

# Il drenaggio artificiale delle falde nei lavori di ingegneria (applicazione del metodo *flow net* per il calcolo della portata di filtrazione e sottospinta idraulica)

Alessio Fileccia\*

## Definizione e scopi

In molti interventi di costruzione sotto falda è necessario provocare inizialmente un abbassamento artificiale del livello piezometrico per poter intervenire all'asciutto e costruire le fondazioni.

Questa variazione di livello genera anche una variazione di peso dei singoli grani di terreno che essendo immersi in un liquido ricevono una spinta verso l'alto, pari al peso del volume di liquido spostato (principio di Archimede). Per esemplificare, l'abbassamento  $\Delta H$  di livello piezometrico, provoca, su di una sezione di terreno un aumento della pressione effettiva pari al peso della colonna d'acqua abbassata ( $\Delta H$ ), fig.1.

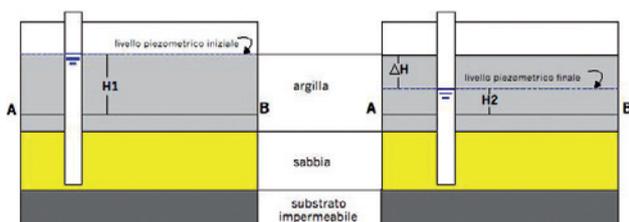


Fig.1

Nella figura, la pressione agente al livello AB, prima dell'abbassamento artificiale di livello è:

$$P_{AB} = \gamma' H1 \quad (\gamma' \text{ peso sommerso dell'argilla})$$

e dopo l'abbassamento  $\Delta H$ :

$$P_{AB} = \gamma_s \Delta H + \gamma' H2 \quad (\gamma_s \text{ peso dell'argilla satura, terreno + acqua})$$

la variazione di pressione è:

$$\gamma_s \Delta H + \gamma' H2 - \gamma' H1 = \gamma_s \Delta H + \gamma'(H2-H1) \quad \text{essendo}$$

$$H1 - H2 = \Delta H, \quad H2-H1 = -\Delta H \quad \text{e}$$

$$\gamma_s \Delta H - \gamma' \Delta H = \Delta H (\gamma_s - \gamma') \quad \text{dato che } \gamma' = \gamma_s - \gamma_w \text{ allora}$$

$$(\gamma_s - \gamma') = \gamma_w \quad \text{quindi:}$$

$\gamma_w \Delta H$  è l'aumento di pressione effettiva pari al peso della colonna d'acqua abbassata.

In altri termini se ad esempio il livello statico si abbassa di 3 m, la sottospinta è di circa 0,3 kg/cm<sup>2</sup>.

È evidente che tali problematiche sono più importanti per i terreni sciolti granulari che per le rocce compatte o fratturate.

In linea generale il problema relativo agli abbassamenti di falda deve esaminare i seguenti aspetti pratici:

1. Portata di filtrazione dalle pareti e dal fondo scavo (seepage)
2. Stabilità del fondo scavo (filtrazione verticale), gradiente critico, fattore di sicurezza
3. Stabilità del fondo scavo con flusso idrico sotto gradiente
4. Fenomeni di trascinarsi delle particelle fini (piping)

L'approccio comune ai quattro aspetti inizia con la costruzione del reticolo di flusso secondo le modalità già illustrate in un altro articolo.

## Portata di filtrazione

Si calcola come descritto in appendice A dell'articolo: Caratteristiche e costruzione dei reticoli di flusso, oppure come descritto nel caso seguente che mostra la situazione classica della palancola infissa in un terreno permeabile (fig.2)

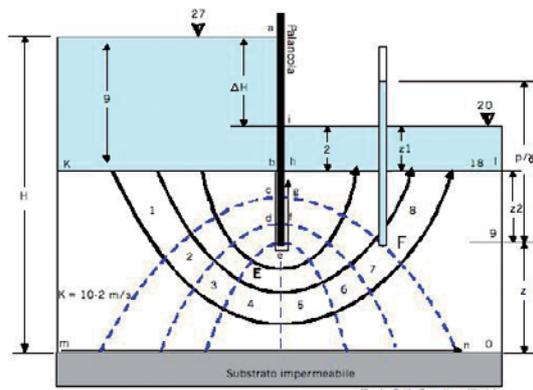


Fig.2

\* Geologo, libero professionista, Treviso

Si inizia col definire le condizioni al contorno come in tutti i problemi idrogeologici dai più semplici ai più complessi.

**A. Condizioni al contorno**

bk e hl sono limiti a carico fisso, corrispondono a due equipotenziali di valore 27 m e 20 m rispettivamente; mn è un limite impermeabile a flusso nullo e corrisponde ad una linea di flusso (o di corrente) analogamente a bcdefgh

**B. Carico al contorno**

La prima equipotenziale a monte (kb) ha carico idraulico costante  $(18+9) = 27$ , l'ultima equipotenziale a valle ha anch'essa carico costante  $(18+2) = 20$  m; la differenza di carico piezometrico è  $\Delta H = 27-20 = 7$  m

**C.** Disegnare il reticolo di flusso, in scala, sulla base di un  $\Delta H = 7$  m; ripartire il  $\Delta H$  in salti di equipotenziale uguali (ad esempio  $7/8 = 0.875$  m), e 4 tubi di flusso; essendo il mezzo isotropo, linee di flusso ed equipotenziali si intersecano a  $90^\circ$ ; le celle (campi) che si ottengono sono dei quadrangoli in cui è possibile inscrivere un cerchio tangente internamente ai quattro lati; si ottengono alla fine 9 equipotenziali ed 8 campi per ogni tubo di flusso

**D. Portata di filtrazione**

la portata che arriva al fondo scavo, parte destra della figura, si calcola con la formula di Darcy, considerando che i campi lungo ogni tubo di flusso hanno larghezza circa uguale alla lunghezza, e la portata tra ogni tubo di flusso vicino è uguale; se con  $n_d$  (number of drops) indichiamo i salti di potenziale, ognuno con equidistanza 0.875 m e con  $n_f$  (number of flow channels) il numero dei tubi di flusso, la portata complessiva è:

$$Q = k \Delta H n_f / n_d \text{ (1)}$$

$$Q = 10^{-2} \times 7 \times 3/8 = 0.026 \text{ m}^3 / \text{s}$$

**E. Portata di filtrazione mediante abachi**

si ricorre al grafico in fig. 3 che mostra una sezione verticale di lunghezza infinita (perpendicolare alla pagina)

1 in un mezzo anisotropo con  $kh \gg kv$ ,  $Q = \Delta H (n_f/nd) \text{ Ökh kv}$

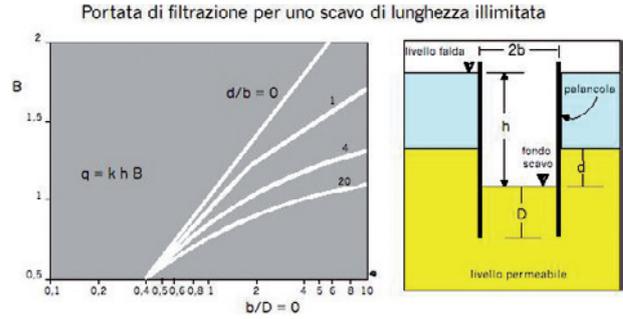


Fig. 3

**Stabilità del fondo scavo, gradiente critico, gradiente di efflusso, fattore di sicurezza**

Nel caso di uno scavo sotto falda in cui non si è ancora verificato alcun sollevamento del fondo (situazione statica) il terreno a livello della superficie A è sottoposto ad una spinta verso il basso data dal suo peso e da una spinta verso l'alto data dalla colonna d'acqua  $(h+L)$ . Guardando la fig. 4 si può calcolare il gradiente critico cioè il rapporto  $h/L$  per cui si ha sollevamento del fondo scavo

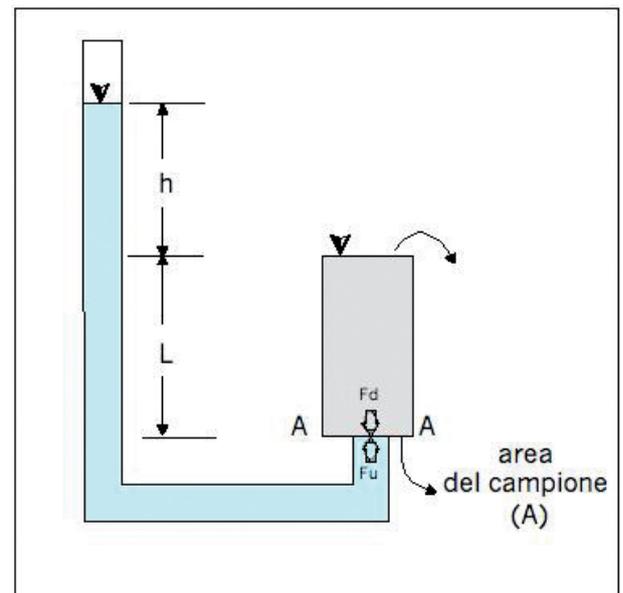


Fig. 4. Calcolo della stabilità del fondo scavo con il gradiente critico

- L = lunghezza campione
- h = differenza di carico piezometrico
- $\gamma_s$  = peso saturo del campione
- $\gamma_w$  = peso dell'acqua
- $\gamma' = \gamma_s - \gamma_w$  = peso effettivo (peso al galleggiamento del campione)

$i_{cr}$  = gradiente critico

Forze agenti sul piano A - A

verso il basso  $F_d = \gamma_s LA$

verso l'alto  $F_u = (h+L)\gamma_w A$  [1]

quando  $F_u = F_d$  si verifica il sollevamento ed il gradiente diventa critico,

$$\gamma_s LA = (h+L)\gamma_w A$$

$$\gamma_s / \gamma_w = (h+L) / L = 1 + h/L$$

$$h/L = (\gamma_s / \gamma_w) - 1 = (\gamma_s - \gamma_w) / \gamma_w = \gamma' / \gamma_w = i_{cr}$$

Il peso specifico saturo della maggior parte dei terreni è circa il doppio di quello dell'acqua quindi di regola la condizione necessaria perché si produca il sifonamento è:

$$\gamma_s h \leq \gamma_w h \quad (\gamma_s = \text{peso saturo del terreno})$$

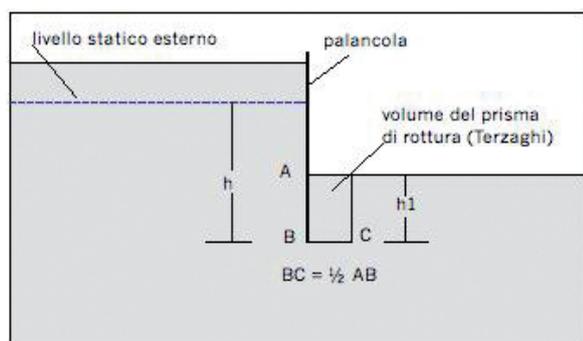


Fig. 5

Quindi se  $h$  è  $< 2h_1$  in genere non c'è sollevamento.

Questa è una regola generale che va verificata di volta in volta sul posto.

Se, ad esempio, al di sotto del fondo scavo agisce una seconda falda, in pressione, i lavori di drenaggio abbassano solo il livello piezometrico di quella freatica ma non di quella sottostante che continua a spingere verso l'alto e può produrre un sollevamento.

Terzaghi ha sottolineato che il volume di terreno interessato dalla rottura è quello di un prisma di altezza uguale alla profondità di immersione della palancola (A-B), larghezza pari  $BC = AB/2$  e lunghezza unitaria.

Per la fig. 5 il coefficiente di sicurezza è:  
 $\gamma' h_1 / \gamma_w (h-h_1) \quad 3-4-5$

**ESEMPIO** (Pizzonia, 1991)

Una grande trincea fu scavata in uno strato di argilla consistente con  $\gamma_s = 1,76 \text{ ton/m}^3$ , alla profondità di 7,6 m sotto il p.c., il fondo iniziò a sollevarsi con un allagamento.

I sondaggi eseguiti in seguito mostrarono la stratigrafia in fig. 6.

Trovare il livello piezometrico nel caso fosse stato perforato un pozzo prima dell'inizio lavori.

Il sollevamento del fondo scavo si verifica al raggiungimento del gradiente critico ed in questo caso alla profondità di 7,6 m il peso sommerso del terreno sopra il fondo è uguale alla pressione d'infiltrazione media alla base dello strato argilloso.

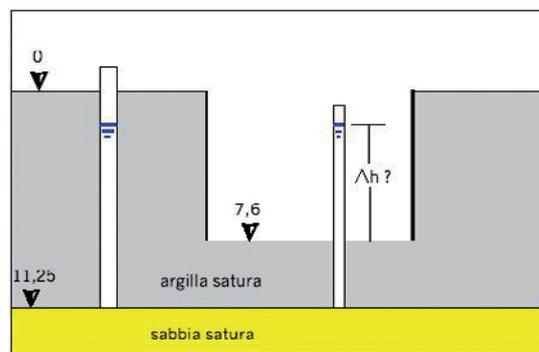


Fig. 6

Dalla fig. 5 si ricava che lo spessore di argilla tra fondo scavo e tetto delle sabbie è di

3,65 m e quando

$$\Delta h \gamma_w = \gamma' \times D \quad \text{si verifica la rottura.}$$

Sostituendo  $D = 3,65 \text{ m}$ ;  $\gamma' = \gamma_s - \gamma_w = 1,76 - 1 = 0,76 \text{ ton/m}^3$

$\Delta h = (0,76 \times 3,65) / 1 = 2,774 \text{ m}$  sopra il fondo, pari a  $11,25 - (2,774 + 3,65) = 4,826 \text{ m}$  sotto p.c.

Per una prima valutazione si può calcolare, mediante un abaco, il valore del coefficiente di efflusso ( $i_e$ ) da cui ricavare un coefficiente di sicurezza che rappresenta una soluzione cautelativa per la verifica (Lancellotta)

$$F = i_{cr} / i_e > 4-5 \quad (\text{fig. 7})$$

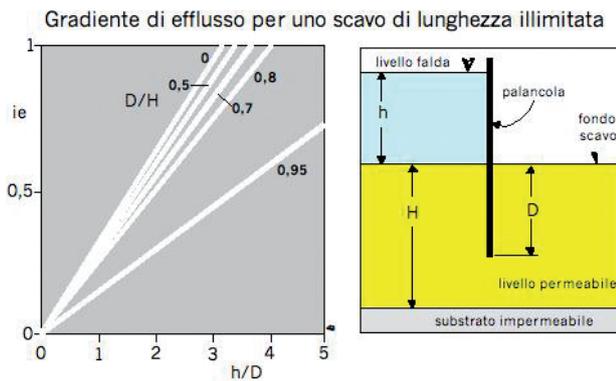


Fig. 7 Grafico per calcolare il coefficiente di sicurezza del fondo scavo

Nell'esempio che segue si assume il piano campagna = 0 ed il livello piezometrico statico a -3 m, con:

- H = 5 m
- h = 5.5 m
- D = 5

Si ha:

$D/H = 1$  ed  $h/D = 1.1$

Per  $\gamma' = 0.85$  e  $\gamma_w = 1$   $icr = 0.85$

Dal grafico si ricava  $ie = 0.21$  e quindi  $F = 0.85/0.21 = 4.04 > 4$  (situazione di sicurezza)

**Stabilità del fondo scavo sotto gradiente**

Quando si analizza la stabilità di una scarpata o fondo scavo soggetti ad una differenza di carico idraulico su entrambe le pareti si deve analizzare anche il flusso esistente nel terreno.

Tale flusso genera una spinta che dipende dalla differenza di carico piezometrico, dal peso della colonna d'acqua e dall'area perpendicolare al flusso.

Tale forza agisce lungo una linea di corrente ed è una parte della spinta verso l'alto ( $F_u$ ) nella [1]:

$$F_u = h \gamma_w A + LA \gamma_w$$

Il termine  $F_s = h \gamma_w A$  è la spinta dell'acqua dovuta al lento moto di filtrazione, proporzionale alla differenza di carico idraulico sulle due facce del prisma di terreno ed alla superficie perpendicolare al flusso, mentre  $F_b = LA \gamma_w$  è la spinta al galleggiamento dipendente dal volume del terreno (Archimede).

Introducendo il gradiente, si può scrivere anche:

$$F_s = (h/L) \gamma_w AL \text{ dove } AL = V \text{ e } h/L = i$$

$F_s = i \gamma_w V$  (la spinta di filtrazione è direttamente proporzionale al gradiente)

Il valore di questa forza può essere calcolato sia calcolando la differenza di carico idraulico che il gradiente per l'elemento di terreno considerato, i due risultati devono coincidere.

Il calcolo del gradiente in un punto alla base del prisma di rottura si effettua dopo la costruzione del reticolo di flusso.

Cedergren descrive un metodo semplice che prevede di calcolare un gradiente medio per l'elemento di terreno interessato calcolando poi  $F = i \gamma_w V$  lungo una linea di corrente perpendicolare allo stesso elemento (fig. 8).

**ESEMPIO (Cedergren, 1989)**

In fig. 8, è riportata la sezione perpendicolare in corrispondenza di una diga, per la quale è stato ricostruito il reticolo di flusso.

Dovendo calcolare la spinta di filtrazione che agisce sull'elemento di volume a tratteggio si procede come segue:

- determinare la superficie di rottura inferiore (metodo svedese)
- determinare il centro di gravità dell'elemento e la direzione della forza agente (lungo la linea di flusso normale alle superfici dell'elemento)
- determinare l'intervallo delle superfici equipotenziali ( $\Delta h$ ) e le distanze ( $\Delta L1 - \Delta L2 - \Delta L3 - \Delta L4$ ), utilizzando la scala grafica
- calcolare il gradiente medio ( $\Delta h/\Delta L1; \Delta h/\Delta L2, \dots$ ) per l'elemento
- calcolare il volume dell'elemento, considerando uno spessore unitario (perpendicolare al disegno)
- la forza agente è  $F = i \gamma_w V$

il gradiente medio è:

- $i1 = 0,49$
- $i2 = 0,54$
- $i3 = 0,43$
- $i4 = 0,47$
- $i \text{ medio} = 0,48$

Volume dell'elemento =  $3,7 \text{ m}^3$

$F = 0,48 \times 3,7 \times 1 = 1,7 \text{ ton}$  (spinta di filtrazione)

**Calcolo della spinta di filtrazione con il metodo del gradiente**

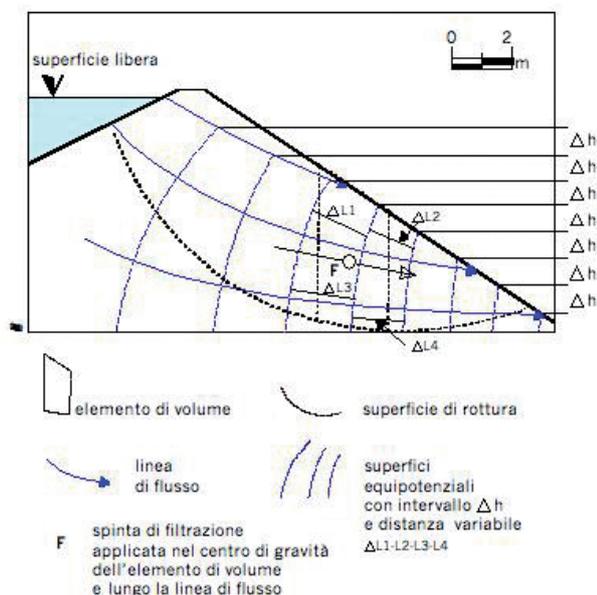


Fig. 8

Un altro metodo prevede di calcolare la differenza di carico piezometrico tra le due basi del prisma di rottura. Nella fig. 2, il valore di ogni equipotenziale è il seguente ( $\Delta H = 0.875$  m):

- $h_1 = 27$
- $h_2 = 27 - 0.875 = 26.125$
- $h_3 = 26.125 - 0.875 = 25.25$
- $h_4 = 25.25 - 0.875 = 24.375$
- $h_5 = 24.375 - 0.875 = 23.5$
- $h_6 = 23.5 - 0.875 = 22.625$
- $h_7 = 22.625 - 0.875 = 21.75$
- $h_8 = 21.75 - 0.875 = 20.875$
- $h_9 = 20.875 - 0.875 = 20$

la pressione che agisce nel punto F per cui passa l'ottava equipotenziale è:

$h_8 = z + p/\gamma_w$  da cui  $p = (h_8 - z) \gamma_w$   
 se il disegno è fatto in scala, z si ricava dalla misura diretta (9 m),  $\gamma_w = 1 \text{ ton/m}^3$  quindi:  
 $p = (20.875 - 9) \times 1 = 11.875 \text{ ton/m}^2$   
 ritornando a come è stata ricavata  $h_8$ , abbiamo che:  
 $h_8 = H - (7/8) \Delta H$  e:  
 $p/\gamma_w = h_8 - z = \Delta H + z_1 + z_2 + z - (7/8) \Delta H - z$   
 da cui:  
 $p = [\Delta H + z_1 + z_2 - (7/8) \Delta H] \gamma_w$

il termine  $[\Delta H - (7/8) \Delta H] \gamma_w$  [2]

è la sovrappressione idrostatica (spinta di filtrazione) utilizzata per il calcolo del gradiente critico.

Taylor (1948) sottolinea che la forza risultante sull'elemento di volume di terreno sommerso può essere calcolata in vari modi:

- utilizzando il peso sommerso del terreno e la spinta di filtrazione
- utilizzando il peso totale dell'acqua e del terreno e la forza risultante
- utilizzando il peso vero del terreno (G peso specifico dei grani), il peso dell'acqua (espresso da e, indice dei vuoti) e la forza risultante

**ESEMPIO (Pizzonia, 1991)**

Una palancola con ancoraggio è infissa ad una profondità di 3,5 m e sostiene 6 m di terreno sabbioso ghiaioso con  $K = 6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  (fig. 7).

Trovare la portata di filtrazione dopo saturazione del materiale ed il coefficiente di sicurezza, sapendo che  $\gamma_s = 1,92 \text{ ton/m}^3$ .

Dopo avere costruito la rete di flusso si ottengono

- Nf = 4 tubi di flusso
- Nd = 14 campi (salti di potenziale)

Le ipotesi si lavoro sono:

- regime laminare
- k costante (terreno omogeneo ed isotropo)
- per ogni campo la lunghezza è circa uguale alla larghezza

*Portata di filtrazione*

$Q = k \Delta h Nf/Nd$

- $\Delta h = 6$
- Nf = 4
- Nd = 14
- $k = 6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

$Q = 0,0011 \text{ m}^3/\text{s}$

*Coefficiente di sicurezza*

Si deve calcolare il peso del terreno, considerando che

il prisma di materiale che si solleva ha altezza pari alla profondità D, di infissione della palanca (3,5 m), larghezza pari a D/2 e profondità (perpendicolare al foglio) pari ad 1 m.

Se  $\gamma_s = 1,92 \text{ ton/m}^3$ , allora  $\gamma' = \gamma_s - \gamma_w = 0,92$

Il prisma pesa, per ogni metro:

$0,92 \times 3,5 \times 1,75 \times 1 = 5,635 \text{ ton}$  (corrispondente alla forza diretta verso il basso, Fd)

la sottospinta idraulica (*seepage force*, sovrappressione idrostatica, forza diretta verso l'alto Fu) si può calcolare facendo la media di quella agente alla base nei punti A, B, calcolando il carico piezometrico come indicato a pag.10 sulla base della relazione di Bernoulli ( $h = z + p/\gamma$ ).

Essendo 14 cadute di potenziale, la perdita di carico unitaria è  $6 \text{ m}/14 = 0,428 \text{ m}$ , ora da A al fondo scavo vi sono 4 cadute di potenziale e da B al fondo scavo 2,5 cadute, quindi la differenza di carico piezometrico è:

per A =  $4 \times (6/14) = 1,71 \text{ m}$

per B =  $2,5 \times (6/14) = 1,07 \text{ m}$

e la la sottospinta è dunque [2]

Per A:  $1,71 \times 1 = 1,71 \text{ ton/ m}^2$

Per B:  $1,07 \times 1 = 1,07 \text{ ton/ m}^2$

La sovrappressione media è  $1,39 \text{ ton/ m}^2$  per un prisma di base unitaria e per un prisma pari a quello di rottura (con dimensioni di base D/2 ed 1) è:

$1,39 \times 1,75 \times 1 = 2,43$

La rottura avviene quando la sottospinta idraulica è uguale al peso del terreno immerso, cioè:

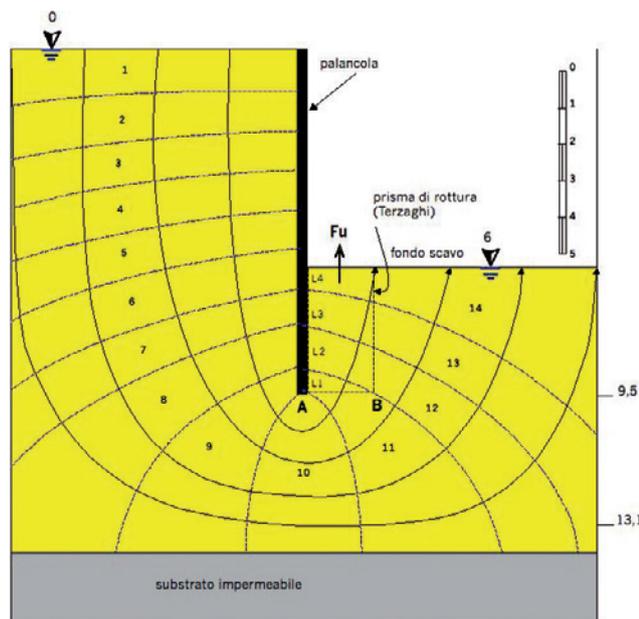


Fig. 9

Applicando il metodo descritto da Cedergren con il calcolo del gradiente medio (im) per l'elemento di volume considerato (prisma di rottura di Terzaghi), tra la base AB ed il fondo scavo vi sono 4 cadute di potenziale (L1, L2, L3, L4) pari a  $0,428 \times 4 = 1,712 \text{ m}$  su di un percorso di 3,5 m; il gradiente è quindi:

$im = 1,712/3,5 = 0,48$

$F_u = im \gamma_w V = 0,48 \times 1 \times 3,5 \times 1,75 \times 1 = 2,94$

$F_d = 5,635$

Fattore di sicurezza =  $\gamma'V / im \gamma_w V = 5,635/2,94 = 1,91 \ll 4$  (condizione non verificata)

**ESEMPIO**

Con riferimento alla paratia in fig. 10, si disegni il reticolo di filtrazione valutando il coefficiente di sicurezza al sollevamento del fondo scavo; quindi determinare l'altezza dello strato di ghiaia che deve essere posto a valle della paratia per ottenere un coefficiente di sicurezza pari a 4 (a seguito della deposizione dello strato di ghiaia il livello piezometrico sul fondo scavo si alza in corrispondenza del tetto della ghiaia)

$\gamma_s \text{ ghiaia} = 1,8 \text{ ton/m}^3$

$k = 0,1 \text{ m/s}$

$\gamma_s \text{ sabbia limosa} = 1,9 \text{ ton/m}^3$

$k = 10^{-5} \text{ m/s}$

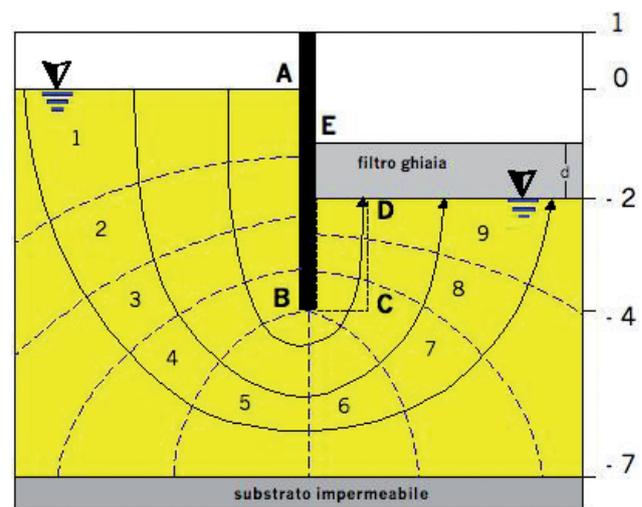


Fig. 10

Prima dell'applicazione del filtro:

$\Delta H = 2 \text{ m}$  (differenza di carico piezometrico totale)

$N_d = 9; N_f = 3$

$\Delta h = 2/9$  (equidistanza delle superficie equipotenziali) sottospinta idraulica al piano BC (base prisma di rottura)

$$[\Delta H - (6/9) \Delta H] \gamma_w$$

$$[2 - (6/9) 2] \times 1 = 0,66 = F_u$$

$$F_d = \gamma' D = 0,9 \times 2 = 1,8$$

Fattore di sicurezza =  $\gamma' D / \gamma_w \Delta h = 1,8/0,66 = 2,7 < 4$  (condizione non verificata)

Applicando il metodo di Cedergren con il calcolo del gradiente medio per il prisma di rottura di Terzaghi, si ottiene:

tra la base BC ed il fondo scavo vi sono tre salti di potenziale su 2 m di altezza del prisma di rottura e la differenza di carico per ogni caduta di potenziale è 2 m/9 = 0,22 m; il gradiente medio è pertanto di:

$$i_m = 0,22 \text{ m} \times 3 / 2 \text{ m} = 0,33$$

$$F_u = i_m \gamma_w V = 0,33 \times 1 \times 2 \times 1 \times 1 = 0,66$$

$$F_d = \gamma' V = 0,9 \times 2 \times 1 \times 1 = 1,8$$

Fattore di sicurezza =  $\gamma' D / \gamma_w i_m V = 1,8 / 0,66 = 2,7 < 4$

I due metodi danno quindi valori uguali per il fattore di sicurezza, a differenza dell'esempio precedente grazie ad una migliore costruzione grafica.

Una volta posto lo strato di ghiaia di spessore sconosciuto  $d$ , la differenza di carico piezometrico è

$\Delta H = (2 - d)$ , e tra le due facce del prisma di rottura (3 salti di potenziale):

$$3 \times (2 - d) / 9$$

avendo fissato il fattore di sicurezza uguale a 4, abbiamo:  $F_d / F_u = 4$ , sostituendo:

$$(0,9 \times 2) + (0,8 \times d) / 1 \times (2-d)/3 = 0,4 \text{ m}$$

### Fenomeni di trascinamento delle particelle solide (piping)

I lavori sotto falda prevedono quasi tutti dei sistemi di drenaggio artificiale.

In genere tali metodi si applicano considerando il fatto che l'abbassamento non ha efficacia con terreni dotati di  $D_{10} < 0,1 \text{ mm}$  ed in pratica si è visto che il tempo di drenaggio aumenta considerevolmente quando  $D_{10} < 0,05 \text{ mm}$ .

A seconda delle modalità con il drenaggio viene condotto, si generano delle variazioni nel flusso sotterraneo che producono una concentrazione delle linee di corrente ed aumento locale di velocità delle particelle fluide.

La conseguenza diretta del fenomeno (*piping*) è un aumento dell'erosione e del trascinamento dei fini con for-

mazione di cavità via via più grandi e danneggiamento delle fondazioni o vistosi cedimenti di terreno in superficie.

Le conseguenze negative delle rotture per piping si possono ridurre solo inserendo dei filtri a contatto con il materiale erodibile.

Anche se non esiste un metodo per calcolare un coefficiente di sicurezza nei confronti dell'erosione sotterranea, vi sono diverse possibilità dettate dall'esperienza che permettono di contenere tale fenomeno.

Una delle più adottate è quella di evitare la concentrazione delle linee di flusso soprattutto ai punti di uscita. La riduzione della sezione di passaggio delle linee di corrente determina un aumento della velocità delle particelle fluide e quindi dell'energia meccanica con conseguente maggiore capacità di trasporto dei fini.

I terreni sono in genere costituiti da particelle con diverse classi di diametri e se i vuoti nei filtri naturali sono abbastanza piccoli da trattenere il  $D_{85}$  del materiale circostante anche le particelle restano in posto. (*Taylor*).

Secondo quanto consigliato dall'U.S.Army Corps of Engineers, per impedire il movimento di particelle fini attraverso i filtri si devono rispettare le seguenti condizioni:

$$D_{15} \text{ del filtro} \\ \text{-----} \leq 5$$

$$D_{85} \text{ del terreno}$$

$$D_{50} \text{ del filtro} \\ \text{-----} \leq 25$$

$$D_{50} \text{ del terreno}$$

### Bibliografia

CASAGRANDE A.1940 *Seepage through dams*, Bpston Soc. of Civil Eng.

CEDERGRÉN HARRY1989 *Seepage, Drainage and Flow Nets*, J. Wiley and Sons teoria e pratica, Pitagora

CUSTODIO, LLAMAS 1996 *Idrologia Sotterranea*, Flaccovio Freeze, R.A. and Cherry, J.A.1979Groundwater, Prentice Hall, Englewood Clifs, N.J.

HARR, M.E. 1962 *Groundwater and Seepage: Mac Graw Hill*, New York

TODD DAVID KEITH 1980 *Groundwater hydrology*, J. Wiley and Sons