

DISPENSE DI IDROGEOLOGIA APPLICATA

PARTE II

A cura di V. Francani e L. Alberti

vincenzo.francani@polimi.it, luca.alberti@polimi.it

Indice

1	RELAZIONE DI DUPUIT PER LE FALDE CILINDRICHE LIBERE E PER LE FALDE RADIALI	2
1.1	Falda libera cilindrica.....	2
1.2	Falda confinata cilindrica	3
1.3	Falda radiale.....	4
1.4	UTILIZZO DELLA RELAZIONE DI DUPUIT	5
1.5	DRENAGGIO MEDIANTE POZZI E TRINCEE	6
1.6	Falda inclinata	8
1.6.1	Fronte di richiamo.....	9
1.7	Schema tecnico di un pozzo.....	12
1.7.1	Fase di realizzazione	13
1.7.2	Tecniche di perforazione.....	13
1.7.3	Completamento del pozzo	16
1.7.4	Le tubazioni.....	16
1.7.5	I filtri.....	16
1.7.6	Il drenaggio.....	17
1.7.7	Lo sviluppo del pozzo	18
1.8	METODI PER LA DEFINIZIONE DELLA CONDUCIBILITÀ IDRAULICA.....	19
1.8.1	Metodo granulometrico.....	19
1.8.2	Metodo con permeametri.....	20
1.8.3	Prove da campo puntuali: metodo Lefranc	21
1.8.4	Prove da campo: metodo di pompaggio	21
	DISCUSSIONE DELLA LEZIONE DI IDROGEOLOGIA 2.....	23

1 RELAZIONE DI DUPUIT PER LE FALDE CILINDRICHE LIBERE E PER LE FALDE RADIALI

La legge di Darcy non è direttamente applicabile al caso di un pozzo, in quanto essa è stata predisposta per una falda a filetti paralleli (falda cilindrica) e per un mezzo acquifero di spessore costante. La legge di Darcy è quindi direttamente applicabile solamente ai casi di falda confinata, come si può osservare dalla figura riportata.

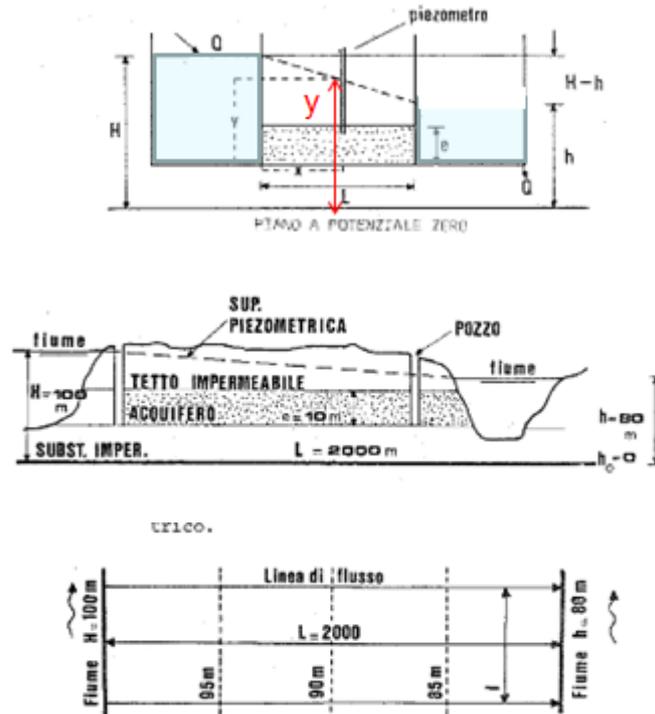


Figura 1 – Permeametro di Darcy disposto orizzontalmente (in alto); applicazione ad un acquifero (in mezzo) e proiezione su carta piezometrica dell’acquifero (in basso)

Nella Figura 1 è rappresentato in alto il permeametro di Darcy disposto orizzontalmente, in modo che due recipienti sono collegati da un mezzo acquifero chiuso in un contenitore prismatico. La figura intermedia trasferisce in un acquifero naturale i parametri descritti nella precedente, e quella inferiore rappresenta la carta piezometrica di questo acquifero.

Si nota che la falda rappresentata è in pressione, ed ha cadente piezometrica costante. Nelle falde libere, la superficie piezometrica non ha un profilo rettilineo ma parabolico. Per risolvere occorre quindi basarsi su una nuova relazione nel caso non solo di falda libera, ma anche di falda confinata: è la relazione di Dupuit.

1.1 FALDA LIBERA CILINDRICA

In presenza di una falda libera (Figura 2), con una sezione di larghezza pari a w , in base alla legge di Darcy, si ha che:

$$\left. \begin{aligned} v_D &= \frac{Q}{yw} \\ v_D &= Ki = K \frac{dy}{dx} \end{aligned} \right\} Q = Kwy \frac{dy}{dx} \rightarrow Qdx = Kwydy \quad (1.1)$$

Integrando (nel punto $x = 0$):

$$Qx = \frac{Kw}{2} y^2 + c \rightarrow c = -\frac{Kw}{2} h^2 \Rightarrow Qx = \frac{Kw}{2} (y^2 - h^2) \quad (1.2)$$

Si ottiene la **relazione di Dupuit per falda libera**:

$$Q = \frac{Kw}{2x} (y^2 - h^2) \quad (1.3)$$

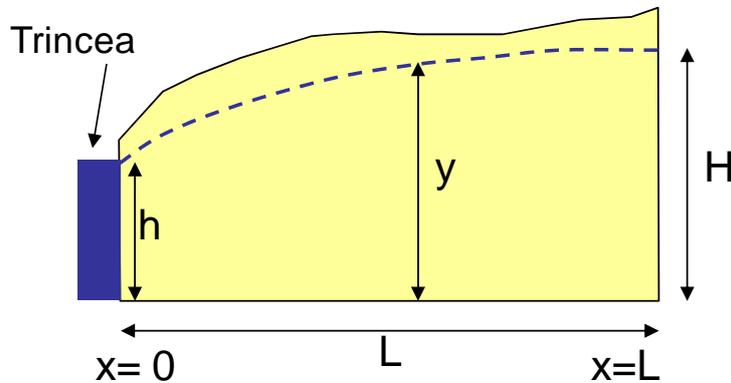


Figura 2 – Esempio di falda libera

ESERCIZIO 1

Calcolare la permeabilità di un acquifero libero sulla base dei risultati ottenuti durante una prova in regime stazionario, caratterizzata da:

- portata estratta: $Q = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$;
- carico piezometrico (spessore saturo) osservato all'interno del pozzo a regime: $h = 17,92\text{m}$;
- carico piezometrico misurato in un piezometro posto 15m a valle del pozzo: $y = 18,3\text{m}$.

Si consideri un raggio del pozzo pari a 30 cm.

1.2 FALDA CONFINATA CILINDRICA

In regime di falda confinata (Figura 3), invece, e un pozzo in emungimento, in base alla legge di Darcy si ha che:

$$\left. \begin{aligned} Q &= AK \frac{dy}{dx} \\ A &= 2\pi x b \end{aligned} \right\} Q = 2\pi x b K \frac{dy}{dx} \rightarrow Q \frac{1}{x} dx = 2\pi T dy \quad (1.4)$$

Integrando si ottiene (per $x = r$ e $y = h$)

$$Q \ln x = 2\pi T y + c \rightarrow c = Q \ln r - 2\pi T h \rightarrow Q \ln x = 2\pi T y + Q \ln r - 2\pi T h \rightarrow Q = \frac{2\pi T}{\ln x/r} (y - h) \rightarrow Q = \frac{2\pi T}{\ln R/r} (H - h) \quad (1.5)$$

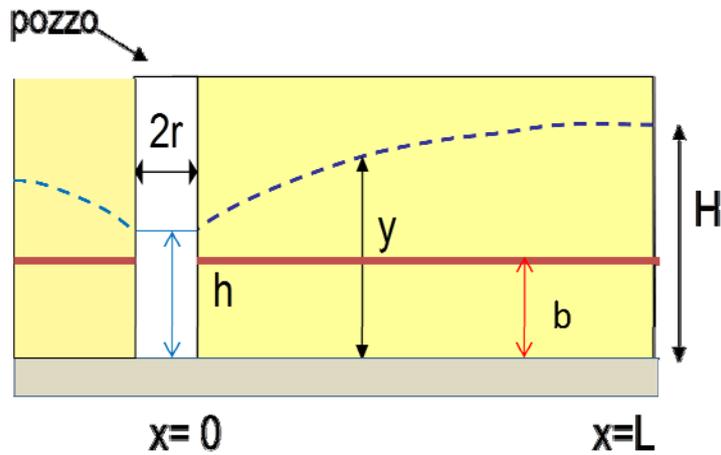


Figura 3 – Esempio di falda confinata, con acquifero di spessore b

1.3 FALDA RADIALE

I pozzi determinano una variazione delle linee di flusso. Quando si hanno depressioni prodotte dalle captazioni i filetti liquidi si dispongono in modo tale da generare una falda radiale e non cilindrica come rappresentato nella Figura 4.

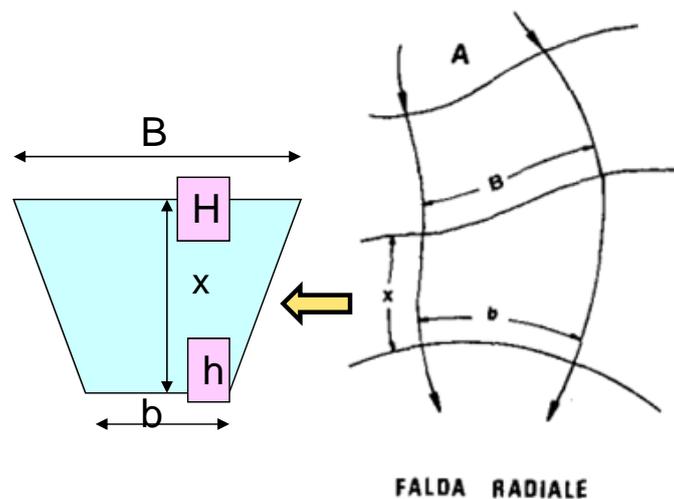


Figura 4 – Esempio di falda radiale

La falda radiale ha mutamenti nella direzione delle linee di flusso. L'espressione della portata del tubo di flusso in questa situazione diviene secondo Kaminsky:

$$Q = e \cdot k \cdot \frac{B-b}{\ln B/b} \cdot \frac{H-h}{x} \quad (1.6)$$

in cui $B[m]$ e $b[m]$ rappresentano le lunghezze dei tratti di isopieza distanti $x[m]$ (misurato lungo una linea di flusso). Per le falde radiali libere, vale la relazione :

$$Q = k \frac{(B-b)(H^2 - h^2)}{2x \ln \left(\frac{B}{b} \right)} \quad (1.7)$$

ESERCIZIO 2

Calcolare la portata di una falda radiale sapendo che $K = 0.004 \text{ m/s}$, $e = 15 \text{ m}$ (Figura 5).

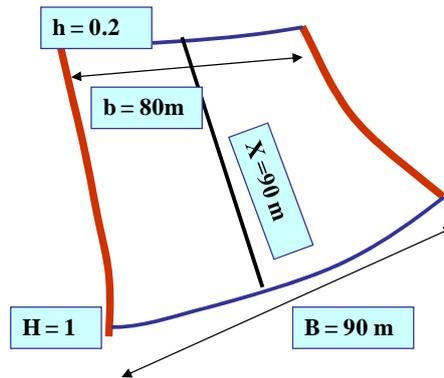


Figura 5 – Falda radiale per esercizio proposto

ESERCIZIO 3

Calcolare la portata della porzione di una falda in pressione che percorre un tubo di flusso in cui l'isopieza 100 m s.l.m. presenta lunghezza di 200 m e l'isopieza 90 di 180 m; essa sia posta a 1000 m di distanza lungo la linea di flusso che costituisce il limite laterale del tubo di flusso considerato, nel quale la trasmissività sia costantemente pari a $0,02 \text{ m}^2/\text{s}$.

1.4 UTILIZZO DELLA RELAZIONE DI DUPUIT

La seguente Tabella 1 riassume le relazioni che, derivate da quella di Dupuit (1.3), esprimono per i diversi tipi di falda e di captazione i rapporti fra la portata estratta gli altri parametri idrogeologici.

Tabella 1 – Relazioni derivate da Dupuit per diversi tipi di falda e captazione

	CALCOLO DELLA PORTATA AFFLUENTE ALLE CAPTAZIONI	
TIPO DI FALDA	DRENO ORIZZONTALE	POZZO
Libera	$Q = \frac{(y^2 - h^2)wk}{2x}$	$Q = \frac{\pi k(y^2 - h^2)}{\ln \frac{x}{r}}$
Confinata	$Q = b \frac{(y - h)wk}{x}$	$Q = \frac{2\pi T(y - h)}{\ln \frac{x}{r}}$
Radiale confinata	$Q = \frac{(B - w)(y - h)T}{x \ln \left(\frac{B}{w}\right)}$	

La differenza di quota piezometrica fra due punti dell'acquifero dipende dalla portata estratta e dalla distanza fra i due punti. In regime stazionario è descritta dalle seguenti relazioni. **Queste relazioni (Tabella 2) sono abitualmente utilizzate per determinare i parametri idrogeologici (es. la T) o l'altezza piezometrica y a una distanza qualsiasi dal pozzo con acquifero omogeneo.**

ESEMPIO

Un pozzo che capta un acquifero in pressione con $T = 0,02 \text{ m}^2/\text{s}$, esercita un prelievo di 10 l/s . Calcolare il livello piezometrico y a 20 m dal pozzo, che ha raggio $r = 0,2 \text{ m}$ e livello h nel pozzo pari a 15 metri .

SOLUZIONE:

Si risolve ponendo come incognita l'innalzamento $s = y-h$ tra i livelli a $0,20 \text{ m}$ e a 20 metri dal pozzo: $s = y - h$. Utilizzando la legge di Dupuit, si ottiene che $s = \frac{Q \ln 100}{0,02 * 2\pi} = \frac{0,01 \text{m}^3 / \text{s} * 4,605}{0,126 \text{m}^2 / \text{s}} = 0,3654 \text{m}$

Per determinare y è sufficiente sommare s al valore noto di h :

$$y = 15 \text{ m} + 0,3654 \text{ m} = 15,3654.$$

Tabella 2 – Calcolo della quota piezometrica in un punto in regime stazionario (da Tabella 1)

TIPO DI FALDA	DRENO ORIZZONTALE	POZZO
Libera	$y^2 = h^2 + \frac{2xQ}{wk}$	$y^2 = h^2 + \frac{Q \ln \frac{x}{r}}{\pi k}$
Confinata	$y = h + \frac{Qx}{wkb}$	$y = h + \frac{Q \ln \frac{x}{r}}{2\pi T}$
Radiale confinata	$y = \frac{h + Qx \ln \frac{B}{w}}{T(B-w)}$	

1.5 DRENAGGIO MEDIANTE POZZI E TRINCEE

Dalle relazioni proposte nella precedente Tabella 2, in presenza di pozzi per falda confinata, è possibile ricavare:

$$H - y = H - \left(h + \frac{Q \ln \frac{x}{R}}{2\pi T} \right) \quad (2.1).$$

Grazie a questa equazione, è possibile determinare le **linee ad eguale abbassamento**, sottraendo, in ogni punto, alla quota $H [m]$ della falda senza prelievi, il valore dell'abbassamento $s [m]$.

Ad esempio, se la falda è a quota 85 m s.l.m. quando è indisturbata, e il livello piezometrico y , misurato a $x = 20 \text{ m}$ dal pozzo è pari a $y = 80 \text{ m}$, l'abbassamento risulta pari a $s = 5 \text{ m}$ (Figura 6).

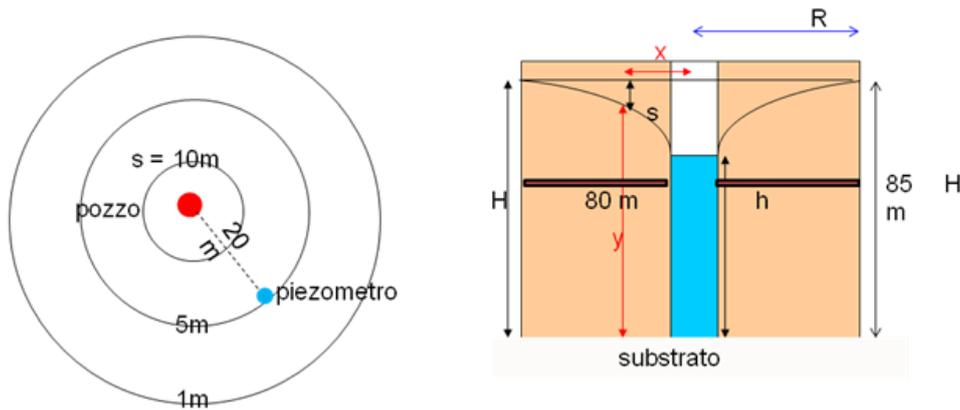


Figura 6 – Esempio di linee ad uguale abbassamento

Per una trincea drenante, invece, dalla relazione proposta in Tabella 2, si ha che:

$$H - y = H - \left(h + \frac{Qx}{wT} \right) \quad (2.2)$$

ESERCIZIO 4

Un pozzo che capta un acquifero in pressione con $T = 0,02 \text{ m}^2/\text{s}$, esercita un prelievo di 10 l/s . Calcolare l'abbassamento fra due punti situati a $0,2 \text{ m}$ e a 20 m rispettivamente dal pozzo.

SOLUZIONE:

Si risolve ponendo come incognita l'abbassamento tra i livelli a $0,20 \text{ m}$ e a 20 metri dal pozzo:

$$s = y - h. \text{ Utilizzando la legge di Dupuit, si ottiene che } s = \frac{Q \ln 100}{0,02 * 2\pi} = \frac{0,01 \text{m}^3 / \text{s} * 4,605}{0,126 \text{m}^2 / \text{s}} = 0,3654 \text{m}$$

ESERCIZIO 5

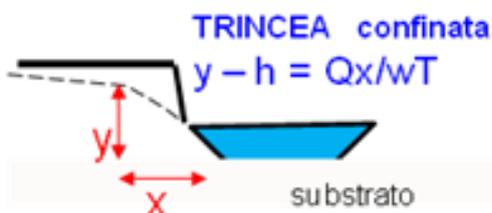
Dovendo ridurre di un metro l'altezza piezometrica H (80 m s.l.m.) della falda confinata indisturbata nel punto x distante 20 metri dal pozzo, come si deve procedere per calcolare la portata da estrarre? (il pozzo presenta un raggio $r = 0,3 \text{ m}$).

SOLUZIONE:

Si deve calcolare il valore di y alla distanza $x = 20 \text{ metri}$, in modo che $s = H - y = 1 \text{m}$; quindi in modo tale che $y = 79 \text{ m}$. Per avere una soluzione valida, è bene evitare di inserire il raggio di influenza R (di difficile determinazione), nella formula utilizzata. Per ottenere questo, si deve impiegare una relazione in cui non compaiono né H né R , come ad esempio $y = h + \frac{Q \ln(x/r)}{2\pi T}$. Se h e T non sono noti, si deve procedere alla loro acquisizione con una prova di pompaggio:

1. Con la prova di pompaggio, qui non riportata, si verifica che $T = 0,0234 \text{ m}^2/\text{s}$, con un abbassamento del pozzo di 2 metri . Quindi $h = 80 \text{ m} - 2 \text{ m} = 78 \text{ m}$,
2. Si applica poi la relazione di Dupuit che fornisce la portata utilizzando x , y , r e h , oltre a T . si ottiene, per $y = 79 \text{ m}$ alla distanza di 20 metri dal pozzo:

$$Q = 2\pi T \frac{y-h}{\ln(20\text{m}/0,3\text{m})} = 2\pi * 0,0234 \text{m}^2 / \text{s} * 1\text{m} / 4,2 = 0,035 \text{m}^3 / \text{s}$$



ESERCIZIO 6

In una falda in pressione, un fiume è inciso per 6 m, e attraversa un acquifero di $T = 0,005 \text{ m}^2/\text{s}$ dotato di un metro di spessore. Considerando un tratto del fiume di lunghezza $w = 100 \text{ m}$, con falda a filetti paralleli e diretta ortogonalmente ad un corso d'acqua, si deve calcolare,

tenuto conto di un'altezza piezometrica h nella trincea pari a 3 m, quale valore assume y alla distanza di 10 m quando l'afflusso al fiume nel tratto considerato è di $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

SOLUZIONE:

Dalle relazioni precedentemente enunciate, si osserva che y è facilmente calcolabile sommando al valore di $h = 3 \text{ m}$ quello di Qx/wT , pari a $0,1 \text{ m}^3/\text{s} * 10 \text{ m} / (100 * 0,005) = 2 \text{ m}$. Il valore dell'altezza piezometrica y , quindi, è pari a 5 metri.

1.6 FALDA INCLINATA

Se il terreno è omogeneo, è possibile calcolare con la relazione di Dupuit le linee di uguale abbassamento s , valutate con la procedura sperimentata negli esercizi precedenti.

Le quote piezometriche in ogni punto si ottengono sottraendo s alla quota H della falda indisturbata, ottenendo una nuova superficie piezometrica che, se la falda indisturbata è piana e orizzontale, si presenta con una depressione a forma di cono al cui vertice si trova il livello piezometrico del pozzo.

Se la falda indisturbata ha una superficie piezometrica complessa (linea blu della figura), i valori di H cambiano da un punto all'altro. Sottraendo il corrispondente valore dell'abbassamento, correttamente calcolato con Dupuit in ciascuno di questi punti (cono simmetrico della figura successiva), avremo una depressione piezometrica (in tratteggio) non più così regolare come quella con falda piatta.

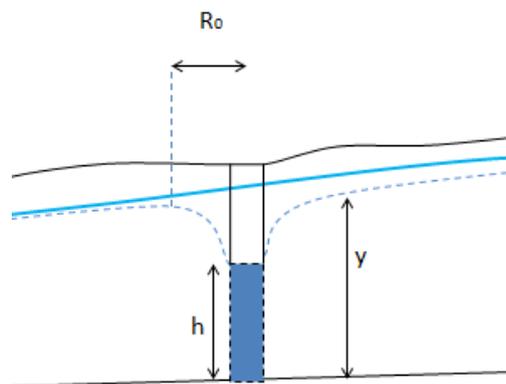


Figura 7 – Falda inclinata e raggio d'influenza fittizio R_0

Quando la falda è inclinata con cadente costante, ed è a filetti paralleli, la piezometria intorno al pozzo viene ad assumere la configurazione rappresentata nella figura seguente. La zona colorata corrisponde a quella in cui i filetti liquidi convergono verso il pozzo, detta "zona di cattura" del pozzo, mentre le linee di uguale abbassamento sono rappresentate in tratteggio.

L'abbassamento e la zona di cattura, quindi **non corrispondono**.

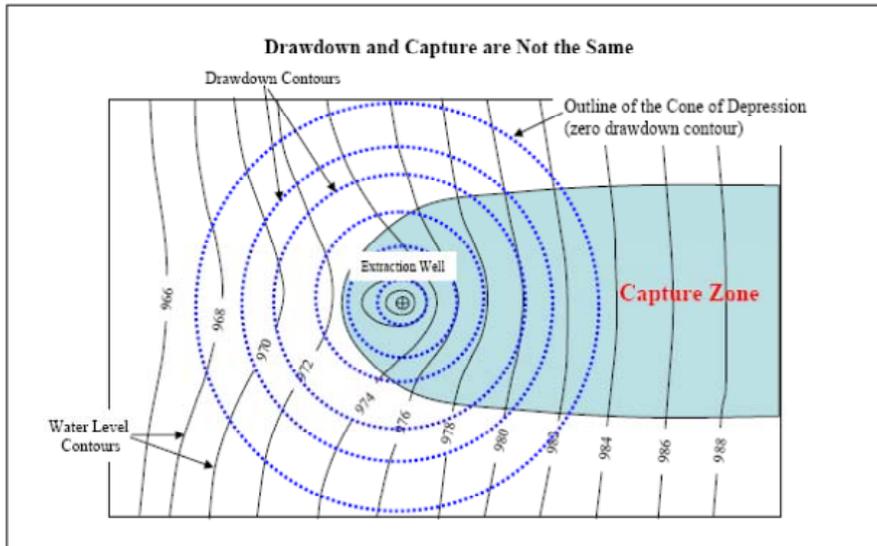


Figura 8 – Zona di cattura (in colore) e linee di ugual abbassamento (tratteggiate) di un pozzo in falda inclinata

Quando la falda è inclinata, le linee di flusso sono dirette verso il pozzo come rappresentato nella figura seguente

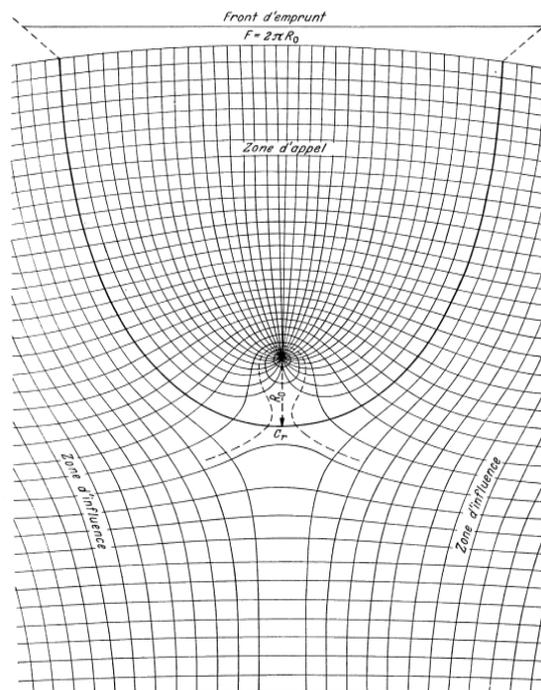


Figura 9 – Schematizzazione del fronte di richiamo di un pozzo

1.6.1 Fronte di richiamo

Nel caso di un pozzo che emunge da una falda con gradiente i [-] le particelle di acqua sono sottoposte a due sollecitazioni diverse:

- Quella di **moto naturale** della falda: $v_D' = Ki$
- Quella in **direzione del pozzo**: $v_D = Q / A = Q / 2\pi bx$

Nel punto di stagnazione a valle del pozzo lungo la linea di flusso che passa attraverso di esso, il moto verso valle si arresta dal momento che i due vettori sono allineati, ma hanno verso opposto, ovvero:

$$v_D = Q / A = Q / 2\pi bx = ki$$

$$x = Q / 2\pi Ti \quad (3.1)$$

che rappresenta la distanza del punto di stagnazione dal pozzo, detta **raggio di influenza fittizio** (R_0). Il calcolo del punto di stagnazione è utile dal momento che:

- 1) permette di definire dove termina a valle del pozzo l'azione di cattura dello stesso;
- 2) consente di definire l'area a valle di un pozzo barriera dove posizionare il piezometro di controllo;
- 3) consente di definire la distanza a cui si devono trovare eventuali corpi idrici di valle perché le loro acque non vengano estratte dal pozzo.

A monte ad una distanza sufficiente perché non si abbia più l'influenza del richiamo del pozzo le particelle avranno una velocità darciana, e la portata estratta sarà data dal valore della velocità moltiplicato per la sezione di flusso attraversata dalle particelle di acqua poi catturate dal pozzo:

$$A = wb$$

$$Q = wbKi = wTi \quad (3.2)$$

Detto w il **fronte di richiamo del pozzo (F)**, esso varrà (10):

$$F = \frac{Q}{Ti} \quad (3.3)$$

Il fronte si può esprimere anche in funzione di R_0 :

$$F = 2\pi R_0 \quad (3.4)$$

mentre l'equazione dello spartiacque risulta essere:

$$I / 2F = R_0 \arctan \frac{y}{x} \quad (3.5)$$

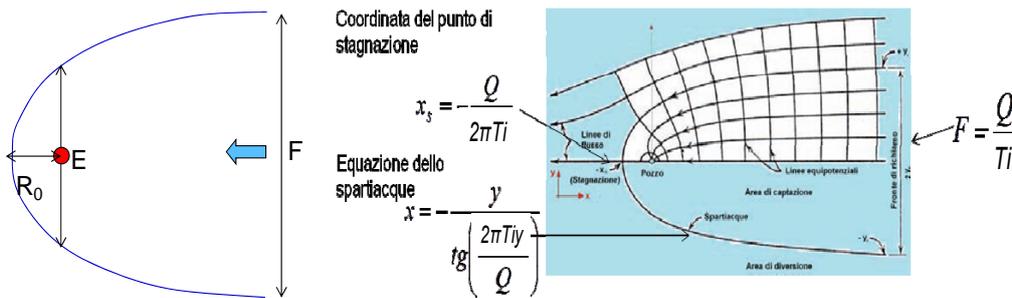


Figura 10 – Schematizzazione del fronte di richiamo di un pozzo, della coordinata del punto di stagnazione e dello spartiacque piezometrico.

Il pozzo, richiamando acqua dall'acquifero, crea un campo di moto radiale e una depressione piezometrica che viene chiamata cono di influenza. Una volta che viene avviato il pompaggio, ad una portata costante, il cono si espande progressivamente sino al raggiungimento di una condizione di equilibrio tra la portata estratta e quella defluente dalla falda. Il **raggio di influenza R** di un pozzo può essere definito come la distanza fino alla quale si risente in modo apprezzabile della depressione piezometrica provocata da un pozzo di pompaggio (Figura).

Il raggio di influenza R può essere stimato da tabelle empiriche in relazione alla trasmissività o alla litologia:

R = 500 m e oltre	per le ghiaie grossolane
R = 200 ÷ 300 m	per le ghiaie
R = 150 ÷ 200 m	per le sabbie grossolane
R = 100 ÷ 150m	per le sabbie medie
R = 80 ÷ 100m	per le sabbie fini

O può essere stimato sulla base delle seguenti relazioni:

$$R = 550(Ti)^{1/4} \quad \text{Relazione di Cambefort per falde in pressione}$$

$$R = 3000sK^{1/2} \quad \text{Relazione di Sichardt}$$

$$R = (2.25T \frac{t}{S})^{1/2} \quad \text{in regime transitorio}$$

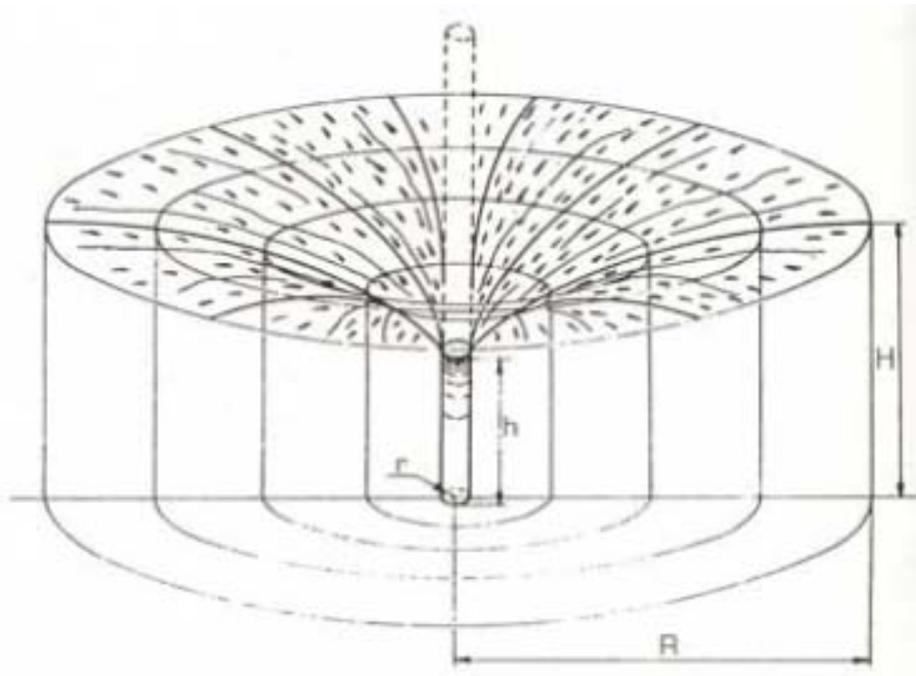


Figura 11 – Definizione di raggio di influenza e cono di influenza di un pozzo di pompaggio

Si parla di **livello statico** in presenza di un pozzo in quiete, che quindi non opera alcun pompaggio.

Si parla invece di **livello dinamico** quando il pozzo è in funzione.

Si definisce il **regime transitorio (non steady)** quando il livello piezometrico si abbassa nel tempo e il cono di depressione si estende progressivamente; si definisce il **regime quasi permanente** quando le variazioni piezometriche sono sempre meno apprezzabili; infine si definisce il **regime permanente o stazionario (steady)** quando il cono non si espande più, e le variazioni piezometriche sono nulle.

1.7 SCHEMA TECNICO DI UN POZZO

La realizzazione di un pozzo nasce dall'insieme di diverse competenze scientifiche. Infatti, ad esempio, la scelta errata dei filtri, dei dreni o tecniche e attrezzature di perforazione inadatte possono fortemente condizionare la resa del pozzo. Queste caratteristiche verranno illustrate nel seguito.

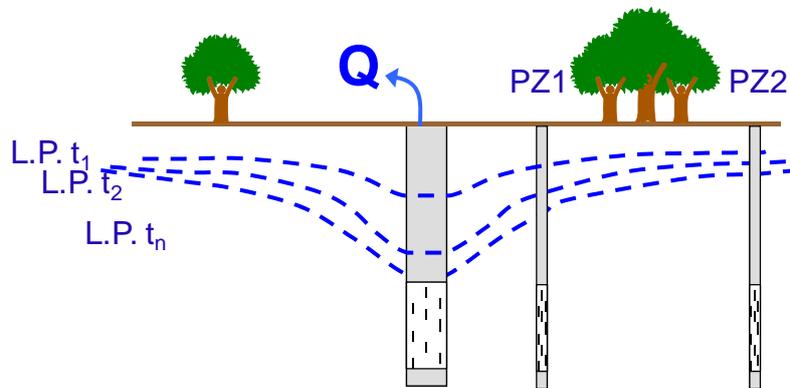


Figura 12 – Schema di un pozzo

Un pozzo viene definito come uno scavo verticale con diametri che possono andare da pochi cm (15) ad alcuni metri il cui scopo è quello di far fluire al suo interno le acque degli acquiferi circostanti e poterle estrarre tramite pompe). Un piezometro invece ha usualmente un diametro della tubazione compreso tra 1" (circa 25 mm) e 4" (100 mm). Esso viene utilizzato per scopi di monitoraggio della piezometria o per la qualità delle acque sotterranee.

Si definisce, quindi, sondaggio geognostico la perforazione con diametro compreso tra alcuni cm e pochi dm, condotta allo scopo di ricostruire il profilo topografico, prelevare campioni rappresentativi per eseguire prove in laboratorio, consentire l'installazione di strumenti in foro e di eseguire prove all'interno di essi. Uno schema di pozzo – tipo si configura come rappresentato nella Figura 13.

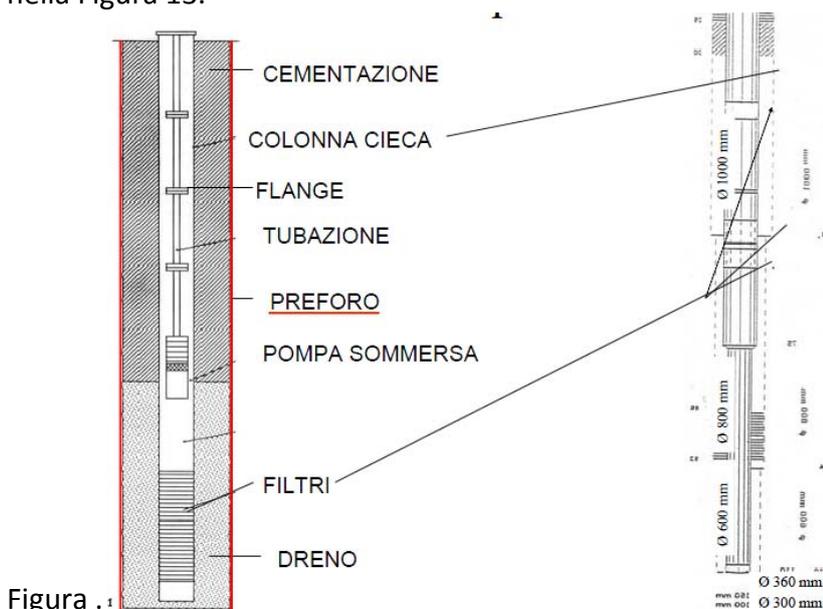


Figura 13 – Schema tipico di un pozzo di emungimento

La cementazione è indispensabile per ripristinare i livelli a bassa permeabilità attraversati dalla perforazione al fine di impedire la circolazione dei fluidi e quindi degli inquinanti

nell'intercapedine creata fra perforazione e la tubazione del pozzo. La tubazione del pozzo avrà un diametro dipendente dalle dimensioni di ingombro delle flange della tubazione di mandata della pompa di produzione. È raccomandabile il non superamento della velocità di 2 – 2.5 m/s per non avere eccessive perdite di carico idraulico. Spesso si mantiene costante il rivestimento fino a fondo pozzo, dimensionando il pozzo interamente sulla “flange”. I filtri devono interessare il 100% dello spessore della falda artesianica da captare mentre per falde freatiche il filtro non supera il 50% salvo presenza di stratificazioni. I dettagli verranno trattati di seguito. Infine il dreno deve aver uno spessore di 8 – 10 cm per avere piena azione drenante. Si raccomanda di non avere spessori superiori a 20 – 25 cm di spessore per non rendere difficoltosa la successiva fase di sviluppo.

1.7.1 Fase di realizzazione

Le fasi realizzative di un pozzo devono prevedere dapprima indagini preliminari per l'ubicazione e la scelta del tipo di opera (studi foto interpretativi, prospezioni geofisiche, censimento di pozzi e sorgenti, raccolta dati statistici idrogeologici e meteorologici), poi si ha la perforazione del pozzo che può avvenire mediante differenti tecniche, il completamento del pozzo e il suo sviluppo. Tecniche di perforazione

Le tecniche di perforazione del sottosuolo sono numerose e si analizzeranno solo quelle più diffuse nella costruzione dei pozzi per acqua.

- Sistema a mano: è il sistema più adatto in terreni compatti o debolmente cementati; arriva fino ad una profondità di 10 m facendo uso di diametri molto elevati. Attualmente risulta un metodo poco utilizzato.
- Sistema a percussione: è il sistema adatto per terreni sciolti, coesivi o rocce tenere. Si può arrivare fino ad una profondità di 150 m con diametro decrescente con l'approfondirsi dello scavo. Il sistema è basato sulla frammentazione o asportazione del terreno di un utensile pesante (ad es. benna per terreni incoerenti o coesivi senza acqua, sonda per terreni saturi, scalpello per massi di terreni ghiaiosi o terreni molto compatti) collegato mediante cavo di acciaio azionato da un argano a caduta libera che imprime un movimento verticale alternato. Le pareti di scavo vengono sostenute dalla tubazione di rivestimento che viene fatta avanzare progressivamente con lo scavo. Man mano che si va in profondità, si utilizzano tubazioni di diametro progressivamente decrescente per la crescente difficoltà di manovra dovuta all'attrito con il terreno (Figura).

I vantaggi del sistema a percussione vanno dalla corretta valutazione della stratigrafia del terreno attraversato alla possibilità di operare a secco senza danneggiare la falda né richiedere grandi riserve di acqua, alla velocità di preparare il cantiere di lavoro. Il metodo ha però alcuni svantaggi come la lentezza delle operazioni nel caso di grossi massi o presenza di rocce, avanzamento lento maggiore è la profondità di escavazione.

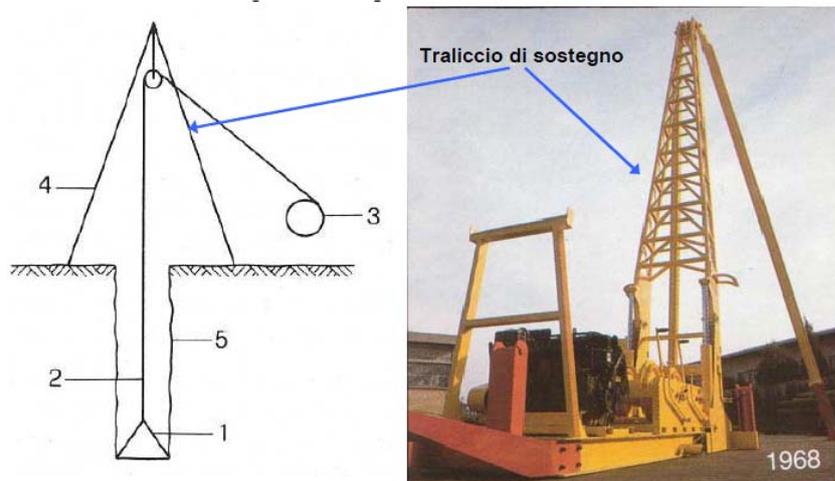


Figura 14 – Realizzazione di un pozzo mediante sistema a percussione

- Sistema a rotazione:** viene utilizzato per tutti i tipi di terreno con diametri compresi fra 100 e 1500 mm. La profondità supera spesso i 1000 m con una circolazione diretta. Risulta essere il metodo di scavo più diffuso non solo per la realizzazione di pozzi per acqua ma anche per piezometri, pozzi petroliferi e sondaggi geognostici. Limitatamente alla ricerca idrica, lo scavo è realizzato mediante perforatrici oleodinamiche montate su motrici o trattori cingolati. Con questo metodo, la perforazione è realizzata per il movimento rotatorio dell'utensile di perforazione (scalpello) che è posizionato alla fine della batteria di perforazione. L'asta di perforazione superiore è collegata alla testa motrice che imprime il movimento rotatorio. Le aste di perforazione sono costituite da lunghezze variabili tra 3 e 6 m e un certo numero di aste pesanti poste sopra lo scalpello (Figura). Si possono distinguere metodi a carotaggio continuo e a distruzione di nucleo con fanghi.

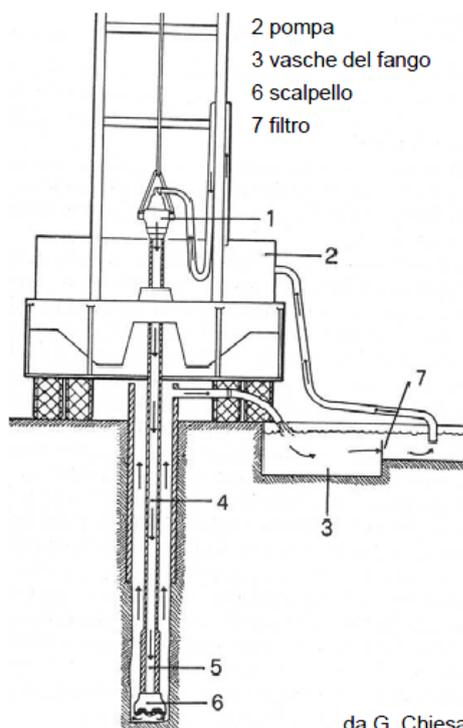


Figura 15 – Esempio di sistema di perforazione a rotazione (da G. Chiesa)

Nel primo metodo lo scavo viene compiuto per mezzo di una serie di aste di perforazione collegate ad una testa motrice. L'ultima di queste aste è costituita dal carotiere dotato di scarpa tagliente o corona che in funzione del materiale da perforare può essere diamantata o costituita da leghe dure. A seconda del tipo di carotiere utilizzato il campione può essere più o meno indisturbato; in particolare si possono distinguere i campionatori utili al recupero di campioni rappresentativi e in genere infissi a percussione (ad esempio Denison utilizzato per rocce deboli e terreni sovra consolidati), dai carotieri che vengono spesso impiegati per approfondire il foro determinando il recupero del materiale (ad esempio il carotiere doppio). Questo metodo viene utilizzato per lo scavo di piezometri con diametri compresi fra 2" e 4", durante la fase di preforo per la realizzazione di un pozzo o per sondaggi geognostici.

Nel secondo metodo, quello a distruzione con circolazione diretta, si procede scavando a sezione piena mediante lo scalpello e disgregando completamente il terreno. I detriti vengono portati in superficie dal fango di perforazione che viene iniettato all'interno delle aste fuoriuscendo dai fori dello scalpello. Risalendo poi dell'intercapedine aste-foro trasportando i detriti, entra nella vasca di decantazione dove si depositano i detriti. Si possono raggiungere 400-500 m.

Il liquido di perforazione ha una composizione che può variare in funzione del tipo di scavo che si sta compiendo, di solito sono fanghi argillosi formantesi per miscelazione con acqua e argilla incontrata durante la perforazione oppure bentonici, composti da una polvere argillosa che forma con l'acqua una soluzione colloidale.

Il fango svolge diverse funzioni come quello di trasportare i detriti, raffreddare e lubrificare lo scalpello, sostenere le pareti di scavo e controllare la pressione dell'acqua in falde artesiane.

Attraverso la distruzione di nucleo con circolazione diretta è possibile raggiungere elevate profondità di perforazione potendo perforare tutti i tipi di rocce e avanzando con grandi velocità senza la necessità di avere tubazioni di rivestimento. Non è possibile invece perforare pozzi di grande diametro né ottenere stratigrafie significative. Talune volte il fluido può contaminare le falde e in terreni o rocce fratturate le perdite di circolazione possono rendere oneroso o addirittura proibitivo lo scavo.

Se la distruzione avviene a circolazione inversa, il fluido di perforazione viene immesso nell'intercapedine aste – preforo ed aspirato all'interno delle aste di perforazione. Tale sistema permette di mantenere una velocità di risalita del fluido sufficientemente elevate anche con perforazioni di grande diametro. Il fluido di perforazione è costituito da acqua sporca di argilla incontrata durante la perforazione. A seconda del tipo di scalpello utilizzato è possibile frantumare il terreno portando in superficie detriti fino ad una dimensione di 10 – 15 cm. Per tale ragione le aste di perforazione sono di diametro elevato fino a 200 mm. Molte volte per perforazioni superiori a 150 m si adotta l'utilizzo di aria compressa sopra lo scalpello di evitare le perdite di carico del fluido di perforazione.

Con tale metodo è possibile perforare pozzi con diametri superiori rispetto alla circolazione diretta senza rischio di inquinamento delle falde. Si richiede però una quantità eccessiva di acqua e una vasca per il fluido di perforazione di grandi dimensioni; non è economicamente vantaggioso per pozzi di piccolo diametro e poco profondi.

- **Sistema a rotopercolazione:** è limitatamente utilizzato per terreni molto compatti; i diametri sono compresi fra i 200 e i 500 mm e si raggiungono al massimo una centinaia di metri. È il metodo di perforazione adatto a terreni duri in cui l'avanzamento in foro avviene principalmente per frantumazione. Ciò avviene grazie al martello di fondo foro posto all'estremità inferiore della batteria di aste, che azionato da aria compressa, fa battere ripetutamente lo scalpello sul fondo. I detriti vengono riportati in superficie dal flusso di aria compressa immesso all'interno delle aste con circolazione diretta. Quando si incontra l'acqua di falda viene aggiunta all'aria una miscela di acqua e schiumogeno per evitare la formazione di agglomerati di particelle. Il metodo non ha bisogno di acqua né di fanghi ed è adatto a rocce con forti perdite di circolazione. Non è invece utilizzato per terreni incoerenti.

1.7.2 Completamento del pozzo

Terminata la perforazione il pozzo deve essere completato con la messa in opera della tubazione definitiva, l'installazione dei filtri in corrispondenza del livello acquifero da captare, l'esecuzione del drenaggio, la cementazione. In questa fase si definiscono i dimensionamenti in modo corretto delle varie parti.

1.7.3 Le tubazioni

La scelta del tipo di tubazione da impiegare per il completamento di un pozzo è legata non solo alle condizioni di sollecitazione meccanica ma anche a possibili fenomeni di corrosione. La soluzione ottimale è quella che prevede l'impiego di tubazioni non deteriorabili nel tempo e robuste. La dimensione della tubazione deve essere sufficiente affinché non si abbiano velocità di ingresso dell'acqua superiore ai 3 cm/s per non incorrere a perdite di carico eccessive. I materiali utilizzati sono PVC, acciaio zincato o inossidabile, ferro o PE (polietilene).

1.7.4 I filtri

Ci sono diversi tipi di filtro più o meno adatti agli acquiferi che si possono incontrare. Il filtro è una porzione forata della tubazione del pozzo avente la funzione di lasciare fluire l'acqua all'interno dell'opera ma non le particelle fini del terreno. Le caratteristiche tipiche di un filtro sono:

- aperture tali da non lasciare passare la sabbia e da non determinare velocità superiori ai 3 cm/s per la Q di esercizio prevista;
- aperture sagomate in modo che non si abbia il loro intasamento. La scelta delle dimensioni
- delle fenestrate dipende dalla presenza o meno del dreno artificiale;
- rapporto tra superficie aperta e superficie totale il più elevato possibile (>10%);
- resistenza meccanica allo schiacciamento sufficiente;

I filtri vengono posizionati in corrispondenza dei terreni saturi più permeabili ritrovati durante la perforazione. Si possono distinguere due diversi tipi di filtro:

- Filtri punzonati passanti con fenestrate parallele con larghezza comprese tra 3 mm (con lamiere di spessore <4 mm) e 5 mm (con spessore >5 mm) e superficie filtrante pari a 17% e 21%. Le perdite idrauliche sono contenute e si ha un intasamento parziale. Questi filtri sono adatti a terreni grossolani;
- Filtri a ponte le cui aperture sono comprese fra 0.8 mm e 2.5 mm. La superficie filtrante è molto ridotta e si possono avere perdite di carico elevate. Il costo contenuto e l'ampio utilizzo per diversi terreni ne decreta il successo;

- Filtro a spirale con luce continua realizzato con filo a sezione trapezoidale avvolto a spirale attorno a tondini portanti che rende difficile l'incastramento di grani del terreno all'interno delle finestrate. Le finestrate di passaggio hanno dimensioni variabili e comprese tra 0.15 e 6 mm e l'elevata superficie filtrante (fino a 45%) facilita il lavaggio mediante ugelli delle pareti per eliminare il pannello del fango. Vengono usati spesso filtri muniti di tubo interno di rinforzo quando si devono installare in pozzi molto profondi.

1.7.5 Il mantello drenante

Durante questa fase si ha la messa in opera del ghiaietto ("dreno") nell'intercapedine fra la perforazione e il tubo. Il ghiaietto ha solitamente due funzioni: o arresta le granulometrie più sottili dell'acquifero oppure ha solo funzioni di riempimento e la selezione delle granulometrie è svolta solo dal filtro.

La granulometria del dreno deve essere adeguata a quella del terreno sede della falda e per tale motivo si dovrà compiere un'analisi granulometrica del materiale recuperato durante la perforazione definendo ad esempio il coefficiente di uniformità come $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$.

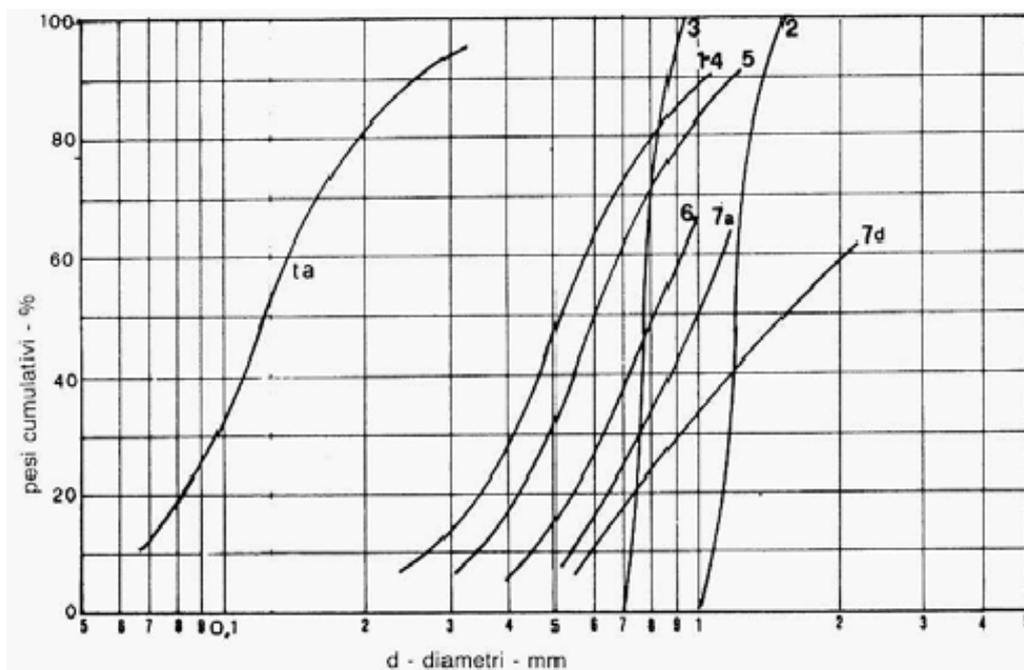


Figura 16 – Relazione tra diametro e pesi cumulativi dei grani

Per avere una buona efficienza del dreno si devono considerare dreni a granulometria costante nel caso di terreno omogeneo a grande granulometria oppure a granulometria crescente verso il pozzo nel caso di terreno eterogeneo o a piccola granulometria. La scelta della granulometria segue diversi metodi che vengono speditamente illustrati qui di seguito:

- Metodo di Smith nel caso di forti differenze granulometriche nella stratificazione all'interno dello stesso acquifero. Una volta disegnata la curva granulometrica si evidenzia il punto d_{30} e si individuerà il suo corrispondente sulla curva di drenaggio moltiplicando:
 - $d_{30} \times 4$ se il terreno è fine e omogeneo $U < 2.5$;
 - $d_{30} \times 6$ se il terreno è grossolano ed eterogeneo $U > 2.5$;
 Il valore determinato si riporta sul diagramma granulometrico con coordinate x, y pari a

$d_{30} \times 6$, 30%, e poi si traccia la curva granulometrica del drenaggio passante per tale punto e con coefficiente di uniformità

$U_{\text{dreno}} < 2.5$ se terreno ha $U < 2.5$;

$U_{\text{dreno}} = 2.5$ se terreno ha $U > 2.5$;

- Metodo australiano

$d_{25} \times 4$, $d_{25} \times 5$, $d_{75} \times 4$, $d_{75} \times 6$

I valori ricavati vengono riportati nel diagramma della curva granulometrica e vengono collegati a coppie gli elementi 4x e i restanti. Il valore di d_{90} è riportato sull'ordinata di $d_{10}(z)$ e collegato con $d_{25} \times 4$. L'area tratteggiata è il dominio in cui dovrà risiedere la curva granulometrica del dreno (Figura).

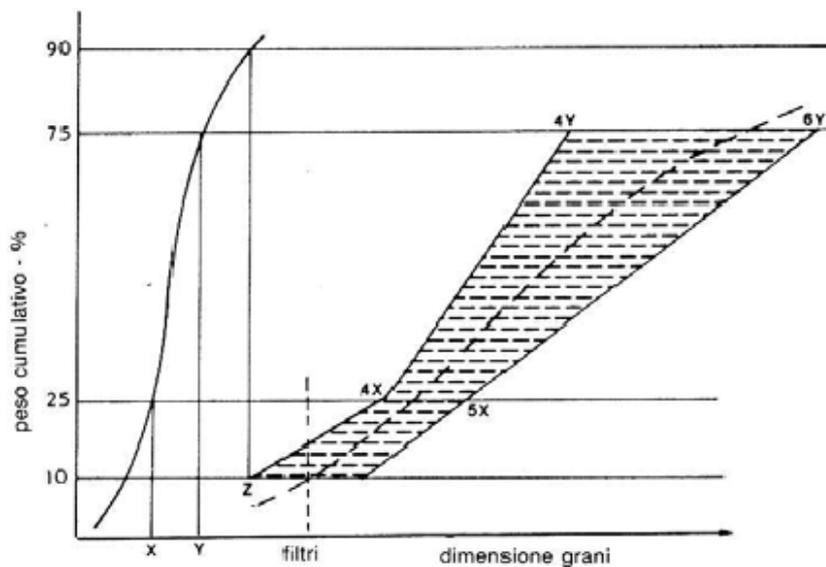


Figura 17 – Costruzione della curva granulometrica di un dreno

Se durante la perforazione di un pozzo si incontrano più acquiferi tra loro idraulicamente separati da litologie fini, l'isolamento delle falde si rende necessario per evitare che eventuali contaminanti trovino nel dreno del pozzo una via preferenziale di diffusione. Tale operazione è necessaria e delicata se si tratta di piezometri o pozzi da realizzarsi in siti contaminati. Uno dei metodi più utilizzati è quello di perforare per qualche metro lo strato impermeabile, far discendere la tubazione di rivestimento definitiva e cementarla per un tratto a fondo foro. Infine riprendere la perforazione del secondo tratto con un diametro minore.

Le condizioni operative possono essere ad esempio la presenza di intercapedine tra perforazione e tubo di dimensioni sufficienti da consentire la discesa di testimoni e tubicini. A tal proposito si eseguono cementazioni con il riempimento di tale intercapedine con bocca cementizia. L'operazione di riempimento deve essere compiuta solo dopo che il dreno si è ben assestato per effetto dell'operazione di spurgo. Una volta messa la sabbia al di sopra del dreno per evitare che la boiaccia penetri al suo interno, la miscela cementizia viene versata dal fondo verso l'alto tramite dei tubetti da 2'' – 4''. La fase di cementazione richiede successivi rabocchi a causa del ritiro del cemento e può comprendere anche la costruzione della cameretta alla bocca pozzo.

1.7.6 Lo sviluppo del pozzo

Lo sviluppo di un pozzo ha come obiettivo quello di eliminare i detriti della perforazione e l'estrazione della frazione più sottile dal terreno dell'acquifero, affinché la permeabilità locale migliori e aumenti quindi l'efficienza del pozzo. Le due principali operazioni che possono essere eseguite per ottenere uno sviluppo efficace sono:

- Rimozione delle particelle fini nel terreno attorno al pozzo, ovvero la rimozione della selezione dei grani che si forma con il pompaggio dell'acqua. La rimozione può essere ottenuta mediante l'inversione del moto dell'acqua dal pozzo verso la formazione mediante tecniche di pistonaggio o lavaggio;
- Rimozione del pannello di fango, che può essere fatto mediante lavaggio con acqua in pressione.

1.8 METODI PER LA MISURA DELLA CONDUCIBILITÀ IDRAULICA

La permeabilità di un acquifero può essere determinata facendo ricorso a differenti tipologie di prove:

- 1) Prove di pompaggio (a regime **permanente**, secondo Dupuit, oppure **transitorio**, secondo Theis, Jacob, Hatush, ...);
- 2) Prove puntuali (a **pozzo singolo**, tra cui Lefranc, Slug Test, Lugeon in roccia);
- 3) Prove da laboratorio (con il permeometro);
- 4) Prove da stratigrafia (con il metodo delle permeabilità equivalenti).

Le tipologie individuate con 1) e 2) sono dette **prove di campo**. Il **grado di affidabilità** decresce passando dalla tipologia 1) alla tipologia 4).

Esattamente come per la porosità efficace, la permeabilità è funzione della disposizione dei grani e della eterogeneità del terreno (curva granulometrica). In presenza di materiale fine, la permeabilità si riduce.

1.8.1 Metodo granulometrico

La permeabilità può essere relazionata alla granulometria del terreno facendo ricorso a diverse funzioni, che hanno di solito una validità limitata e sono difficilmente correlabili con valori tali da caratterizzare l'intero acquifero. Le formule più note sono:

- 1) La formula di Hazen, in cui c rappresenta un parametro variabile in funzione della granulometria (45.8 per sabbie argillose, 142 per le sabbie, altrimenti 100), e d il diametro efficace (D10): $k = cd^2$;
- 2) La formula di Terzaghi, con m porosità totale, $\beta = 800$ per granuli arrotondati e $\beta = 460$ per granuli irregolari: $k = \left[\frac{(m-0.13)}{\sqrt{(1-m)}} \right]^2 d^2 \beta$.

A monte del metodo granulometrico deve essere effettuata un'**analisi granulometrica**, il cui scopo è sia individuare le caratteristiche dei vuoti a partire da quelle dei grani, per il calcolo dei parametri granulometrici, sia consentire con maggior semplicità la selezione e il completamento di pozzi e sondaggi, per ubicare filtri e dreni.

Le fasi di esecuzione dell'analisi granulometrica sono:

- 1) Raccolta di materiale essiccato e setacciato selettivamente, avendo in precedenza separato limi e argille per sedimentazione;
- 2) Misura delle proporzioni percentuali in peso del materiale passante rispetto al campione totale;
- 3) Tracciamento della **curva cumulativa (curva granulometrica)**, tracciando in ascissa in scala logaritmica le dimensioni del diametro dei grani, in ordinata le proporzioni percentuali del peso cumulato. Sono da osservare la **pendenza della curva**, indice di una granulometria

eterogenea (se molto pendente) oppure uniforme (se poco pendente), il **diametro efficace** (d_{10}), ossia il diametro che lascia passare il 10% dei granuli, e il **diametro d_{60}** .

- 4) Calcolo del **coefficiente di uniformità** ($U = d_{60}/d_{10}$), che attribuisce un valore numerico alla pendenza della curva. Quando $U < 2.5$ il campione è a granulometria uniforme, altrimenti è eterogeneo.

La seguente Figura 18 mostra un esempio di curva granulometrica.

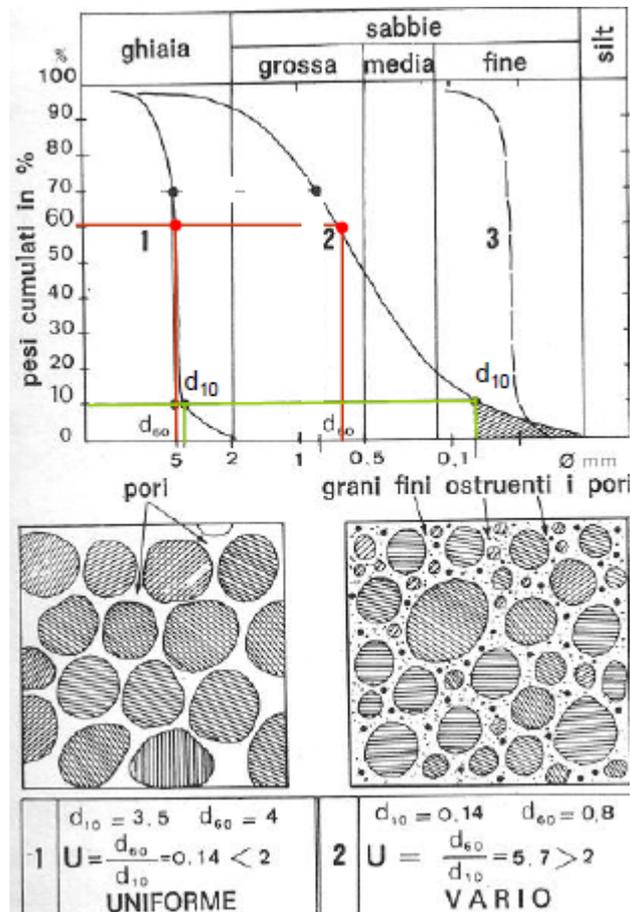


Figura 18– Esempio di curva granulometrica

1.8.2 Metodo con permeametri

Le prove condotte con i permeametri tendono ad effettuare una sovrastima della permeabilità dei materiali fini. Il valore della conducibilità ricavato viene condizionato dal rimaneggiamento subito dal campione.

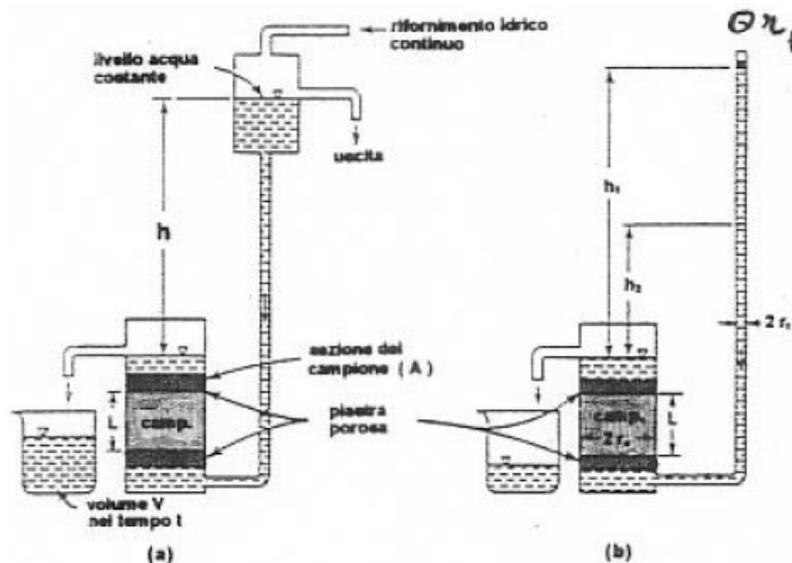


Figura 19 – Esempio di permeometro a carico costante (a) e a carico variabile (b), tratto da Associazione Geotecnica Italiana, 1977

1.8.3 Prove da campo puntuali: metodo Lefranc

La prova effettuata con il metodo Lefranc è una prova condotta durante la realizzazione di un sondaggio per diversi intervalli di avanzamento dello scavo.

La prima fase consiste nella **preparazione della tasca** (k_h): occorre interrompere lo scavo all'incirca 20 cm al di sopra del punto ove si intende effettuare la prova. Successivamente si inserisce un campionatore a pareti sottili per creare la tasca di prova al di sotto della scarpa delle aste di perforazione. La tasca dovrà avere una lunghezza maggiore del diametro del foro per poter misurare la permeabilità orizzontale: se così è, l'infiltrazione avviene per lo più radialmente all'asse del foro. Una volta estratto il campionatore e il materiale, la tasca viene riempita con ghiaietto per sostenere le pareti.

In seguito viene **eseguita la prova vera e propria**:

- 1) Se a carico costante, si mantiene all'interno del foro un livello piezometrico costante superiore a quello naturale, e si misura la portata necessaria a mantenere questa condizione;
- 2) Se a carico variabile, si solleva rapidamente il livello piezometrico immettendo acqua e misurando nel tempo i livelli fino al ripristino di quello naturale precedente alla prova.

Le prove di questo tipo sono state ideate per terreni sabbiosi per i quali vengono prodotti i risultati più affidabili. Per quanto riguarda invece limi e argille, la prova tende a sovrastimare il valore di permeabilità a causa delle vie preferenziali di flusso che possono crearsi al contatto tra terreno e tubazioni di rivestimento; per le ghiaie, invece, la prova tende a sottostimare il valore di permeabilità in quanto lo strumento può determinare spalmature di materiale fine sulle pareti occludendo in parte i pori.

1.8.4 Prove di campo: pompaggio a portata costante

La prova a portata costante viene realizzata per valutare i parametri idraulici dell'acquifero nell'intorno dell'opera di captazione.

La prova viene condotta estraendo una portata costante da un pozzo e misurando gli abbassamenti in uno o più piezometri posti ad una distanza r . Gli abbassamenti dipendono dalla trasmissività e dal coefficiente di immagazzinamento, che possono dunque essere determinati

applicando la formula inversa. Si veda a questo proposito la discussione della dispensa riportata nel capitolo seguente, e in particolare l'esempio 4 del capitolo 6 (esempi di applicazione delle diverse forme della relazione di Dupuit).

DISCUSSIONE DELLA LEZIONE DI IDROGEOLOGIA 2

1) E' possibile scrivere una relazione per il mezzo eterogeneo in falda radiale in pressione analoga a quella per la falda cilindrica?

Utilizzando la relazione di Dupuit si ha che, se l'acquifero è composto di due settori concentrici a permeabilità diversa k' e k'' , il primo da r a P e il secondo da P a R , è possibile calcolare il valore di y alla distanza P dal pozzo.

Quando $k' = k''$ si ha

$$y = h + Q \ln(P/r) / 2 \pi T$$

oppure da

$$y = H - Q \ln(R/P) / 2 \pi T$$

Scrivendo l'uguaglianza:

$$h + Q \ln(P/r) / 2\pi T = H - Q \ln(R/P) / 2\pi T + Q \ln(P/r) / 2\pi T = H - h - Q [\ln(R/P) + \ln(P/r)] / 2\pi T$$

Si ottiene

$$Q = (H-h) (\ln P - \ln r + \ln R - \ln P)$$

E quindi

$$Q = 2\pi T (H-h) / \ln(R/r)$$

Analogamente è possibile dimostrare che se k' è diverso da k'' la relazione diventa:

$$y = h + Q \ln(P/r) / 2\pi T' \tag{1}$$

oppure da

$$y = H - Q \ln(R/P) / 2\pi T'' \tag{2}$$

quindi l'uguaglianza diventa: $h + Q \ln(P/r) / 2\pi T' = H - Q \ln(R/P) / 2\pi T''$

$$Q = 2\pi T' T'' (H-h) / [(T'' \ln(P/r) + T' \ln(R/P))] \tag{3}$$

Che rappresenta la relazione di Dupuit nella forma più generale.

2) Desiderando ottenere il valore di y in un punto qualsiasi, come si deve operare?

Si risolve anzitutto il caso più comune, quello in cui non si conosca il valore di R , ma solo quello di H .

Prendendo in considerazione la relazione (2), si vede che da Dupuit si ricava che :

$$y = H - Q \ln(R/x)$$

dove x è la distanza dal pozzo.

Sostituendo questo valore nella (3) si ha:

$$Q = 2\pi T' T'' (y-h) / [(T'' \ln(P/r) + T' \ln(x/P))]$$

Che in funzione di y fornisce:

$$y = h + Q [(T'' \ln(P/r) + T' \ln(x/P))] / 2\pi T' T''$$

3) Effetti sul raggio d'influenza

In considerazione di quanto si è detto ci si può chiedere:

Quando l'acquifero è eterogeneo, la trasmissività equivalente si modifica; cambia quindi anche il raggio d'influenza?

In effetti, tutte le relazioni che si utilizzano per determinare R mostrano che varia al cambiare della permeabilità. Ad esempio, quella di Bear fornisce R in base alla relazione:

$$R = (2,25 Tt/S)^{0,5}$$

Nella Figura 20 si indicano le modifiche del profilo piezometrico corrispondenti ai casi di acquifero omogeneo di permeabilità k' (raggio d'influenza R) e di acquifero eterogeneo con $k'' < k'$ (R').

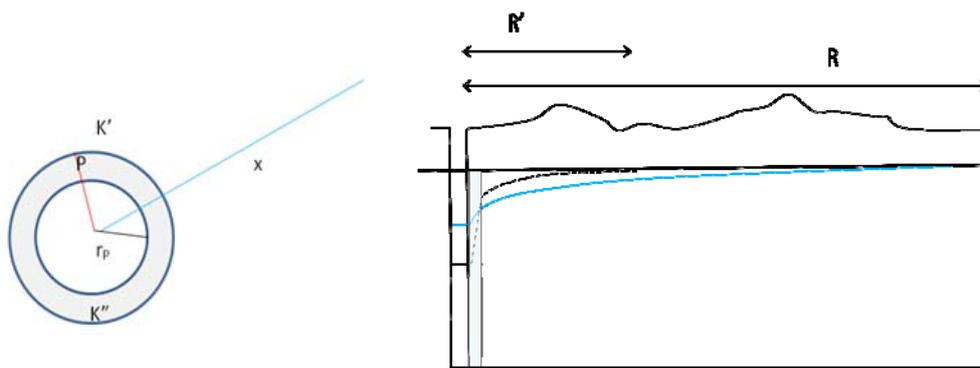


Figura 20 – Effetti sul raggio di influenza

4) La relazione di Dupuit è sempre applicabile al mezzo omogeneo?

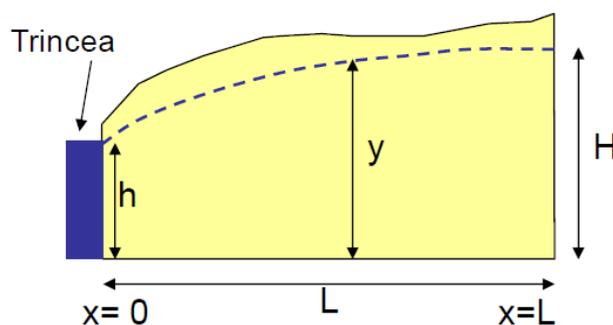


Figura 21 – Trincea in un mezzo omogeneo

Se si esamina la Figura 21, si nota come le linee di flusso siano curve nella parte vicina alla superficie piezometrica. Quindi la superficie di filtrazione, ad esse ortogonale, non può essere la superficie di un cilindro, come presuppone la relazione di Dupuit (secondo la quale la sezione di flusso è data dal prodotto dello spessore dell'acquifero per $6,28 x$).

Vi sono quindi degli scostamenti dalle piezometrie calcolate con Dupuit tanto più rilevanti quanto più è accentuata la curvatura della sezione di flusso.

A una certa distanza dal pozzo, specialmente con acquiferi di spessore superiore ai 10 m, l'approssimazione è comunque accettabile.

ESEMPI DI APPLICAZIONE DELLE DIVERSE FORME DELLA RELAZIONE DI DUPUIT

La seguente Tabella 4 riassume le relazioni che, derivate da quella di Dupuit (1.3), esprimono per i diversi tipi di falda e di captazione i rapporti fra la portata estratta gli altri parametri idrogeologici. Di seguito sono proposti esempi di applicazione della relazione di Dupuit nelle sue diverse forme. È necessario prima di tutto sapere il tipo di captazione: trincea (dreno orizzontale) o pozzo, con cui si ha a che fare; poi, è necessario sapere se l'acquifero è o meno in pressione.

Operando sulla relazione individuata dalla tabella in base a queste due voci, con semplici passaggi matematici si può risolvere il problema proposto.

Tabella 4 – Relazioni derivate da Dupuit per diversi tipi di falda e captazione

	CALCOLO DELLA PORTATA AFFLUENTE ALLE CAPTAZIONI	
TIPO DI FALDA	DRENO ORIZZONTALE	POZZO
Libera	$Q = \frac{(y^2 - h^2)wk}{2x}$	$Q = \frac{\pi k(y^2 - h^2)}{\ln \frac{x}{r}}$
Confinata	$Q = b \frac{(y-h)wk}{x}$	$Q = \frac{2\pi T(y-h)}{\ln \frac{x}{r}}$
Radiale confinata	$Q = \frac{(B-w)(y-h)T}{x \ln \left(\frac{B}{w} \right)}$	

Esempio 1)

Un acquifero in pressione che ha uno spessore di 20 m, una trasmissività di 0,006 m²/s, un raggio r di 0,3 m, con livello H di falda indisturbata pari a 100 m, viene sottoposto a un prelievo di 5 l/s. In condizioni stazionarie, l'abbassamento nel pozzo è di 1 m. Si desidera conoscere il valore dell'altezza piezometrica nel pozzo e a una distanza x dal pozzo pari a 10 m.

Soluzione

La relazione di Dupuit da utilizzare è $Q = \frac{2\pi T(y-h)}{\ln \frac{x}{r}}$

Si esprime la relazione in funzione dell'incognita cercata (y)

$$y = h + Q \ln(x/r) / 2\pi T$$

$$y = (100 \text{ m} - 1 \text{ m}) * 0,005 \text{ mc/s} * \ln (10\text{m}/0,3\text{m}) / 6,28 * 0,006 \text{ mq/s} = 99,465 \text{ m}$$

Esempio 2)

È possibile utilizzare la relazione di Dupuit per determinare il livello che, in un acquifero in pressione, assume la falda nel pozzo quando si estrae una portata costante nota (es. 15 l/s), avendo a disposizione i dati sul livello piezometrico alla distanza di 10 m dal pozzo (98,395 m) e la trasmissività T ($0,006 \text{ m}^2/\text{s}$) e sulla quota piezometrica prima del pompaggio ($H = 100 \text{ m}$).

Soluzione

Si sceglie la relazione idonea dalla tabella (uguale a quella precedente), poi si esprime in funzione dell'incognita cercata la relazione di Dupuit:

$$h = y - Q \ln(x/r) / 6,28 * T$$

Si ricava, sostituendo i valori noti:

$$h = 98,395 \text{ m} - 0,015 \text{ mc/s} \ln(10\text{m}/0,3\text{m}) / 6,28 * 0,006 \text{ mq/s} = 97 \text{ m}$$

Esempio 3)

Conoscendo l'altezza piezometrica della falda prima dell'inizio dei prelievi ($H = 100 \text{ m}$) e il raggio del pozzo ($0,3 \text{ m}$), in una condizione in cui anche tutti gli altri valori sono identici a quelli dell'esempio precedente, si vuole calcolare a quale distanza dal pozzo dimezza la differenza di livello $H-y$, che nell'esempio precedente era di $1,605 \text{ m}$ a 10 m dal pozzo.

Si ricorda che la differenza di livello fra la piezometria indisturbata e quella in pompaggio è detta abbassamento. L'altezza piezometrica y' che corrisponde a metà dell'abbassamento di $1,605 \text{ m}$ è quindi pari a $100\text{m} - 0,5 * 1,605 = 99,2 \text{ m}$

Detta x' la distanza dal pozzo alla quale si ha un valore di y' pari a $99,2\text{m}$, che come si è detto corrisponde a quello per cui l'abbassamento si dimezza, per trovare a quale distanza dal pozzo questo abbassamento si realizza, si utilizza la relazione:

$$y' = h + Q \ln(x'/r) / 6,28 * T$$

$$\text{da cui } \ln(x'/r) = 6,28 * T (y' - h) / Q$$

$$\text{essendo } h = 97 \text{ m}, y' - h = 2,2 \text{ m}$$

Si ottiene

$$\ln(x'/r) = 6,28 * 0,006 \text{ mq/s} * 2,2\text{m} / 0,015 \text{ mc/s} = 16,6; \text{ il rapporto } x'/r \text{ risulta quindi circa } 250, \text{ da cui si ricava che } x' = \text{circa } 75 \text{ m}$$

Esempio 4)

Si vuole utilizzare la relazione di Dupuit per determinare la permeabilità di un acquifero in pressione che ha uno spessore b di 20 m , sapendo che:

$$H-h = \text{abbassamento nel pozzo} = 4 \text{ m}$$

$$Q \text{ costante} = 20 \text{ l/s}$$

$$\text{Abbassamento } (H - y) \text{ pari a } 2,140 \text{ nel punto distante } x = 10 \text{ m}, \text{ con } y = 97,86$$

Scelta della relazione da utilizzare: essendo l'incognita $k = T/b$, considerando i dati disponibili, conviene esprimere la relazione di Dupuit in funzione dell'incognita tramite:

$$K = T/b = Q \ln(x/r) / 6,28 b (y-h)$$

$$\text{Si ricava facilmente che } y-h = 1,86 \text{ m}$$

Quindi

$$K = 0,0003 \text{ m/s}$$

ESEMPI DI STUDIO E INTERPRETAZIONE DELLA CARTA PIEZOMETRICA

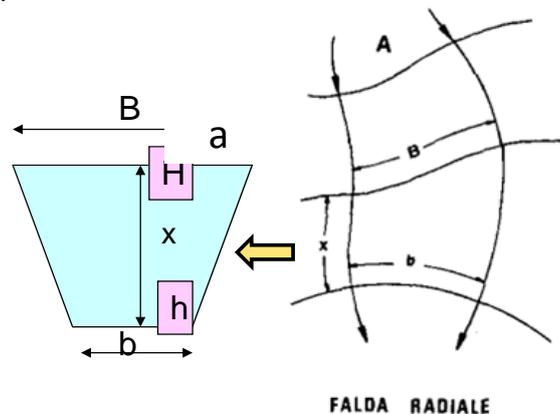
Lo studio della piezometria può aiutare ad approssimare i valori dei parametri idrogeologici avviene la circolazione idrica sotterranea?

Trammissività costante

Una delle più rilevanti utilità della cartografia piezometrica, è quello di fornire ragguagli anche quantitativi sulle modalità con le quali avviene il flusso idrico sotterraneo.

La costruzione della rete di flusso, formata dalle isopieze e dalle linee di flusso, è di particolare utilità quando sono riconosciute, dai dati esistenti sui pozzi, le aree a diversa trammissività.

In questo caso è possibile identificare agevolmente la portata che attraversa le diverse maglie della rete di flusso ad esempio attraverso la relazione di Kamenski citata nella lezione.



Dalla figura si può notare come

$$a = X n \pi$$

$$b = x n \pi$$

$$L = X - x = (a - b) / n \pi$$

Il valore dell'angolo $n\pi$ è quindi dato dal rapporto fra la differenza di lunghezza fra il lato superiore e quello inferiore della maglia, e la loro distanza media. Il rapporto fra a e b è quindi lo stesso del rapporto X/x .

La relazione di Kamenski non rappresenta altro che quella di Dupuit per un arco di cerchio che è contenuto $2n$ volte in un cerchio completo:

$$Q = T (y-h) (a-b) / [X \ln (a/b)].$$

La relazione di Kamenski permette di interpretare la distribuzione delle portate in una falda radiale. In caso di maglia dissimmetrica, quando i lati disposti lungo le linee di flusso hanno lunghezza differente, in luogo di X può essere posto il valore medio delle lunghezze dei due lati $(X' + X'') / 2$ che dà una soddisfacente approssimazione.

Maglie a T diversa

Quando cambia la trammissività da una maglia all'altra lungo lo stesso tubo di flusso, cambia naturalmente la cadente piezometrica.

Si ha la possibilità di dimostrare facilmente che la relazione di Kamenski applicata a due maglie successive a T diversa risulta :

$$Q = (y-h) / [X' \ln(a-b) / T'(a-b) + X'' \ln (b-c) / T''(b-c)]$$

Infatti , essendo

$$Q = (y-y') T'(a-b) / [L' \ln(a-b) /] = (y'-h) T''(b-c) / [L'' \ln(b/c)]$$

$$y' = y - Q / [X' \ln(a-b) / T'(a-b) + X'' \ln (b-c) / T''(b-c)]$$

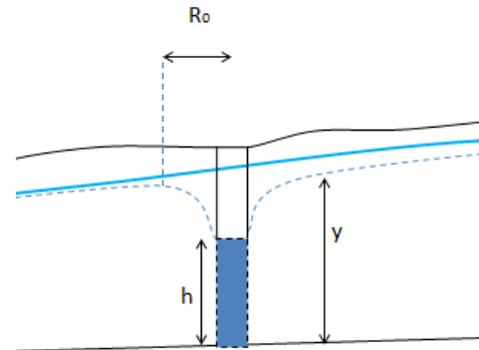
Di conseguenza, in un tubo di flusso in cui per ogni maglia varia la T, la portata dipende dalla quota piezometrica della maglia iniziale e da quella della maglia finale.
 Note le T dalle prove sui pozzi e le dimensioni delle maglie dalla piezometria, si ricavano rapidamente le portate dei tubi di flusso.

FALDA INCLINATA

Determinare il raggio di influenza fittizio e il fronte di richiamo di un pozzo in falda in pressione e inclinata, sapendo che la portata estratta è di 20 l/s.

I parametri relativi all'acquifero sono i seguenti:

- trasmissività 0,04 m²/s,
- gradiente piezometrico della falda indisturbata 2%.



Soluzione:

E' sufficiente applicare direttamente la relazione che fornisce il valore del raggio d'influenza fittizio R0 :

$$R0 = Q/2\pi Tj$$

$$R0 = (0,02 \text{ m}^3 / \text{s})/2\pi * 0,04 \text{ m}^2/\text{s} * 0,002 = 40 \text{ m}$$