cdot 3,63 \cdot d \cdot d = 1,815 \cdot d^2$$

$$\text{Zona 7- } S_{a7} = -\frac{1}{2} \cdot P_p \cdot d \cdot d = -0,5 \cdot 22 \cdot d \cdot d = -11 \cdot d^2$$

Calcolo delle distanze delle spinte dal punto C

$$X_{a1} = \frac{1}{2} \cdot AB + BC = 0,40 + 3,20 = 3,60 \text{ m}$$

$$X_{a2} = \frac{1}{3} \cdot AB + BC = \frac{1}{3} \cdot 0,80 + 3,20 = 3,46 \text{ m}$$

$$X_{a3} = BC - \frac{1}{2} \cdot BD = 3,20 - \frac{1}{2} \cdot 7,20 = -0,40 \text{ m}$$

$$X_{a4} = BC - \frac{2}{3} \cdot BD = 3,20 - \frac{2}{3} \cdot 7,20 = -1,6 \text{ m}$$

$$X_{a5} = -CD - \frac{1}{2} \cdot d = -4,0 - \frac{1}{2} \cdot d$$

$$X_{a6} = -CD - \frac{2}{3} \cdot d = -4,0 - \frac{2}{3} \cdot d$$

$$X_{a7} = -CD - \frac{2}{3} \cdot d = -4,0 - \frac{2}{3} \cdot d$$

Calcolo dei momenti rispetto al punto C

$$M_1 = S_{a1} \cdot X_{a1} = 13,2 \cdot 3,60 = 47,52 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_2 = S_{a2} \cdot X_{a2} = 1,9 \cdot 3,46 = 6,57 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_3 = S_{a3} \cdot X_{a3} = 153 \cdot (-0,40) = -61,20 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_4 = S_{a4} \cdot X_{a4} = 94,06 \cdot (-1,60) = -150,49 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_5 = S_{a5} \cdot X_{a5} = (47,38 \cdot d) \cdot (-4,0 - 1/2 \cdot d) = -189 \cdot d - 23,69 \cdot d^2 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_6 = S_{a6} \cdot X_{a6} = (1,815 \cdot d^2) \cdot (-4,0 - 2/3 \cdot d) = -7,26 \cdot d^2 - 1,21 \cdot d^3 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_7 = S_{a7} \cdot X_{a7} = (-11 \cdot d^2) \cdot (-4,0 - 2/3 \cdot d) = +44 \cdot d^2 + 7,33 \cdot d^3 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Per l'equilibrio dei momenti in C si ricava la seguente equazione  $\sum M_i = 0$ :

$$6,12d^3 + 13,03d^2 - 189d - 157,6 = 0$$

Risolvendo per tentativi l'equazione si ricava la profondità di infissione della paratia

$$d = 5,03 \text{ m}$$

d	+6,12d <sup>3</sup>	+13,03d <sup>2</sup>	-189d	-157,6	$\sum M_i$
4,90	720,01	312,85	-926,10	157,6	-50,84
4,95	742,27	319,26	-935,54	-157,6	-31,61
5,00	765	325,75	-945	-157,6	-11,85
5,05	788,18	332,29	-954,45	-157,6	+8,42

Dall'equilibrio delle forze orizzontali si ricava la forza dell'ancoraggio

$$T = S_{a1} + S_{a2} + S_{a3} + S_{a4} + S_{a5} + S_{a6} + S_{a7}$$

$$T = 13,2 + 1,9 + 153 + 94,06 + (47,38 \cdot d) + (1,815 \cdot d^2) + (-11 \cdot d^2) = 270,54$$

ZONA n.	SPINTA kPa	DISTANZA m	MOMENTO kN • m
1	13,2	3,60	47,52
2	1,90	3,46	6,57
3	153,0	-0,40	-61,20
4	94,06	-1,60	-150,49
5	238,32	-6,51	-1550,04
6	45,92	-7,35	-337,66
7	-278,30	-7,35	2056,07



#### ESERCIZIO N. 4 - Verifica di una paratia di pali trivellati

Verificare la paratia di pali trivellati riportata nella figura 1.7. utilizzando i seguenti dati:

DATI DI CALCOLO	VALORE
Altezza della paratia (H)	5 m
Profondità di infissione (L)	6 m
Inclinazione del terrapieno	10°
Angolo di attrito strato N. 1	33°
Peso di volume strato N. 1	18 kN/m <sup>3</sup>
Coesione strato N. 2	100 kPa
Peso di volume strato N. 2	21 kN/m <sup>3</sup>
Diametro dei pali (D)	0,8 m
Interasse dei pali (I)	1,5 m
Altezza dei pali dal p.c. (H <sub>1</sub> )	1,0 m

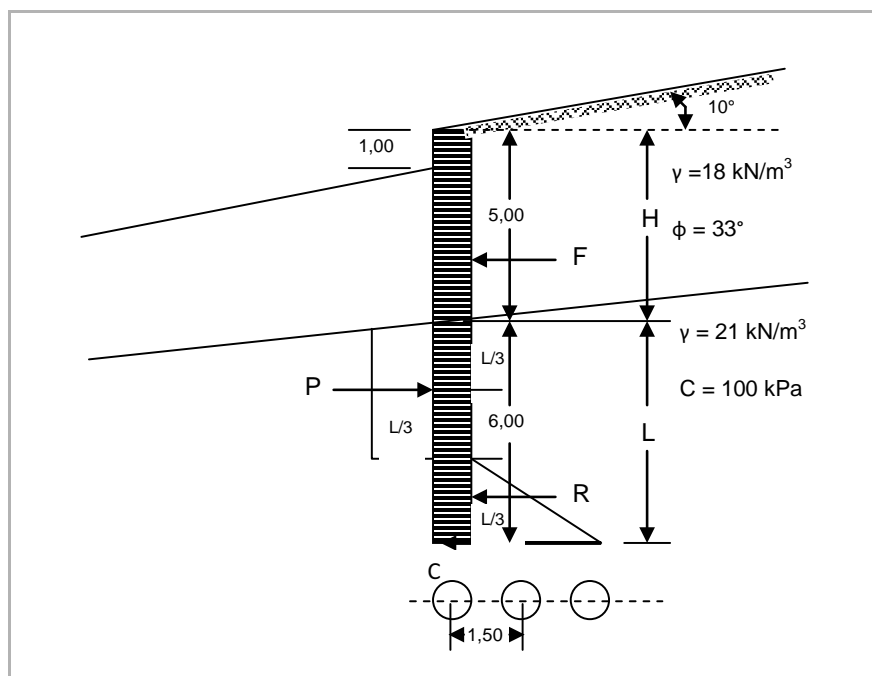


Figura 1.7  
Schema  
di calcolo



## SOLUZIONE

Calcolo del coefficiente di spinta attiva

$$k_a = \cos \beta \cdot \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}$$
$$k_a = \cos \beta \cdot \frac{\cos 10 - \sqrt{\cos^2 10 - \cos^2 33}}{\cos 10 + \sqrt{\cos^2 10 - \cos^2 33}} = 0,307$$

Calcolo della spinta F

$$F = 0,5 \cdot k_a \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \text{Interasse} = 0,5 \cdot 0,307 \cdot 18 \cdot 5^2 \cdot 1,5 = 103,61 \text{ kN/m}$$

Calcolo della distanza della spinta attiva dal punto A

$$X_a = 1/3 \cdot H = 1/3 \cdot 5 = 1,66 \text{ m}$$

Calcolo della controspinta R ( $\sum M = 0$ )

$$R = \frac{F \cdot X_1}{X_2}$$

$$X_1 = X_a + L/3 = 1,66 + 6/3 = 3,66 \text{ m}$$

$$X_2 = 5/9 \cdot L = 5/9 \cdot 6 = 3,33 \text{ m}$$

$$R = \frac{103,61 \cdot 3,66}{3,33} = 113,87 \text{ kN/m}$$

Calcolo della spinta passiva

$$P = R + F = 103,61 + 113,87 = 217,48 \text{ kN/m}$$

Calcolo della pressione passiva ultima ( $P_u$ ) a L/3

$$P_u = \gamma_1 \cdot L/3 + \gamma \cdot (H - H_1) + 2 \cdot c = 21 \cdot 6/3 + 18 \cdot (5 - 1) + 2 \cdot 100 = 314 \text{ kN/m}$$

Calcolo della pressione massima  $P_{\max}$

$$P_{\max} = 1,5 \cdot P / (2/3 \cdot L \cdot D) = 1,5 \cdot 217,48 / (2/3 \cdot 6 \cdot 0,8) = 101,97 \text{ kN/m}$$

Coefficiente di sicurezza

$$C_s = P_u / P_{\max} > 2 = 314 / 101,97 = 3,07 > 2$$

Calcolo della pressione passiva ultima ( $R_u$ ) a 8/9 L

$$R_u = \gamma_1 \cdot (8/9 \cdot L) + \gamma \cdot H + 2 \cdot c = 21 \cdot (8/9 \cdot 6) + 18 \cdot 5 + 2 \cdot 100 = 402 \text{ kN/m}$$

Calcolo della pressione media  $R_m$

$$R_m = R / (1/3 \cdot L \cdot D) = 113,87 / (1/3 \cdot 6 \cdot 0,8) = 71,17$$

Coefficiente di sicurezza

$$C_s = R_u/R_{media} > 2 = 402/71,17 = 5,64 > 2$$

Calcolo della pressione passiva ultima ( $R_u$ ) a L

$$R_u = \gamma_1 \cdot L + \gamma \cdot H + 2 \cdot c = 21 \cdot 6 + 18 \cdot 5 + 2 \cdot 100 = 416 \text{ kN/m}$$

Calcolo della pressione massima  $R_{max}$

$$R_{max} = 2 \cdot R_m = 2 \cdot 71,17 = 142,34$$

Coefficiente di sicurezza

$$C_s = R_u/R_{max} > 2 = 416/142,34 = 2,92$$





# SPINTA DELLE TERRE

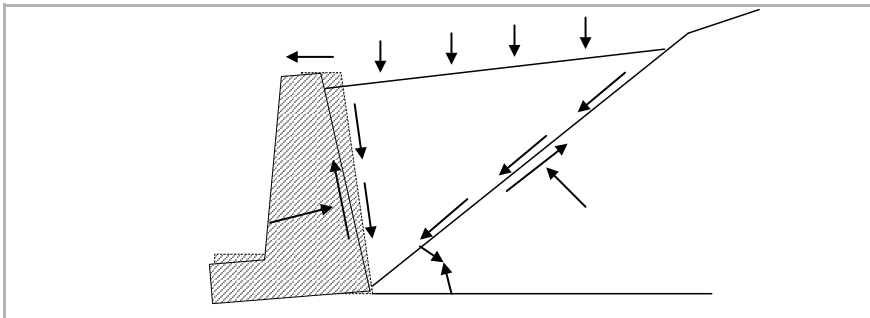
Quando si deve progettare un'opera di sostegno è necessario conoscere la geometria del terreno che spinge, le sue condizioni al contorno (angolo di attrito e coesione) per calcolare la spinta contro l'opera di sostegno che si esplicherà attraverso tensioni tangenziali.

Per una generica geometria del terreno, dati gli eventuali carichi che agiscono sul terreno, dato un muro di sostegno, si deve individuare il cuneo di spinta e la spinta (direzione, punto di applicazione ed intensità).

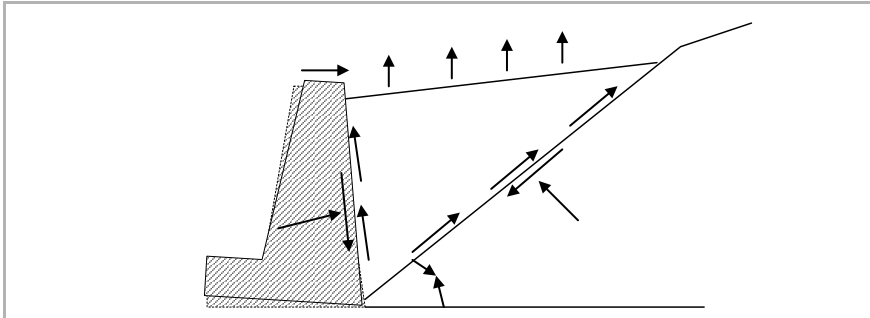
Si definisce spinta attiva, l'azione del terreno contro la struttura di sostegno.

Il cuneo di terra è a contatto sia del muro che del terreno, pertanto il movimento di scivolamento è sia di tipo terra-muro che terra-terra (figura 2.1)

Si definisce spinta passiva, l'azione della struttura contro i materiali costituenti il terreno.



◀ **Figura 2.1**  
Spinta attiva  
di un terrapieno

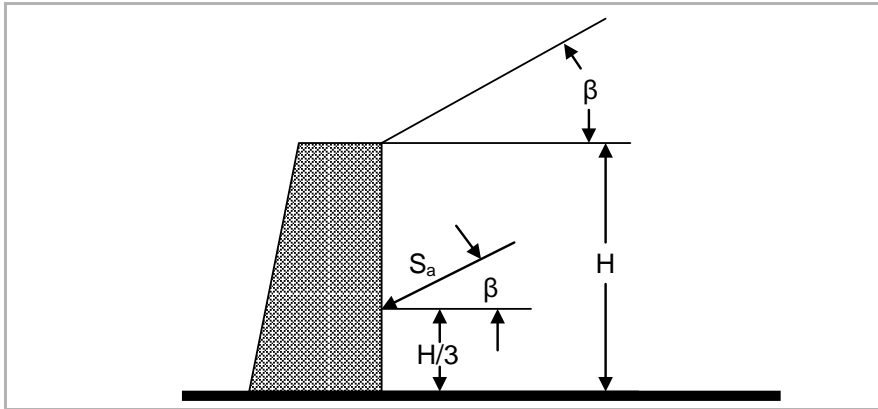


◀ **Figura 2.2**  
Spinta passiva  
di un terrapieno

## 2.1 Teoria di Rankine

La teoria di Rankine si basa sull'assunzione che l'angolo di angolo di resistenza al taglio tra terreno e muro è uguale a zero ( $\delta = 0$ ), la superficie di scorrimento è piana e la risultante delle forze agisce parallelamente alla superficie del pendio ed alla distanza di  $1/3$  dalla base del muro (figura 2.3).

**Figura 2.3**  
Schema  
della teoria  
di Rankine



L'equazione per calcolare la spinta laterale del terreno è la seguente:

$$S_a = 0.5 \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_a$$

dove

$H$  = altezza del muro;

$\gamma$  = peso specifico del terreno;

$K_a$  = coefficiente di spinta del terreno (statico).

I coefficienti di spinta attiva e passiva sono dati dalle seguenti espressioni:

$$K_{AE} = \cos \beta \left[ \frac{\cos \beta - (\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi')^{1/2}}{\cos \beta + (\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi')^{1/2}} \right]$$

$$K_{PE} = \cos \beta \left[ \frac{\cos \beta + (\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi')^{1/2}}{\cos \beta - (\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi')^{1/2}} \right]$$

Per  $\beta = 0$  l'equazioni sono semplificate come segue:

$$K_{AE} = \frac{1 - \sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'} = \tan^2 (45^\circ - \varphi' / 2)$$

$$K_{PE} = \frac{1 + \sin \varphi'}{1 - \sin \varphi'} = \tan^2 (45^\circ + \varphi' / 2)$$

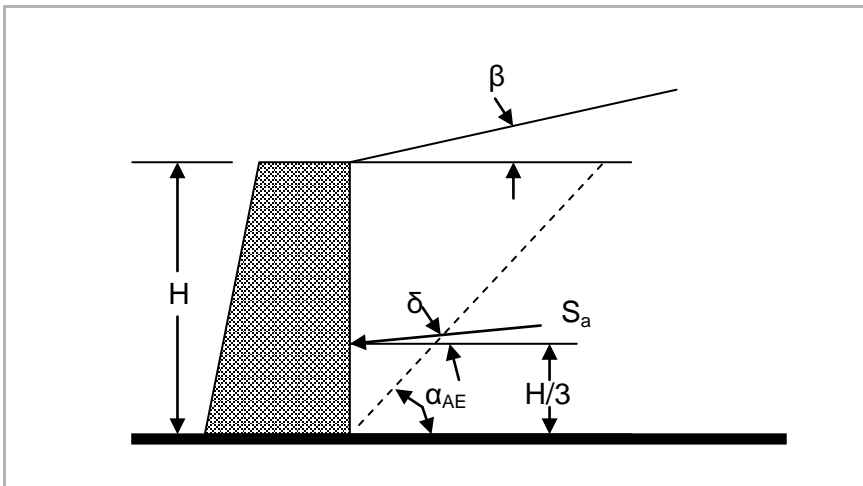
Per determinare il valore dell'angolo tra l'orizzontale ed il cuneo di terreno slittante si può utilizzare l'equazione seguente:

$$\alpha_{AE} = 45^\circ + \varphi' / 2$$

## 2.2 Teoria di Coulomb

La teoria di Coulomb derivata da quella di Rankine è basata sull'assunzione che la resistenza del terreno si sviluppa lungo il muro e la superficie di rottura considerata piana.

Suppone che il terreno sia incoerente, omogeneo e che la superficie non sia caricata (figura 2.4).



I coefficienti per calcolare la spinta del cuneo di rottura, inclinata di un angolo  $\delta$  sono dati dalle seguenti equazioni:

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi' - \theta)}{\cos^2 \theta \cdot \cos(\theta + \delta) \cdot \left[ 1 + \frac{\sin(\varphi' + \delta) \cdot \sin(\varphi' - \beta)}{\cos(\delta + \theta) \cdot \cos(\beta - \theta)} \right]^2}$$

$$K_{PE} = \frac{\sin^2(\varphi' - \theta)}{\cos \theta \cdot \sin(\theta) \cdot \left[ 1 - \frac{\sin \varphi' \sin(\varphi' + \beta - \theta)}{\sin(\beta) \sin(\theta)} \right]}$$

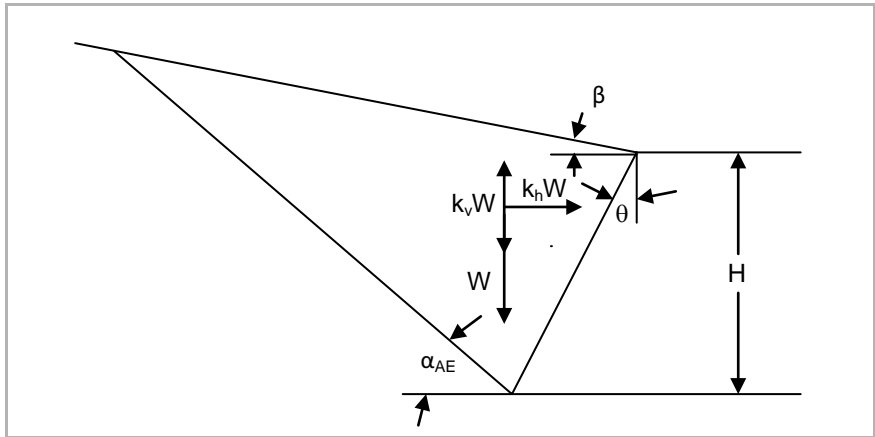


**Figura 2.4**  
Schema  
della teoria  
di Coulomb

## 2.3 Teoria di Okabe e Mononobe

Okabe (1926) e Mononobe (1929) ampliano la teoria di Coulomb includendo gli effetti dinamici sulla pressione della terra sul muro, attraverso l'uso di una costante orizzontale di accelerazione ed una costante verticale di accelerazione, agente sul peso proprio del cuneo di terreno slittante.

**Figura 2.5**  
Schema della teoria di Mononobe – Okabe (Cuneo attivo)



Il valore della spinta complessiva degli effetti dinamici  $S_d$  sulla parete è espresso dalla seguente formula:

$$S_d = 0,5 \cdot \gamma^* \cdot (1 \pm k_v) \cdot K \cdot H^2 + E_{ws}$$

dove

$H$  = altezza del muro;

$E_{ws}$  = spinta idrostatica;

$\gamma^*$  = peso specifico del terreno;

$K$  = coefficiente di spinta del terreno (statico + dinamico).

Il coefficiente di spinta del terreno è dato dalla seguente formula:

per stati di spinta attiva

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi' - \psi - \theta)}{\cos \psi \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos(\psi + \theta + \delta) \cdot \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi' + \delta) \cdot \sin(\varphi' - \psi - \beta)}{\cos(\delta + \psi + \theta) \cdot \cos(\beta - \theta)}} \right]^2}$$



Per  $\beta = 0$  e  $\theta = 0$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi' - \psi)}{\cos \psi \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos(\psi + \delta) \cdot \left[ 1 + \frac{\sin(\varphi' + \delta) \cdot \sin(\varphi' - \psi)}{\cos(\delta + \psi)} \right]^2}$$

Per stati di spinta passiva ( $\delta = 0$ ):

$$K_{PE} = \frac{\sin^2(\psi + \varphi' - \theta)}{\cos \theta \cdot \sin^2 \psi \sin(\psi + \theta) \cdot \left[ 1 - \frac{\sin \varphi' \sin(\varphi' + \beta - \theta)}{\sin(\psi + \beta) \sin(\psi + \theta)} \right]}$$

dove

- $\varphi$  = angolo di resistenza al taglio del terreno in termini di sforzo efficace;
- $\beta$  = angolo di inclinazione della superficie del terreno;
- $\theta$  = angolo di inclinazione rispetto alla verticale della parete del muro;
- $\delta$  = angolo di resistenza al taglio tra terreno e muro;
- $\psi$  = angolo definito dalle equazioni [2.1] e [2.2].

### Livello della falda al di sotto del muro di sostegno

$\gamma^*$  =  $\gamma$  peso specifico del terreno

$$\tan \psi = \frac{k_h}{1 \mp k_v} \quad [2.1]$$

dove i coefficienti sismici orizzontale ( $k_h$ ) e verticale ( $k_v$ ) sono dati dalle seguenti equazioni:

$$k_h = S \cdot a_g / r \quad k_v = 0,5 \cdot k_h$$

Al fattore  $r$  può essere assegnato il valore  $r = 2$  per strutture che ammettono spostamenti (muri a gravità o flessibili).

Per le altre tipologie di può assumere un valore  $r = 1$ .

In presenza di terreni non coesivi saturi deve essere assunto il valore  $r = 1$ .

### Terreno impermeabile in condizioni dinamiche al di sotto del livello della falda.

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w$$

$$\tan \psi = \frac{\gamma}{\gamma - \gamma_w} \frac{k_h}{1 \mp k_v} \quad [2.2]$$

dove

- $\gamma$  = peso specifico del terreno saturo;
- $\gamma_w$  = peso specifico dell'acqua.



Per determinare il valore dell'angolo tra l'orizzontale ed il cuneo di terreno slittante si può utilizzare l'equazione proposta da Zarrabi (1978):

$$\alpha_{AE} = \varphi' - \psi + \tan^{-1} \left[ \frac{-\tan(\varphi' - \psi - \beta) + C_{1AE}}{C_{2AE}} \right]$$

dove

$$C_{1AE} = \sqrt{[\tan(\varphi' - \psi - \beta)] \cdot [\tan(\varphi' - \psi - \beta) + \cot(\varphi' - \psi - \theta)] \cdot [(1 + \tan(\delta + \psi + \theta) \cdot \cot(\varphi' - \psi - \theta))]}]$$

$$C_{2AE} = 1 + [\tan(\delta + \psi + \theta)] \cdot [\tan(\varphi' - \psi - \beta) + \cot(\varphi' - \psi - \theta)]$$

**Tab. 2.1** – Valori  $K_{AE}$  (Coulomb) per  $\theta = 0^\circ$  e  $\beta = 0^\circ$

$\varphi$ (°)	$\delta$ (°)					
	0	5	10	15	20	25
28	0,3610	0,3448	0,333	0,3251	0,3003	0,3186
30	0,3333	0,3189	0,3085	0,3014	0,2973	0,2956
32	0,3073	0,2945	0,2853	0,2791	0,2755	0,2745
34	0,2827	0,2714	0,2633	0,2579	0,2549	0,2542
36	0,2596	0,2497	0,2426	0,2379	0,2354	0,2350
38	0,2379	0,2292	0,2230	0,2190	0,2169	0,2167
40	0,2174	0,2089	0,2045	0,2011	0,1994	0,1995
42	0,1982	0,1916	0,1870	0,1841	0,1828	0,1831

**Tab. 2.2** – Valori  $K_{AE}$  (Coulomb) per  $\delta = 2/3 \varphi$

$\beta$ (°)	$\varphi$ (°)	$\theta$ (°)					
		0	5	10	15	20	25
0	28	0,3213	0,3588	0,4007	0,4481	0,5026	0,5662
	30	0,2973	0,3349	0,3769	0,4245	0,4794	0,5435
	32	0,2750	0,3125	0,3545	0,4023	0,4574	0,5220
	34	0,2543	0,2916	0,3335	0,3813	0,4367	0,5017
	36	0,2349	0,2719	0,3137	0,3615	0,4170	0,4825
	38	0,2168	0,2535	0,2950	0,3428	0,3984	0,4642
	40	0,1999	0,2361	0,2774	0,3250	0,3806	0,4468
	42	0,1840	0,2197	0,2607	0,3081	0,3638	0,4303

**Tab. 2.2** – (segue) Valori  $K_{AE}$  (Coulomb) per  $\delta = 2/3 \varphi$

$\beta$ (°)	$\varphi$ (°)	$\theta$ (°)					
		0	5	10	15	20	25
5	28	0,3431	0,3845	0,4211	0,4843	0,5461	0,6191
	30	0,3165	0,3578	0,4043	0,4575	0,5194	0,5926
	32	0,2919	0,3329	0,3793	0,4324	0,4943	0,5678
	34	0,2691	0,3097	0,3558	0,4068	0,4707	0,5443
	36	0,2479	0,2881	0,3338	0,3866	0,4484	0,5222
	38	0,2282	0,2679	0,3132	0,3656	0,4273	0,5012
	40	0,2098	0,2489	0,2937	0,3458	0,4074	0,4814
	42	0,1927	0,2311	0,2763	0,3271	0,3885	0,4626
10	28	0,3702	0,4164	0,4686	0,5287	0,5992	0,6834
	30	0,3400	0,3857	0,4376	0,4974	0,5676	0,6616
	32	0,3123	0,3575	0,4089	0,4683	0,4382	0,6220
	34	0,2868	0,3314	0,3822	0,4412	0,5107	0,5942
	36	0,2633	0,3072	0,3574	0,4158	0,4849	0,5682
	38	0,2415	0,2846	0,3342	0,3821	0,4607	0,5438
	40	0,2214	0,2637	0,3125	0,3697	0,4379	0,5208
	42	0,2027	0,2441	0,2921	0,3487	0,4164	0,4990
15	28	0,4065	0,4585	0,5179	0,5869	0,6685	0,7671
	30	0,3707	0,4219	0,4804	0,5484	0,6291	0,7266
	32	0,3384	0,3387	0,4462	0,5134	0,5930	0,6895
	34	0,3091	0,3584	0,4150	0,4811	0,5599	0,6554
	36	0,2823	0,3306	0,3862	0,4514	0,5295	0,6239
	38	0,2578	0,3050	0,3596	0,4238	0,5006	0,5949
	40	0,2353	0,2813	0,3349	0,3981	0,4740	0,5672
	42	0,2146	0,2595	0,3119	0,3740	0,4491	0,5416



**Tab. 2.2** – (segue) Valori  $K_{AE}$  (Coulomb) per  $\delta = 2/3 \varphi$ 

$\beta$ (°)	$\varphi$ (°)	$\theta$ (°)					
		0	5	10	15	20	25
20	28	0,4602	0,5205	0,5900	0,6715	0,7690	0,8810
	30	0,4142	0,4728	0,5403	0,6196	0,7144	0,8303
	32	0,3742	0,4311	0,4968	0,5741	0,6667	0,7800
	34	0,3388	0,3941	0,4581	0,5336	0,6241	0,7352
	36	0,3071	0,3609	0,4233	0,4970	0,5857	0,6948
	38	0,2787	0,3308	0,3916	0,4637	0,5587	0,6580
	40	0,2529	0,3035	0,3627	0,4331	0,5185	0,6243
	42	0,2294	0,2784	0,3360	0,4050	0,4889	0,5931

**Tab. 2.3** – Valori  $K_{PE}$  (Coulomb) per  $\theta = 0^\circ$  e  $\beta = 0^\circ$ 

$\varphi$ (°)	$\delta$ (°)				
	0	5	10	15	20
15	1,698	1,900	2,130	2,405	2,735
20	2,040	2,313	2,636	3,030	3,525
25	2,464	2,830	3,286	3,855	4,597
30	3,000	3,506	4,143	4,977	6,105
35	3,690	4,390	5,310	6,854	8,324
40	4,600	5,590	6,946	8,870	11,772

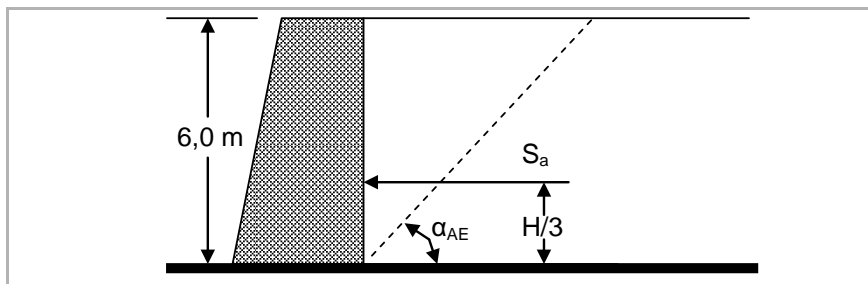
Negli esempi sotto riportati l'angolo di attrito del terreno di calcolo potrà essere variato, a seconda del tipo di verifica e dell'approccio adottato, utilizzando i coefficienti parziali di sicurezza " $\gamma_M$ " riportati nella tabella 6.2. Il del NTC.



### ESERCIZIO N. 1 - Stima della spinta attiva e dell'angolo del piano di scorrimento (metodo Rankine)

Un muro sostiene un terrapieno costituito di terreno incoerente asciutto. Calcolare la spinta attiva e l'angolo del piano di scorrimento utilizzando i seguenti dati:

DATI DI CALCOLO	VALORE
Metodo	Rankine
Terreno	Incoerente
Altezza del muro	6,0 m
Condizione sismica	Assenza di sisma
Falda idrica	Assente
Peso specifico del terreno	19 kN/m <sup>3</sup>
Angolo di attrito	30°
Angolo $\delta$	0°
Angolo $\beta$	0°



### SOLUZIONE

Calcolo del coefficiente di spinta attiva

$$K_{AE} = \tan^2(45^\circ - \varphi'/2) = \tan^2(45^\circ - 30/2) = 0,33$$

Calcolo della spinta del terreno

$$S_a = 0,5 \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_{AE} = 0,5 \cdot 19 \cdot 6^2 \cdot 0,33 = 112,8 \text{ kN/m}$$

Calcolo dell'angolo del piano di scorrimento

$$\alpha_{AE} = 45^\circ + \varphi'/2 = 45^\circ + 30/2 = 60^\circ$$

Calcolo del punto di applicazione della spinta

$$H_{SA} = H/3 = 6,0/3 = 2,0 \text{ m}$$



**Figura 2.6**  
Schema di calcolo

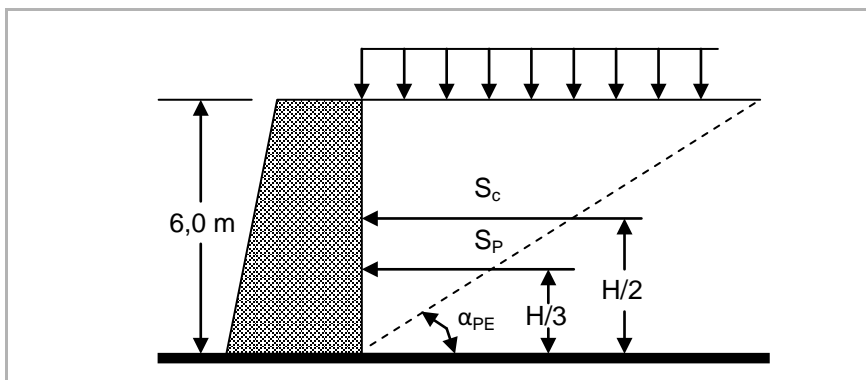


**ESERCIZIO N. 2 - Stima della spinta attiva e dell'angolo del piano di scorrimento (metodo Rankine)**

Un muro sostiene un terrapieno costituito di terreno incoerente asciutto.  
Calcolare la spinta attiva e l'angolo del piano di scorrimento utilizzando i seguenti dati:

DATI DI CALCOLO	VALORE
Metodo	Rankine
Terreno	Incoerente
Altezza del muro	6,0 m
Condizione sismica	Assenza di sisma
Falda idrica	Assente
Peso specifico del terreno	19 kN/m <sup>3</sup>
Sovraccarico	50 kN/m <sup>2</sup>
Angolo di attrito	30°
Angolo $\delta$	0°
Angolo $\beta$	0°

**Figura 2.7**  
Schema di calcolo



**SOLUZIONE**

Calcolo del coefficiente di spinta attiva

$$K_{AE} = \tan^2(45^\circ - \varphi'/2) = \tan^2(45^\circ - 30/2) = 0,33$$



Calcolo della spinta del terreno

$$S_a = 0,5 \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_{AE} = 0,5 \cdot 19 \cdot 6^2 \cdot 0,33 = 112,8 \text{ kN/m}$$

Calcolo del punto di applicazione della spinta

$$H_{SA} = H/3 = 6,0/3 = 2,0 \text{ m}$$

Calcolo della spinta dovuta al sovraccarico

$$S_c = q \cdot H \cdot K_{AE} = 50 \cdot 6 \cdot 0,33 = 99 \text{ kN/m}$$

Calcolo del punto di applicazione della spinta

$$H_{Sc} = H/2 = 6,0/2 = 3,0 \text{ m}$$

Calcolo della spinta totale

$$S_t = S_a + S_c = 112,8 + 99 = 211,8 \text{ kN/m}$$

Calcolo del punto di applicazione della spinta totale (ottenuto dall'equilibrio delle forze rispetto la base del muro).

$$211,8 \cdot h = 112,8 \cdot (6/3) + 99 \cdot 3$$

$$h = 2,46 \text{ m}$$