



PIER GINO MEGALE



QUADERNI DI IDRAULICA AGRARIA



POZZI E FALDE

DISPENSE TRATTE DALLE LEZIONI DI IDRAULICA AGRARIA TENUTE PRESSO LA FACOLTÀ DI AGRARIA DELL'UNIVERSITÀ DI PISA

ANNO ACCADEMICO 2007 - 2008

Le falde costituiscono i più importanti sistemi naturali di accumulo e regolazione delle risorse idriche, ma questa proprietà è minacciata dall'espansione disordinata ed incontrollata delle captazioni.

Queste dispense sono state scritte per dare agli studenti della nostra facoltà che seguono il corso di Idraulica agraria, un'idea dei meccanismi che regolano il prelievo delle acque dai pozzi e come tali prelievi incidano sull'equilibrio degli acquiferi.

Per rendere la materia compatibile con le conoscenze di base fornite dai nostri piani di studio, si è fatto riferimento ai modelli tradizionali, trattati nei corsi di idraulica, sicuramente insufficienti per rappresentare esaurientemente la complessità di tali fenomeni.

Pubblicarle in rete è parso il sistema di distribuzione più pratico, moderno ed economico.

INDICE

1. **MOTO DELLE ACQUE FILTRANTI**
 - 1.1. Generalità
 - 1.2. Legge di Darcy
2. **POZZI**
 - 2.1. Pozzi freatici
 - 2.2. Pozzi artesiani
 - 2.3. Pozzi alla romana
3. **SISTEMI DI POZZI**
 - 3.1. Premessa
 - 3.2. Principio di reciprocità
4. **INTRUSIONE SALINA NELLE FALDE COSTIERE**
 - 4.1. Premessa
 - 4.2. Posizione dell'interfaccia salina in assenza di diffusione. Formula di Ghyben-Herzberg
 - 4.3. Effetti degli emungimenti

POZZI E FALDE

1. MOTO DELLE ACQUE FILTRANTI

1.1. Generalità

I *moti di filtrazione* sono una delle forme di movimento dei liquidi che hanno interesse pratico nelle applicazioni tecniche assieme ai *moti in forma di corrente* ed ai *processi di efflusso*.

Sono caratterizzati dal movimento lento di un liquido attraverso un sistema permeabile, generalmente costituito in natura da formazioni alluvionali di sabbia o ghiaia, che si produce anche sotto l'azione di piccole differenze di carico.

Quando il moto di filtrazione avvenga attraverso sistemi permeabili a granulometria minuta, può essere assimilato al moto in un fascio di capillari, le cui pareti sono costituite dagli elementi solidi e dal liquido fermo ad essi adeso. Di norma quindi il moto è *laminare* e dipende dalla viscosità del liquido.

Lo studio del moto di filtrazione non avviene con riferimento all'effettiva velocità del liquido nei singoli punti, bensì considerando la *velocità media di filtrazione*, definita come rapporto

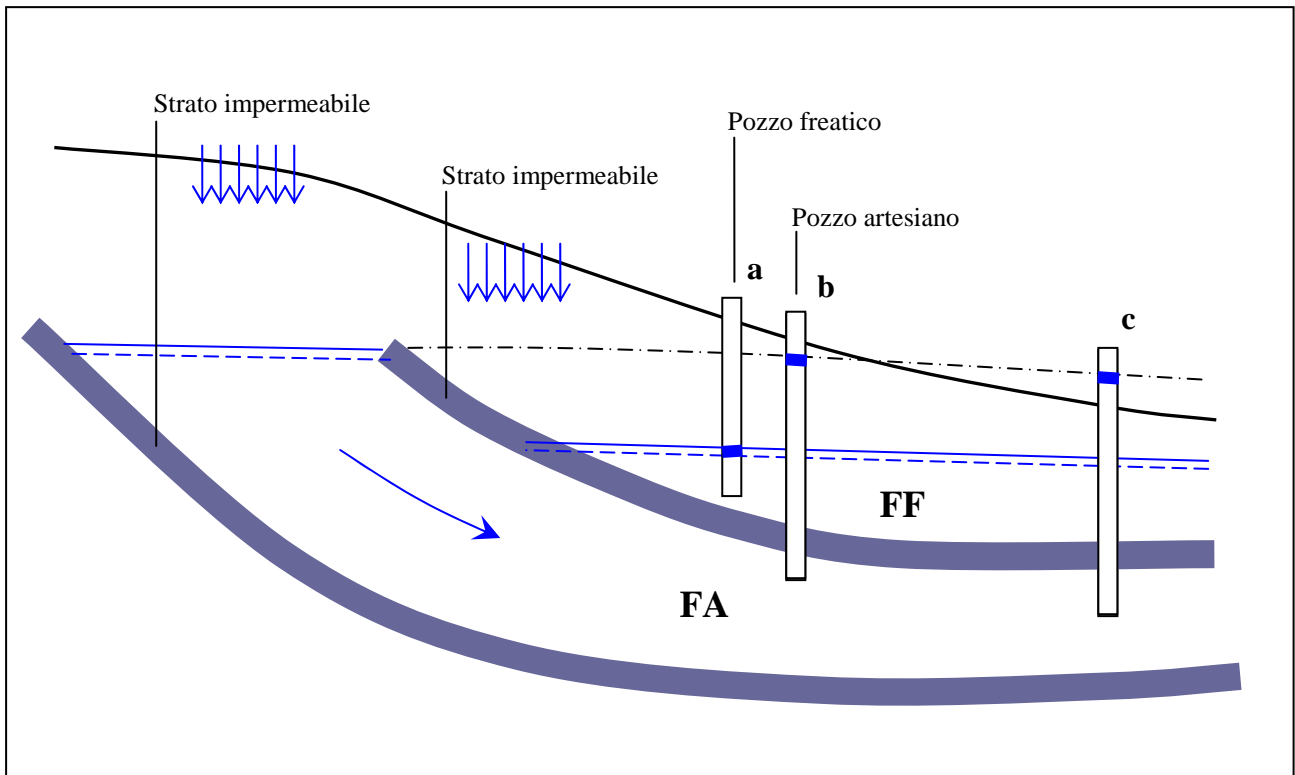


Figura 1.1. Rappresentazione schematica di una falda freatica e di una falda artesianiana

tra la portata che defluisce attraverso una determinata sezione del complesso filtrante e l'area della sezione stessa.

Il moto di filtrazione è quello che caratterizza il movimento dell'acqua nel terreno e negli strati permeabili sotterranei¹. Se uno strato di ghiaie o di sabbie poggia su uno strato impermeabile di roccia o di argilla, si crea quella che si chiama una *falda acquifera*: una formazione nella quale si raccoglie e si muove l'acqua che si infila in profondità dagli strati superficiali del terreno.

¹ Non sono classificabili moti di filtrazione quelli dell'acqua nelle fenditure delle rocce fortemente fratturate o nelle formazioni calcaree di tipo carsico attraverso le quali il moto avviene in regime turbolento.

Le falde rappresentano una delle più importanti forme di regolazione naturale delle risorse idriche, in quanto costituiscono delle riserve sotterranee, che si ricaricano durante la stagione piovosa e forniscono acqua nei periodi di siccità².

In relazione alla morfologia e di conseguenza al comportamento idraulico, le falde acquifere si distinguono in due categorie: *falde freatiche* e *falde artesiane*.

Le falde sono freatiche quando lo strato permeabile poggia su uno strato impermeabile ed arriva fino alla superficie del suolo (Figura 1.1). L'acqua che si infiltra nel terreno si raccoglie e scorre nella parte inferiore dell'acquifero occupandolo parzialmente (**FF**). Sulla superficie superiore della zona satura, *superficie freatica*, l'acqua si trova a pressione atmosferica ed il moto avviene a pelo libero. La superficie freatica è anche *superficie piezometrica*; infatti se si introduce una canna piezometrica nell'acquifero o vi si realizza un pozzo (**a**), l'acqua al suo interno raggiunge la quota della superficie freatica in quel punto.

Quando invece l'acqua si infiltra e si muove in uno strato permeabile confinato tra due strati impermeabili occupandolo interamente (**FA**), la falda si dice artesianiana. Abbandonata la *zona di ricarica*, la zona cioè dove l'acqua che alimenta la falda si infiltra dalla superficie del terreno, spesso costituita da una falda freatica, l'acqua si trova ad una pressione maggiore di quella atmosferica e si muove con modalità analoghe a quelle di un moto in pressione. In questo caso, se si introduce una canna piezometrica nell'acquifero, l'acqua risale nel tubo fino alla quota corrispondente al livello piezometrico in quel punto (**b**), come avviene per le condotte in pressione. Se la quota piezometrica nel punto di perforazione supera la quota del terreno, l'acqua sale oltre il piano di campagna ed esce naturalmente dalla falda (**c**). La *superficie piezometrica* è individuata dalla quota piezometrica in ogni punto della falda.

1.2. Legge di Darcy. Coefficiente di filtrazione o permeabilità

Si consideri un filtro costituito da un cilindro orizzontale di lunghezza L ed area di base A

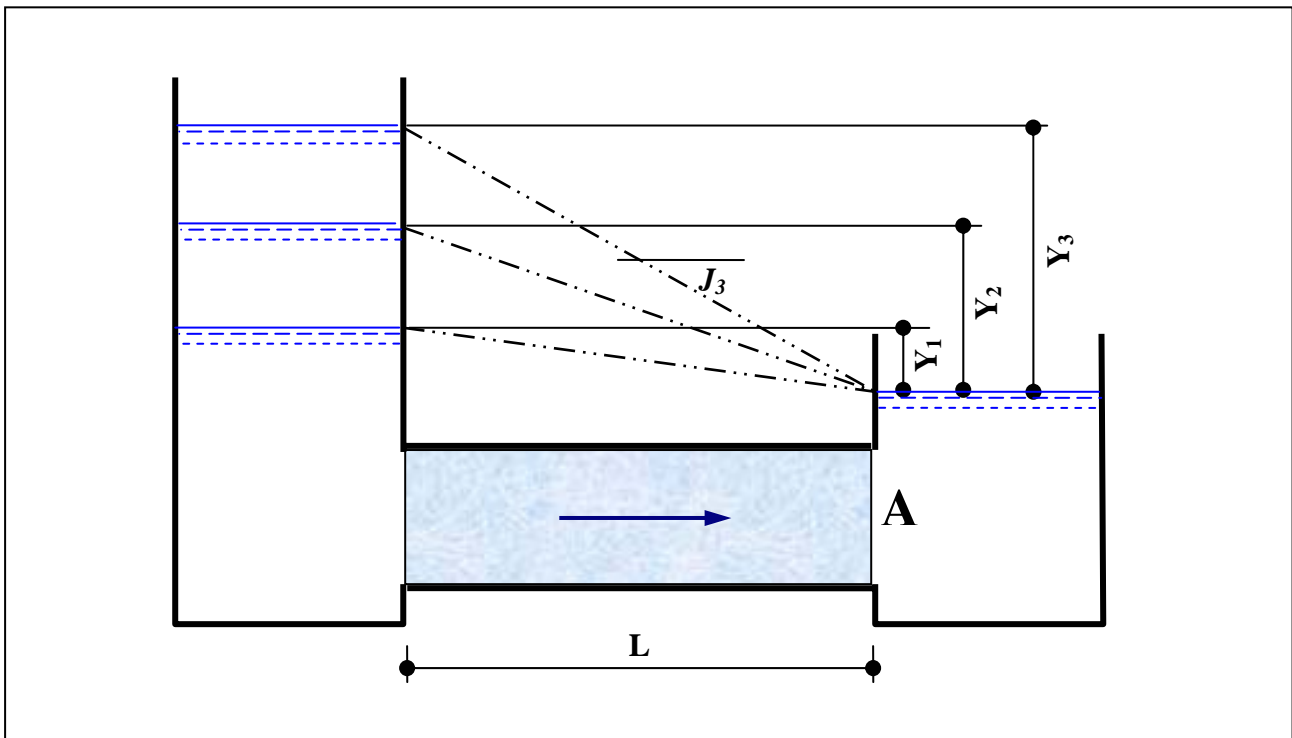


Figura 1.2. Moto di filtrazione attraverso un filtro orizzontale

² Altre forme naturali di accumulo idrico sono i laghi, i ghiacciai ed in forma minore i fiumi, che soprattutto costituiscono sistemi naturali di intercettazione, raccolta e trasporto dell'acqua.

riempito di sabbia, che colleghi due recipienti (Figura 1.2). Sotto l'azione del dislivello Y nei due recipienti, il liquido passa dall'uno all'altro attraverso il filtro.

Mantenendo costante il livello a valle e facendo variare quello a monte, si verifica che:

$$\frac{Q_1}{Y_1} = \frac{Q_2}{Y_2} = \frac{Q_3}{Y_3} \quad (1.1)$$

dove Q_1 , Q_2 e Q_3 sono le portate che defluiscono nel filtro per dislivelli del liquido Y_1 , Y_2 ed Y_3 , rispettivamente.

Per rendere la relazione precedente indipendente dalle dimensioni del filtro, la portata attraverso il filtro può essere espressa in funzione della velocità media di filtrazione $Q = VA$ e la perdita di carico in funzione della *cadente* $Y = JL$:

$$\frac{V_1}{J_1} = \frac{V_2}{J_2} = \frac{V_3}{J_3}$$

ovvero:

$$V = fJ \quad (1.2)$$

dove f è una costante che ha le dimensioni di una velocità e prende il nome *coefficiente di filtrazione* o *permeabilità* del mezzo filtrante. Il coefficiente f non dipende soltanto dalle caratteristiche del mezzo filtrante, ma anche dalle proprietà del liquido, peso specifico e viscosità, che però nel caso delle falde che non abbiano caratteristiche termali è sempre acqua a temperatura sensibilmente costante (12-14°C).

La relazione 1.2 è nota come di *Legge di Darcy*.

2: POZZI

2.1. Pozzi freatici

Il *pozzo freatico* è un pozzo che attinge da una falda freatica. In assenza di emungimento il livello dell'acqua nel pozzo, *livello statico*, è uguale a quello circostante della falda.

Quando si inizia a pompare, il livello dell'acqua nel pozzo e nell'intono di esso si abbassa progressivamente e se la portata è costante si stabilizza ad una quota che dipende dalla portata stessa. Il livello raggiunto nel pozzo prende il nome di *livello dinamico*, mentre si definisce *cono di depressione* il volume di terreno abbandonato dall'acqua gravitazionale in seguito all'emungimento e limitato inferiormente dalla superficie piezometrica, la cui depressione genera la cadente necessaria per produrre il moto.

Esaminiamo il caso schematizzato in Figura 2.1 di un pozzo cilindrico verticale di diametro D , che si intesti nello strato impermeabile orizzontale di una falda omogenea di estensione infinita, cioè che possa alimentare il pozzo senza limitazioni. L'acqua entra nel pozzo soltanto attraverso la parete cilindrica, considerata completamente permeabile. In teoria il processo si sviluppa in moto vario, asintotico nel tempo, ma in pratica si può assumere che dopo un periodo relativamente breve di emungimento a portata Q costante si raggiunga il regime e quindi si stabiliscano condizioni di moto permanente, a partire dalle quali anche il livello del pozzo H_p si mantiene costante.

L'avvicinamento dell'acqua al pozzo avviene attraverso superfici cilindriche concentriche di altezza h e raggio r progressivamente decrescenti. Poiché ciascun cilindro è attraversato dalla medesima portata Q , la velocità dell'acqua aumenta al diminuire della distanza dal pozzo.

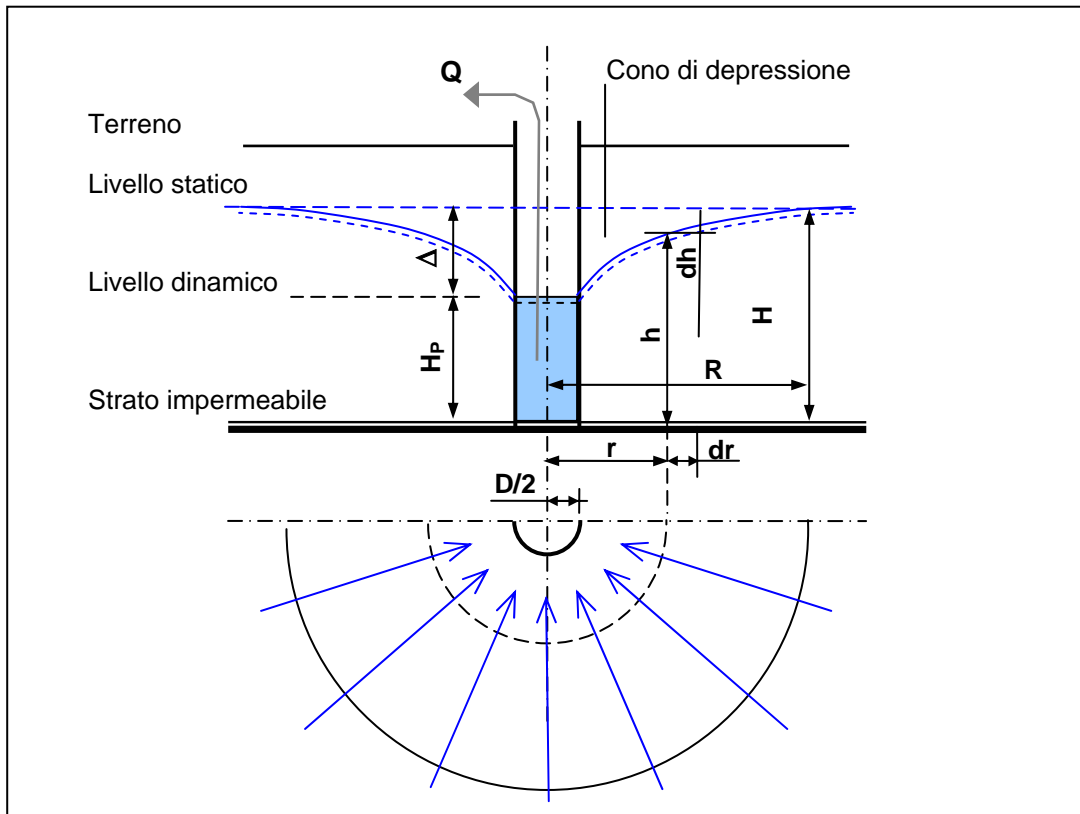


Figura 2.1. Pozzo freatico fondato sullo strato impermeabile

Considerando uno qualsiasi di questi cilindri, per la 1.2 si avrà:

$$Q = 2\pi r h V = 2\pi r h f J = 2\pi r h f \frac{dh}{dr} \quad (2.1)$$

dove $J = \frac{dh}{dr}$ è il valore della cadente alla distanza r dall'asse del pozzo.

Separando le variabili ed integrando tra la parete del pozzo $\left(r = \frac{D}{2}; h = H_p\right)$ ed il cilindro considerato:

$$\int_{H_p}^h h dh = \frac{Q}{2\pi f} \int_{D/2}^r \frac{1}{r} dr$$

si ottiene l'equazione della generatrice della superficie freatica o più semplicemente l'equazione della superficie freatica.

$$h = \sqrt{H_p^2 + \frac{Q}{\pi f} \ln \frac{2r}{D}} \quad (2.2)$$

dove h è la quota della superficie freatica a distanza r dall'asse del pozzo, rilevabile in campo tramite un piezometro od un pozzo spia.

Secondo la 2.2 il cono di depressione ha andamento asintotico rispetto alla superficie freatica della falda indisturbata (Figura 2.2), ma in pratica si può considerare $h = H$ ad una distanza $r = R$ sufficientemente grande, a cui si dà il nome di *raggio di depressione*.

Come si rileva anche dalla Figura 2.2, a parità di portata Q , di permeabilità f e di livello dinamico H_p , il diametro D del pozzo incide ben poco sull'andamento del cono di depressione, che invece è sensibilmente influenzato dal livello statico.

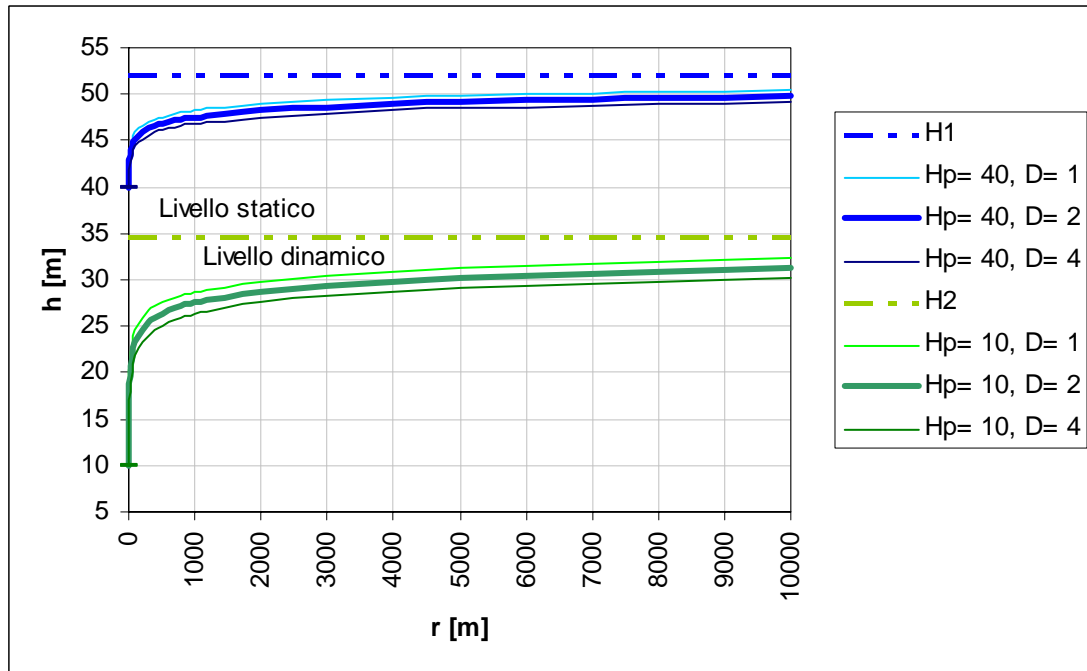


Figura 2.2. Andamento della superficie freatica in funzione del livello statico e del diametro del pozzo

Il diametro del pozzo incide al contrario in maniera sensibile sull'abbassamento dinamico del pozzo $\Delta = H - H_p$, in rapporto alle variazioni del livello H della falda. Sostituendo ad h ed r il livello statico H ed il raggio del cono di depressione R , dalla 2.2 si ottiene:

$$H = \sqrt{H_p^2 + \frac{Q}{\pi f} \ln \frac{2R}{D}} \quad (2.3)$$

Se, come avviene generalmente, la portata di emungimento è costante, lo è anche il secondo addendo sotto radice e la precedente può essere scritta:

$$H^2 = H_p^2 + C$$

ovvero:

$$H_p = \sqrt{H^2 - C}$$

e quindi:

$$\Delta = H - H_p = H - \sqrt{H^2 - C} \quad (2.4)$$

dove l'abbassamento dinamico non può ovviamente superare lo spessore della falda indisturbata: $\Delta \leq H$.

In Figura 2.3 è rappresentata ad assi invertiti la funzione 2.4 per una stessa portata Q emunta da tre pozzi realizzati nella medesima falda ed aventi diametro di 1, 2 e 4 m. Man mano che il livello indisturbato H della falda si abbassa, l'abbassamento dinamico Δ cresce con rapidità progressiva. Per esempio, se in condizioni di crisi idrica il livello della falda si abbassasse di 10 m da 45 a 35 m, nel pozzo da 1 m di diametro l'abbassamento dinamico crescerebbe di 12 m e per un

ulteriore piccolo abbassamento della falda il livello nel pozzo raggiungerebbe il fondo. Per il pozzo da 4 m di diametro lo stesso abbassamento della falda produrrebbe un incremento dell'abbassamento dinamico di 8 m e, per raggiungere il fondo, la falda dovrebbe abbassarsi di altri 3 m.

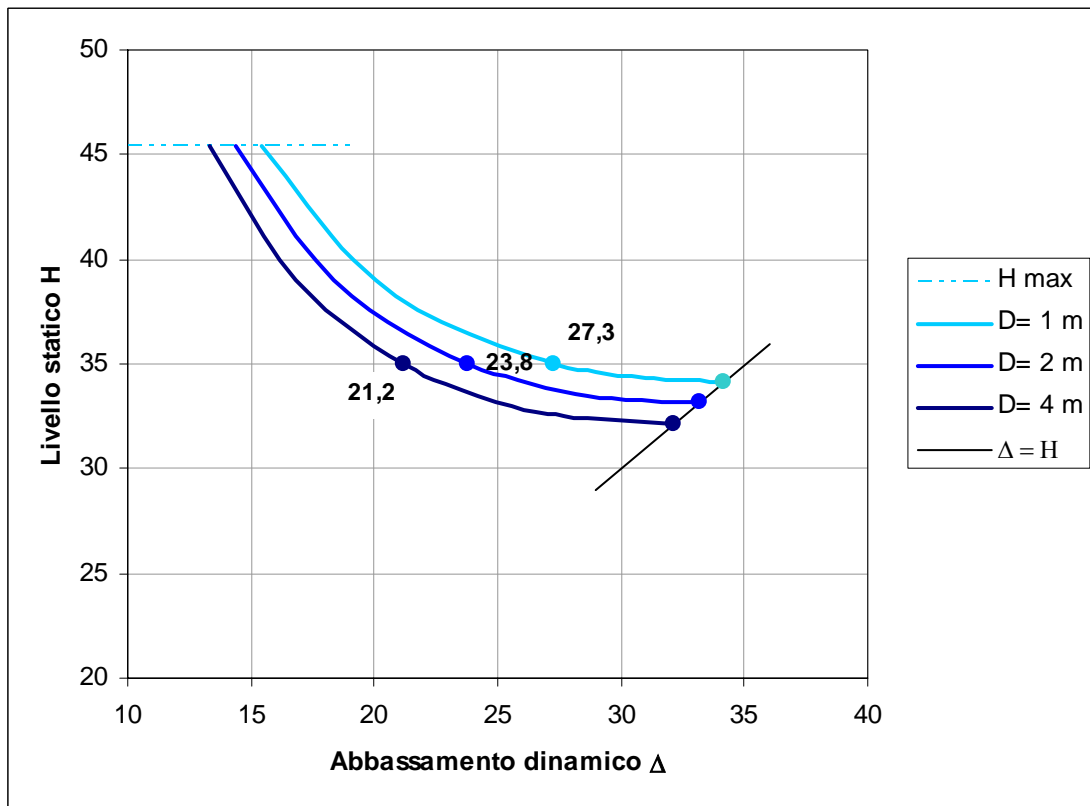


Figura 2.3. Abbassamento dinamico di un pozzo freatico in funzione del livello della falda e del diametro del pozzo

Risolvendo la 2.3 rispetto a Q , si ricava la *curva caratteristica* del pozzo freatico, ovvero l'equazione della portata in funzione dell'abbassamento dinamico:

$$Q = \frac{\pi f}{\ln \frac{2R}{D}} (H^2 - H_p^2) \quad (2.5)$$

ovvero, essendo $H^2 - H_p^2 = (H + H_p)(H - H_p)$, $H - H_p = \Delta$ e $H + H_p = 2H - \Delta$:

$$Q = \frac{\pi f}{\ln \frac{2R}{D}} (2H - \Delta)\Delta \quad (2.6)$$

da cui si desume che:

- la curva caratteristica è un arco di parabola (Figura 2.4);
- la portata è influenzata dal livello statico H ³.

³ Tenuto conto che $\pi / \ln \frac{2R}{D}$ varia poco al variare del rapporto tra raggio del pozzo e raggio di depressione, in pratica si può assumere un valore medio pari a 0,5, che equivale ad un raggio di depressione 500 volte il raggio del pozzo, e scrivere la 2.5:

$$Q = 0,5 f (H^2 - H_p^2)$$

Così formulata la 2.6 ha scarso interesse pratico. In realtà il raggio di depressione non è noto a priori e neppure la permeabilità, in quanto valori misurati in laboratorio su campioni estratti dalla falda, non sono idonei nella maggior parte dei casi a definire il valore di f da introdurre nella 2.5 o nella 2.6. In primo luogo non lo sono perché in natura gli acquiferi non sono omogenei e quindi f deve assumere un valore medio rappresentativo dell'acquifero interessato dagli emungimenti, in secondo luogo perché le proprietà fisiche dei campioni, per quanto non rimaneggiati, sono alterate dall'estrazione.

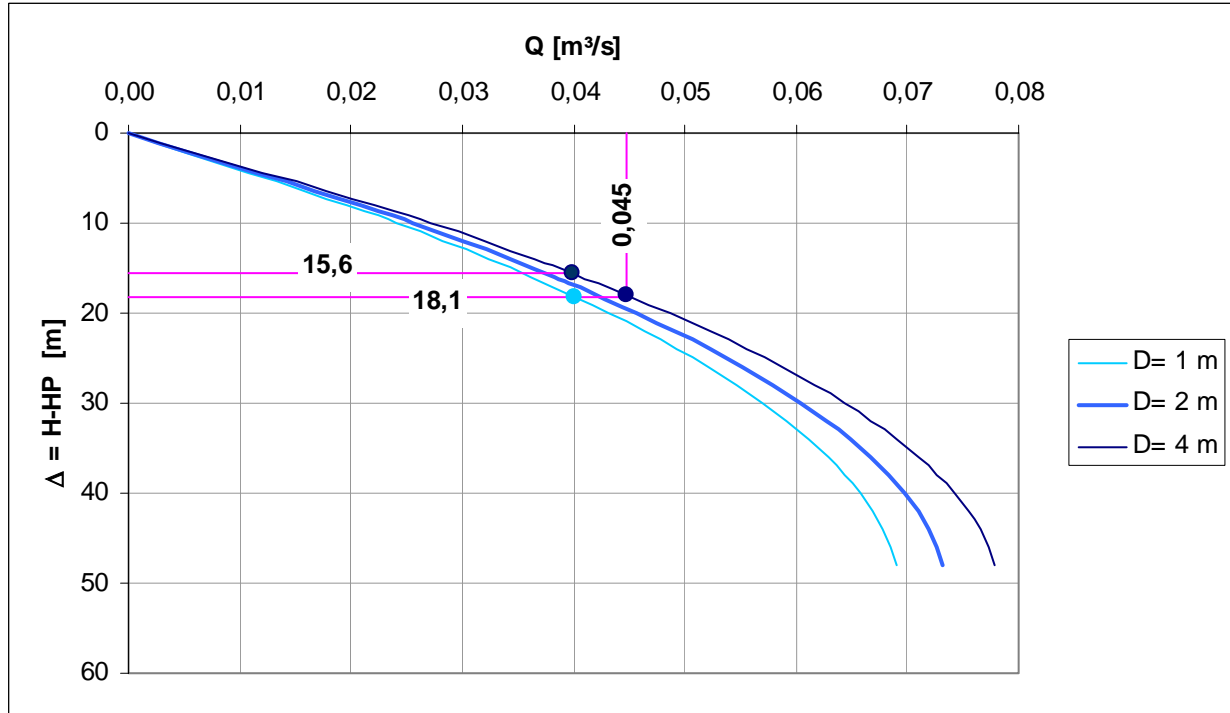


Figura 2.4. Curva caratteristica di un pozzo freatico

Per la caratterizzazione delle falde al fine del loro sfruttamento si ricorre quindi a prove in situ, peculiari del settore idrogeologico. Tuttavia una stima della portata di un pozzo freatico in funzione dell'abbassamento dinamico può essere fatta in modo semplice tramite una perforazione esplorativa ed una prova di pompaggio.

Tenuto conto delle approssimazioni dovute alla semplicità dello schema considerato, entro certi limiti il raggio del pozzo in rapporto al raggio di depressione non incide in maniera determinante sul valore della relazione:

$$\frac{f \pi}{\ln \frac{2R}{D}}$$

che può quindi considerarsi una costante F caratteristica della falda. La 2.5 si può quindi scrivere:

$$Q = F (H^2 - H_p^2) \tag{2.7}$$

Aperto un pozzo esplorativo che raggiunga lo strato impermeabile e misurato il livello indisturbato della falda dal fondo H , si effettua una prova di pompaggio a portata costante Q . Una volta che il livello dinamico del pozzo HP si è stabilizzato, è possibile calcolare la costante F che definisce la portata Q in funzione dell'abbassamento dinamico $\Delta = H - HP$ (Figura 2.4).

2.2. Pozzi artesiani

Il *pozzo artesiano* è un pozzo che attinge da una falda artesianiana. In assenza di emungimento il livello dell'acqua nel pozzo, *livello statico*, raggiunge la quota della superficie piezometrica indisturbata della falda in quel punto; in altre parole funziona da piezometro.

Anche in questo caso se si estrae una portata costante, il livello nel pozzo cala progressivamente con velocità decrescente fino a stabilizzarsi alla quota corrispondente al *livello dinamico*. Nell'intorno del pozzo la superficie piezometrica si abbassa ed assume la forma di un conoide di rotazione, *cono di depressione*, avente come asintoto il piano piezometrico della falda indisturbata.

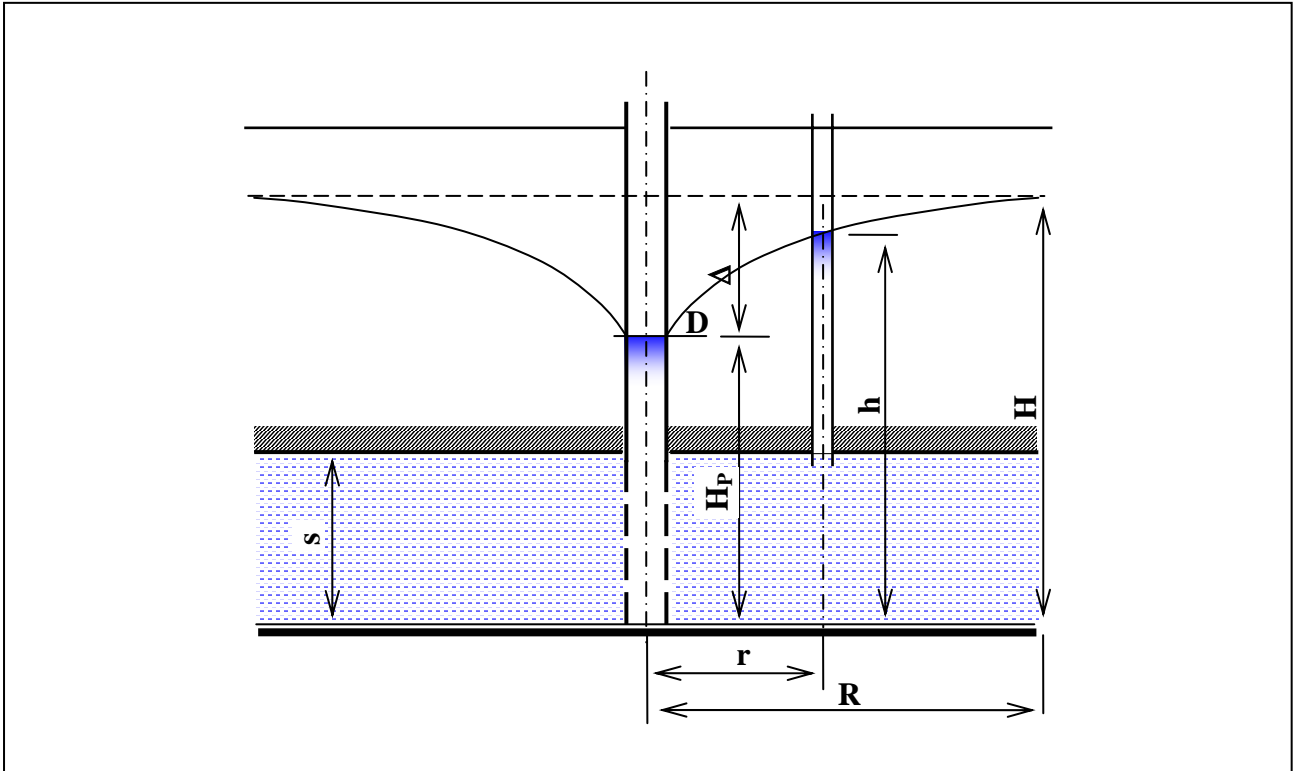


Figura 2.5. Pozzo artesianiano passante per l'intero spessore della falda

Con riferimento alla Figura 2.5 esaminiamo il caso di un pozzo cilindrico verticale di diametro D , che attraversi tutto lo spessore s di una falda omogenea di estensione infinita, fino ad intestarsi nello strato impermeabile di base (*letto della falda*) e la cui parete sia permeabile in corrispondenza dell'acquifero. L'acqua entra nel pozzo soltanto dalla superficie laterale. Il moto avviene con traiettorie radiali orizzontali convergenti verso il pozzo ed il valore della velocità di filtrazione è costante sulle superfici cilindriche concentriche al pozzo, che sono anche superfici isopieze.

Sia H la quota piezometrica sul letto impermeabile della falda indisturbata, coincidente col livello statico nel pozzo e H_p il livello dinamico che si stabilisce nel pozzo a seguito dell'emungimento prolungato a portata costante Q . Tutti i cilindri concentrici al pozzo sono attraversati dalla medesima portata Q , con velocità di filtrazione V crescente al ridursi, con la distanza r dal pozzo, della superficie permeata $2\pi rs$. Sia h la quota piezometrica del cilindro di raggio r , per la 1.2 si avrà:

$$Q = 2\pi r s V = 2\pi r s f J = 2\pi r s f \frac{dh}{dr} \quad (2.8)$$

Separando le variabili ed integrando tra la parete del pozzo $r = \frac{D}{2}$ ed il generico cilindro di raggio r , si ottiene l'equazione della superficie piezometrica, ovvero del profilo della piezometrica che produce il moto radiale di filtrazione verso il pozzo:

$$\int_{H_p}^h dh = \frac{Q}{2\pi s f} \int_{D/2}^r \frac{1}{r} dr$$

$$h - H_p = \frac{Q}{2\pi s f} \ln \frac{2r}{D} \quad (2.9)$$

o anche:

$$h = H_p + \frac{Q}{2\pi s f} \ln \frac{2r}{D} \quad (2.10)$$

Se è possibile misurare la quota piezometrica h in un piezometro od altro pozzo (*pozzo spia*) a distanza r dall'asse del pozzo (Figura 2.5), la 2.9 consente di stimare la permeabilità media f della falda nell'intorno del pozzo.

Come nel caso precedente il cono di depressione ha andamento asintotico rispetto alla superficie piezometrica della falda indisturbata, ma in pratica si può considerare che h si stabilizzi su un valore H ad una distanza $r = R$ sufficientemente grande, a cui si dà il nome di *raggio di depressione*.

Anche in questo caso (Figura 2.6) il cono di depressione è poco influenzato dal diametro del pozzo⁴; dipende invece dalla portata e dallo spessore dell'acquifero (2.10). A parità di portata il

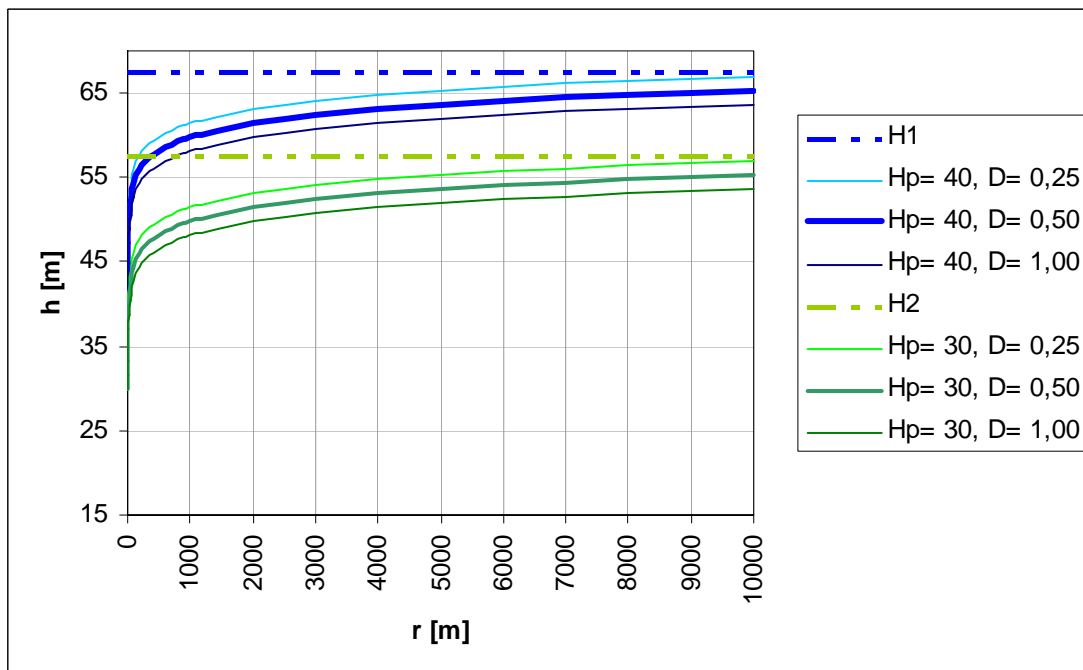


Figura 2.6. Andamento della superficie piezometrica in funzione del livello statico e del diametro del pozzo

⁴ I pozzi artesiani sono realizzati tramite trivellazioni anche molto profonde, il che limita drasticamente la varietà dei diametri che possono essere impiegati. Di norma il diametro del pozzo è stabilito in base alle dimensioni della pompa da impiegare e quindi indirettamente in funzione della portata da emungere.

cono di depressione segue il livello piezometrico indisturbato della falda.

Dalla 2.9 si ricava la *curva caratteristica* del pozzo artesiano:

$$Q = \frac{2\pi s f}{\ln \frac{2r}{D}} (h - H_p)$$

che per $r = R$ e $h = H$ assume la forma:

$$Q = \frac{2\pi s f}{\ln \frac{2R}{D}} (H - H_p) = \frac{2\pi s f}{\ln \frac{2R}{D}} \Delta = p \Delta \quad (2.11)$$

da cui risulta, come in Figura 2.7, che:

- la curva caratteristica è una retta;
- la portata non dipende dalla profondità della falda, ma dallo spessore s dell'acquifero;

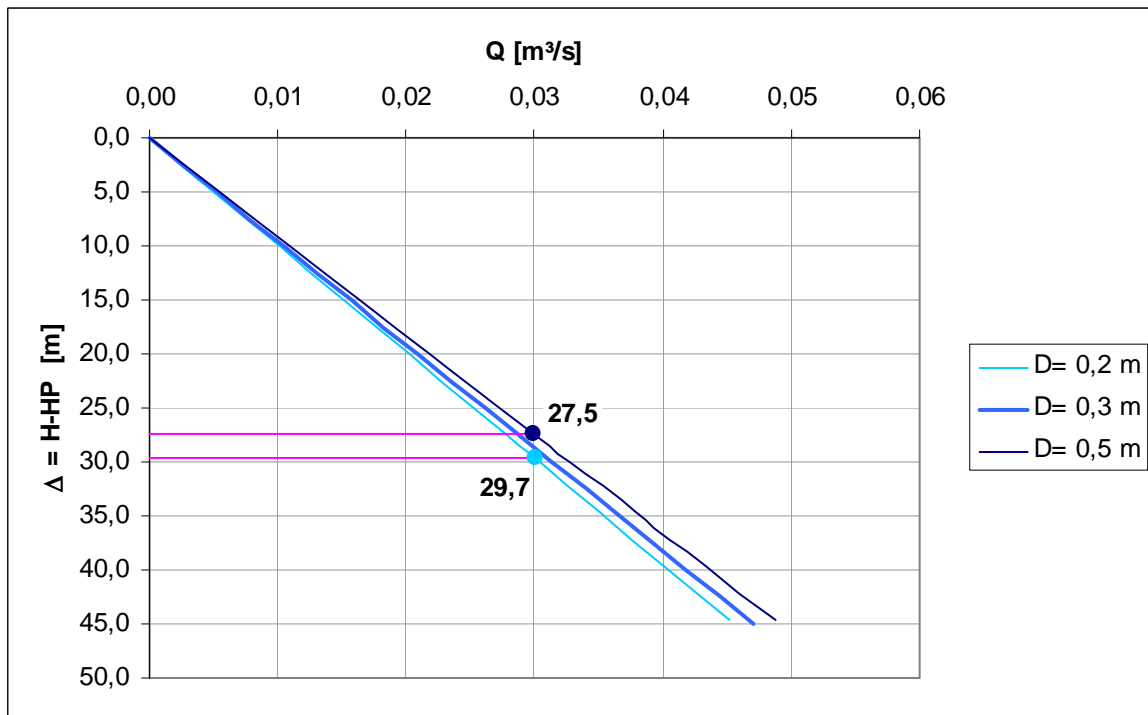


Figura 2.7. Curva caratteristica di un pozzo artesiano

Nella 2.11 p rappresenta la *portata specifica*, cioè la portata che produce un abbassamento unitario; è un parametro che caratterizza ciascun pozzo, ma tenuto conto della scarsa influenza di D sul suo valore, può considerarsi una caratteristica della falda ed essere desunto da prove di pompaggio su un pozzo esplorativo per poi essere applicato agli studi successivi. L'inverso di p rappresenta l'*abbassamento specifico* K , prodotto dall'emungimento di una portata unitaria.

Nella realtà le falde *non sono* orizzontali, infinite, omogenee e di spessore costante, pertanto le relazioni che si sono ottenute, e che si otterranno in seguito, facendo riferimento a schematizzazioni estremamente semplificate, servono come primo approccio per la comprensione dei fenomeni studiati. Pertanto nella loro applicazione pratica si deve accertare che siano applicabili ai casi in esame e tener conto delle grossolane approssimazioni che ne conseguono.

2.3 Pozzi alla romana

Per quanto sia conosciuto in tutto il mondo ed in tutte le culture, si dà il nome di *pozzo alla romana* ad un pozzo freatico di grandi dimensioni, destinato prettamente ad uso domestico, originariamente costruito per sottomuratura. Dopo l'avvento delle macchine per trivellazioni di grande diametro i pozzi alla romana vengono realizzati calando uno su l'altro nel foro aperto dalla trivellazione anelli di cemento armato di diametro variabile intorno al metro.

Non di rado questi pozzi hanno un funzionamento intermittente; è usuale sentire il proprietario decantarne i pregi dicendo che una volta prosciugato, ricupera in poco tempo il livello statico. Si tratta di pozzi che raccolgono l'acqua di falde superficiali di modesta potenza o di acquiferi con bassissima permeabilità, capaci di portate inferiori a quelle di esercizio. In questi casi le dimensioni del pozzo sono fondamentali perché uniscono alla funzione di intercettazione della falda, quella di cisterna, dove si deposita la poca acqua richiamata dal pozzo.

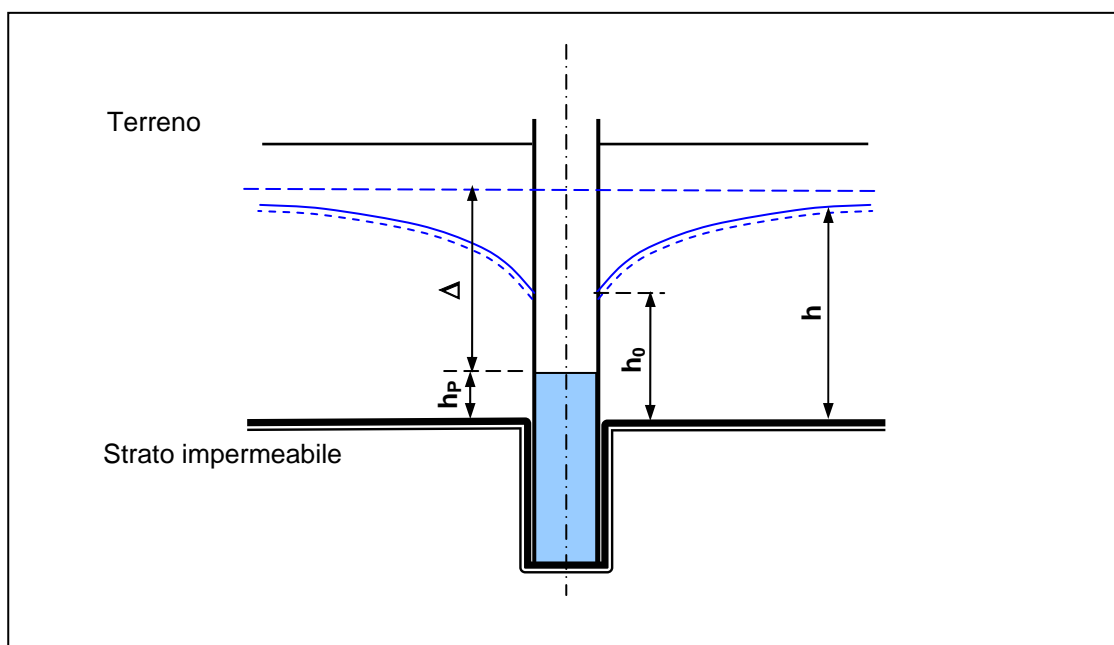


Figura 2.8. Pozzo alla romana. Superficie di trapeolazione

Generalmente il pozzo prosegue per qualche metro nello strato impermeabile per aumentare il volume di riserva ed accentuare l'abbassamento dinamico. Quando l'acqua nel pozzo si abbassa al di sotto della superficie dello strato impermeabile, il livello h_0 della falda in corrispondenza della superficie esterna del pozzo si riduce al minimo e si mantiene costante ed indipendente dal livello nel pozzo. Nel suo interno l'acqua sgorga a partire dal livello h_0 della falda e cola lungo la parete. La superficie compresa tra h_0 e h_p o il fondo della falda, se il livello nel pozzo è inferiore, prende il nome di *superficie di trapeolazione*.

Il fenomeno della trapeolazione è caratteristico dei pozzi freatici ed avviene in misura più o meno rilevante in ogni caso.

3. SISTEMI DI POZZI

3.1. Premessa

Raramente un pozzo, freatico o artesiano che sia, può considerarsi isolato. In genere il suo livello è influenzato dal cono di depressione dei pozzi circostanti.

L'interferenza tra pozzi vicini può valutarsi tanto per i pozzi freatici che per quelli artesiani. In quanto segue si espone il metodo per calcolare l'entità degli abbassamenti per i pozzi artesiani, che di norma rivestono maggiore importanza per l'approvvigionamento idrico.

In tal caso, ricavando Δ dalla 2.11 si ottiene:

$$\Delta = \frac{Q}{2\pi s f} \ln \frac{2R}{D}$$

ovvero:

$$\Delta = K Q \quad (3.1)$$

Sostituendo al raggio del pozzo $\frac{D}{2}$ un generico raggio r del cono di depressione si ottiene l'abbassamento della superficie piezometrica a quella distanza dall'asse del pozzo.

$$\delta = \frac{Q}{2\pi s f} \ln \frac{R}{r}$$

ovvero:

$$\delta = k(r)Q \quad (3.2)$$

dove $k(r)$ varia per la medesima falda soltanto con la distanza r dal pozzo.

3.2. Principio di reciprocità

Si abbia un sistema di pozzi artesiani in una falda illimitata, per esempio tre⁵, a distanza reciproca $r_{1,2}$, $r_{2,3}$ e $r_{3,1}$, a cui corrispondono $k_{1,2} = k_{2,1}$, $k_{2,3} = k_{3,2}$ e $k_{3,1} = k_{1,3}$. Quando funziona il solo pozzo 1 e si estrae la portata Q_1 , nel pozzo stesso si produce l'abbassamento:

$$\Delta_1 = K_1 Q_1$$

ed in corrispondenza degli altri due (Figura 3.1) il livello piezometrico si abbassa di:

$$\delta_{1,2} = k_{1,2} Q_1$$

$$\delta_{1,3} = k_{1,3} Q_1$$

Questo avviene con reciprocità, quando l'emungimento abbia luogo da ciascuno degli altri due pozzi singolarmente.

Quando i tre pozzi funzionano contemporaneamente con portate Q_1 , Q_2 e Q_3 , in ciascuno di essi all'abbassamento diretto prodotto dal suo emungimento si sommano quelli indotti dagli altri due pozzi⁶:

$$\Delta_1^* = K_1 Q_1 + k_{2,1} Q_2 + k_{3,1} Q_3$$

$$\Delta_2^* = k_{1,2} Q_1 + K_2 Q_2 + k_{3,2} Q_3 \quad (3.3)$$

$$\Delta_3^* = k_{1,3} Q_1 + k_{2,3} Q_2 + K_3 Q_3$$

A titolo di esempio si considerino tre pozzi uguali tra loro, posti ai vertici di un triangolo equilatero di lato ρ , dai quali sia estratta la medesima portata Q per un emungimento totale di $3Q$.

L'abbassamento dinamico uguale in tutti i pozzi sarà:

⁵ Gli sviluppi che seguono possono essere generalizzati a qualunque numero di pozzi.

⁶ Il principio di *sovrapposizione degli effetti* è applicabile in quanto le variazioni di livello sono definite da equazioni lineari.

$$\Delta^* = KQ + kQ + kQ = (K + 2k)Q$$

ovvero, in rapporto all'abbassamento del pozzo considerato isolato:

$$\frac{\Delta^*}{\Delta} = \frac{(K + 2k)}{K} = 1 + 2 \frac{k}{K} \quad (3.4)$$

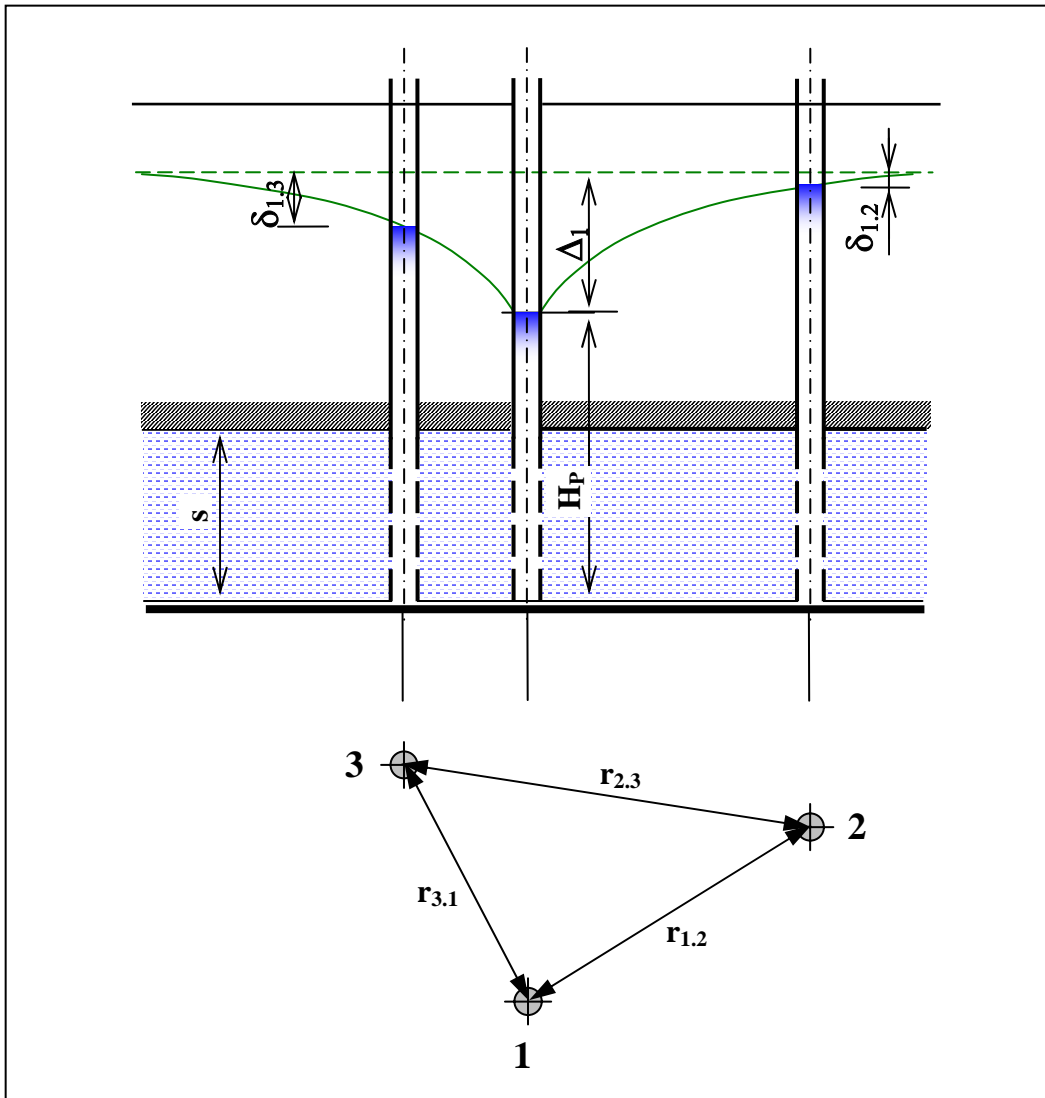


Figura 3.1. Sistema di pozzi. Abbassamenti prodotti dall'emungimento da un pozzo nei pozzi circostanti

Sostituendo:

$$K = \frac{1}{2\pi s f} \ln \frac{2R}{D}$$

$$k = \frac{1}{2\pi s f} \ln \frac{R}{\rho}$$

risulta:

$$\frac{\Delta^*}{\Delta} = 1 + 2 \frac{\ln \frac{R}{\rho}}{\ln \frac{2R}{D}}$$

Esprimendo la distanza tra i pozzi in rapporto al loro raggio $\rho = n \frac{D}{2}$ e sviluppando si ottiene:

$$\frac{\Delta^*}{\Delta} = 1 + 2 \frac{\ln \frac{2R}{nD}}{\ln \frac{2R}{D}} = 3 - 2 \frac{\ln n}{\ln \frac{2R}{D}}$$

o meglio:

$$\frac{\Delta^*}{\Delta} = 3 - 2 \frac{\ln \frac{2\rho}{D}}{\ln \frac{2R}{D}} \quad (3.5)$$

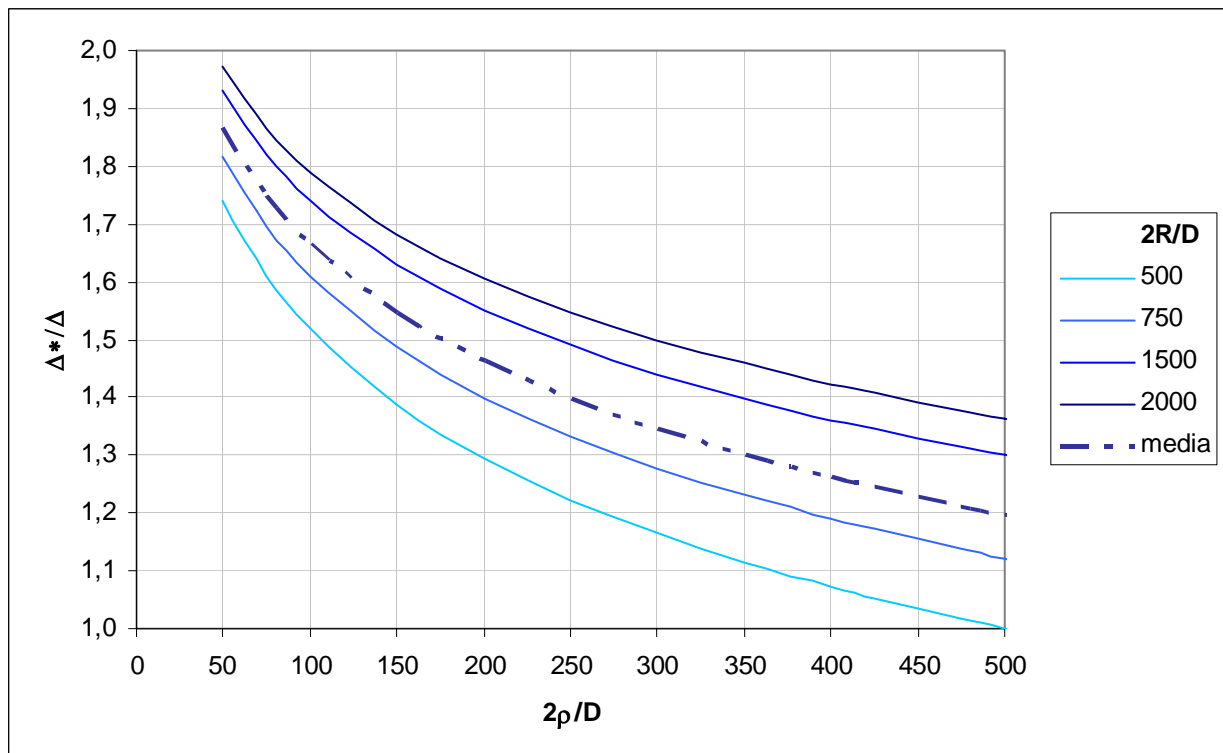


Figura 3.2. Depressione relativa di un sistema di tre pozzi equidistanti

In Figura 3.2 sono riportati i diagrammi Δ^*/Δ , a cui si può dare il nome di *depressione relativa*, per valori crescenti del raggio di depressione espresso in rapporto al raggio del pozzo. Com'è ovvio l'influenza dei pozzi vicini diminuisce con la distanza ed è tanto minore quanto minore può considerarsi il raggio di depressione.

La Figura 3.3 mostra come vari la depressione per un sistema di 3 pozzi uguali al variare della loro distanza. Per una determinata portata di esercizio l'abbassamento di ciascun pozzo considerato isolato sia 4 m. Se la distanza tra i pozzi è 10 m, nella falda si produce una depressione superiore a 7 m, che si riduce di oltre un metro per una distanza di 30 m e si aggira attorno a 5,5 m

per una distanza mutua di 50 m. Se l'intera portata emunta dai tre pozzi dovesse essere estratta da un pozzo solo, l'abbassamento piezometrico sarebbe di 12 m. Questo meccanismo assume grande importanza per il controllo dell'intrusione salina nelle falde costiere.

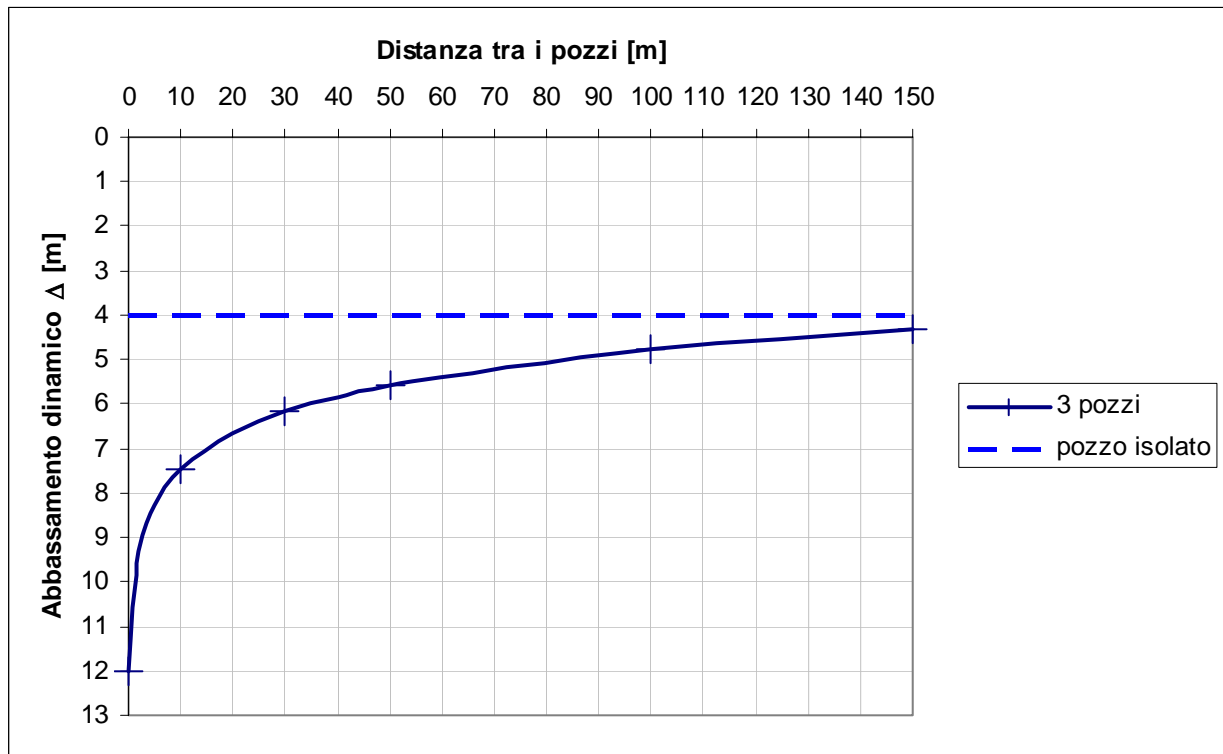


Figura 3.3. Depressione prodotta da un determinato regime di emungimento di un sistema di 3 pozzi equidistanti al variare della distanza reciproca.

Si considerino di nuovo le 3.3:

$$\Delta_1^* = K_1 Q_1 + k_{2,1} Q_2 + k_{3,1} Q_3$$

$$\Delta_2^* = k_{1,2} Q_1 + K_2 Q_2 + k_{3,2} Q_3$$

$$\Delta_3^* = k_{1,3} Q_1 + k_{2,3} Q_2 + K_3 Q_3$$

Se il sistema è sottoposto ad un altro regime di portate q_1 , q_2 e q_3 , nei pozzi si stabiliscono nuove depressioni δ e si avrà analogamente:

$$\delta_1^* = K_1 q_1 + k_{2,1} q_2 + k_{3,1} q_3$$

$$\delta_2^* = k_{1,2} q_1 + K_2 q_2 + k_{3,2} q_3$$

$$\delta_3^* = k_{1,3} q_1 + k_{2,3} q_2 + K_3 q_3$$

Calcolando la somma estesa a tutti i pozzi dei prodotti $\Delta_i^* q_i$ degli abbassamenti generati dal primo regime di emungimenti per le portate emunte nel secondo, si verifica che questa è uguale all'analogha somma dei prodotti degli abbassamenti dovuti al secondo regime per le portate del primo⁷:

$$\sum \Delta_i^* q_i = \sum \delta_i^* Q_i \quad (3.6)$$

⁷ La verifica della 3.6 può farsi più agevolmente facendo riferimento ad un sistema di due soli pozzi, senza niente togliere alla generalità del risultato.

La 3.6 esprime una proprietà tipica delle falde artesiane, che va sotto il nome di *principio di reciprocità*. Essa consente, tramite rilievi sperimentali diretti, di prevedere il comportamento di un campo pozzi per un regime determinato di emungimenti.

Su ogni pozzo del campo si effettuò separatamente una prova di pompaggio a *portata unitaria* misurando gli abbassamenti in tutti i pozzi e si assume ciascuna di queste prove come il primo dei due regimi di emungimento della 3.6. Per la prova relativa al pozzo 1 si avrà:

$$q_1 = 1; q_2 = 0; q_3 = 0; \dots; q_n = 0$$

e nei vari pozzi saranno misurati gli abbassamenti:

$$\delta^*_1; \delta^*_2; \delta^*_3; \dots; \delta^*_n$$

da cui:

$$\Delta^*_1 = \delta^*_1 Q_1 + \delta^*_2 Q_2 + \delta^*_3 Q_3 + \dots + \delta^*_n Q_n \quad (3.7)$$

Sostituendo ai Q_i le portate relative ad un qualunque altro regime di esercizio la 3.7 consente di calcolare il relativo abbassamento nel pozzo 1. Procedendo allo stesso modo si possono calcolare gli abbassamenti in tutti i pozzi per qualunque regime di emungimenti.

4. INTRUSIONE SALINA NELLE FALDE COSTIERE

4.1. Premessa

Un'interessante applicazione dell'idrostatica è quella che permette di interpretare in maniera semplice, anche se di prima approssimazione, il tanto attuale e discusso fenomeno dell'intrusione marina negli acquiferi costieri.

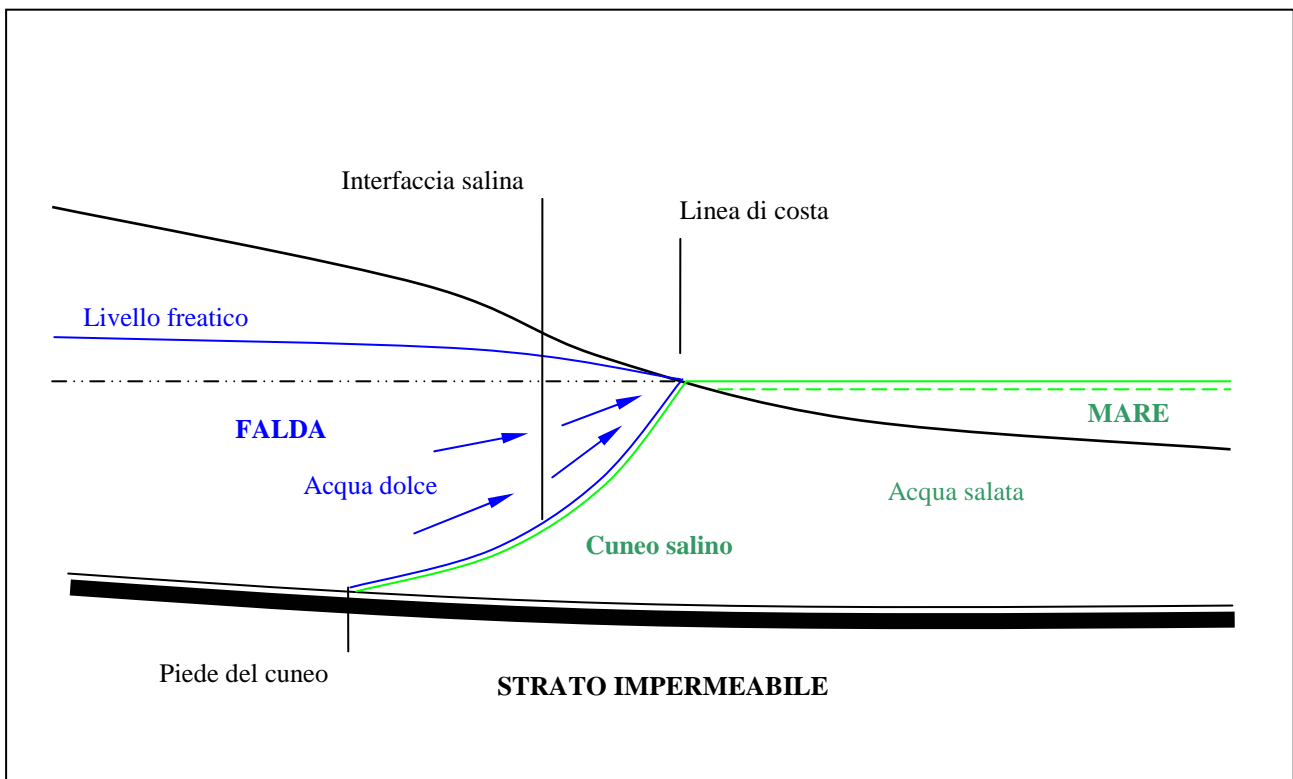


Figura 4.1. Schema del fenomeno dell'intrusione marina in una falda freatica costiera.

Per semplicità si faccia riferimento ad una falda freatica, che scarichi a mare lungo la linea di costa, sostenuta da uno strato profondo impermeabile. Il fenomeno è rappresentato dallo schema di Figura 4.1.

Il caso è quello di una zona litoranea in corrispondenza della quale la parte superficiale della crosta terrestre sia formata da uno strato di roccia incoerente permeabile (ghiaie, sabbie), che si estenda anche al disotto del fondo marino a formare un unico acquifero. Se non vi fosse acqua dolce proveniente dall'entroterra, l'acqua del mare si espanderebbe anche sotto la superficie emersa, creando una falda di acqua salata avente come livello quello del mare.

Di norma però le acque meteoriche che si infiltrano nel terreno formano nello strato permeabile una falda di acqua dolce, che sotto l'azione del gradiente idraulico⁸, ovvero della cadente J , si muove verso la costa e sbocca in mare. In prossimità della costa l'acqua dolce, più leggera, galleggia sull'acqua salata e si forma il cuneo salino delimitato dall'interfaccia su cui poggia e si muove l'acqua dolce. In realtà l'interfaccia non è così netta come quella che si produce tra due liquidi non miscibili; si tratta di una zona di transizione, dove acqua dolce ed acqua salata si mescolano tra loro in proporzioni diverse, formando uno strato di acqua salina di spessore e concentrazione variabili.

4.2. Posizione dell'interfaccia salina in assenza di diffusione. Formula di Ghyben-Herzberg

Come mostra lo schema di Figura 4.1 l'acqua della falda si muove verso il mare con traiettorie convergenti e di conseguenza con velocità crescente all'avvicinarsi alla sezione di sbocco. Il che produce un progressivo aumento della cadente ed un incurvamento crescente della superficie freatica e dell'interfaccia salina. In questo caso, per la presenza di componenti verticali del moto, le pressioni non rispettano rigorosamente la legge idrostatica e se ne discostano in misura crescente con l'avvicinarsi allo sbocco in mare.

Tuttavia, tenuto conto della modesta entità delle variazioni della cadente e della gradualità con cui si incurva l'interfaccia salina, ad una certa distanza dalla sezione di sbocco si può assumere con buona approssimazione che:

- le traiettorie siano sensibilmente orizzontali (moto gradualmente variato) e che di conseguenza la pressione nell'acquifero vari con legge idrostatica.

Si ammetta inoltre che:

- lo spessore dell'interfaccia salina sia piccolo rispetto alle profondità in gioco;
- non vi sia moto nell'acqua salata.

Sotto queste condizioni e con riferimento alla Figura 4.2 si consideri un qualunque punto **A** sull'asse dell'interfaccia salina. In esso alla pressione prodotta dalla colonna di acqua dolce di altezza $H + h$ deve fare equilibrio la sottopressione prodotta dall'acqua salata alla profondità H , ovvero:

$$(H + h)\gamma_d = H \gamma_s \quad (4.1)$$

dove:

h = quota sul livello del mare della superficie dell'acqua dolce in corrispondenza di **A**;

H = profondità sotto il livello del mare del punto **A**;

$\gamma_d = 1000 \text{ Kg/m}^3$, peso specifico dell'acqua dolce;

$\gamma_s = 1020 - 1030 \text{ Kg/m}^3$, peso specifico dell'acqua di mare.

Sviluppando la relazione precedente si ottiene:

$$H \gamma_d + h\gamma_d = H \gamma_s$$

⁸ Il *gradiente idraulico* è definito come la differenza di quota fra due punti della superficie freatica ($h_2 - h_1$) diviso la loro distanza L .

ovvero:

$$H = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} h = G h \quad (4.2)$$

dove: $G = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d}$ = Coefficiente di Ghyben-Herzberg

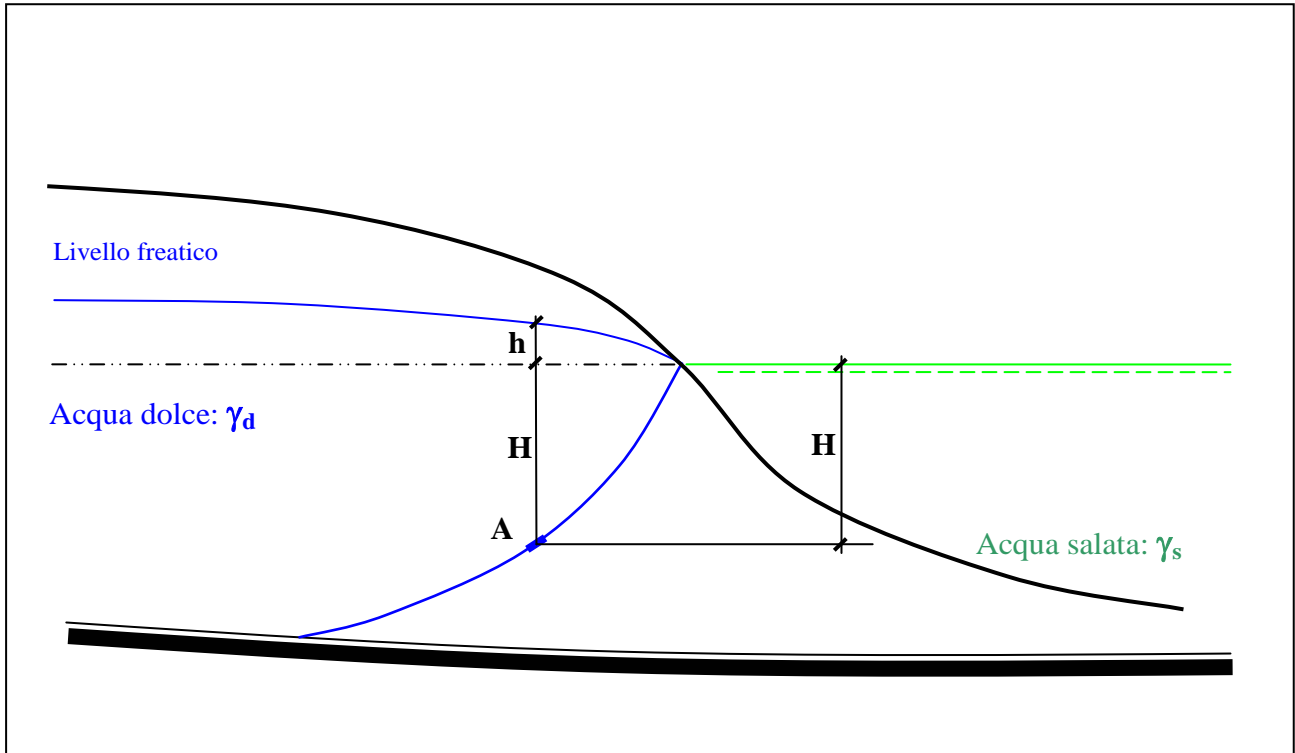


Figura 4.2. Equilibrio idrostatico dell'interfaccia salina di un acquifero freatico costiero.

Per un valore medio del peso specifico dell'acqua di mare, 1025 Kg/m^3 :

$$G = 40$$

Per esempio, sia 2 m s.m. la quota della superficie dell'acqua in un pozzo freatico prossimo alla costa, si può stimare che l'interfaccia si trovi a circa 80 m sotto il livello del mare, teoricamente a 82 m dalla superficie dell'acqua del pozzo.

In realtà il fenomeno è assai più complesso di come appare dall'approccio di Ghyben e Herzberg, per molte ragioni, principalmente legate alla dinamica dell'interfaccia, spesso di notevole spessore. Tuttavia risulta prezioso perché con estrema semplicità permette di dare una valutazione dell'ordine di grandezza del fenomeno dell'intrusione marina attraverso osservazioni superficiali.

Quando al livello freatico si sostituisca quello artesiano, il modello serve come strumento orientativo anche per le falde in pressione.

4.3. Effetti degli emungimenti

È chiaro da quanto esposto in precedenza che la presenza del cuneo salino non è necessariamente legata all'intervento dell'uomo. È un fenomeno naturale inevitabile legato alla

morfologia degli strati più superficiali della crosta terrestre. La sua estensione può variare naturalmente in relazione ai fenomeni idrologici e soprattutto a quelli idrogeologici. Una forte e prolungata diminuzione delle precipitazioni produce un progressivo abbassamento della superficie piezometrica delle falde a cui consegue una maggiore penetrazione del cuneo salino ed un innalzamento dell'interfaccia. Il movimento dell'interfaccia a sua volta contribuisce a favorire la miscelazione tra acqua dolce ed acqua salata, ad aumentare la potenza dello strato salino e a diffondere l'inquinamento anche ai livelli meno profondi della falda.

D'altro canto è inevitabile che un intervento dell'uomo, massiccio e disordinato, incrementi la penetrazione dell'acqua salata negli acquiferi, anche quando sia rispettato il bilancio idrologico.

In una falda immune da prelievi tutta l'acqua di ricarica defluisce a mare. Apparentemente questa quantità può essere prelevata senza danno per la falda. In realtà non è proprio così; incidono le modalità di prelievo. Se il prelievo è ben distribuito su tutta l'estensione della falda, si produrrà un abbassamento della superficie piezometrica, che causerà una maggiore penetrazione del cuneo salino nella parte inferiore dell'acquifero, ma senza pregiudizio per la qualità dell'acqua emunta. Ma se, schematizzando in maniera grossolana, si crea un fronte di prelievo nell'entroterra, che sottragga alla falda tutta la portata in movimento verso il mare (Figura 4.3), di lì in poi si interromperà il moto dell'acqua e si produrrà progressivamente una traslazione del cuneo verso il fronte di emungimento, finché i pozzi verranno a trovarsi immersi nella falda salata.

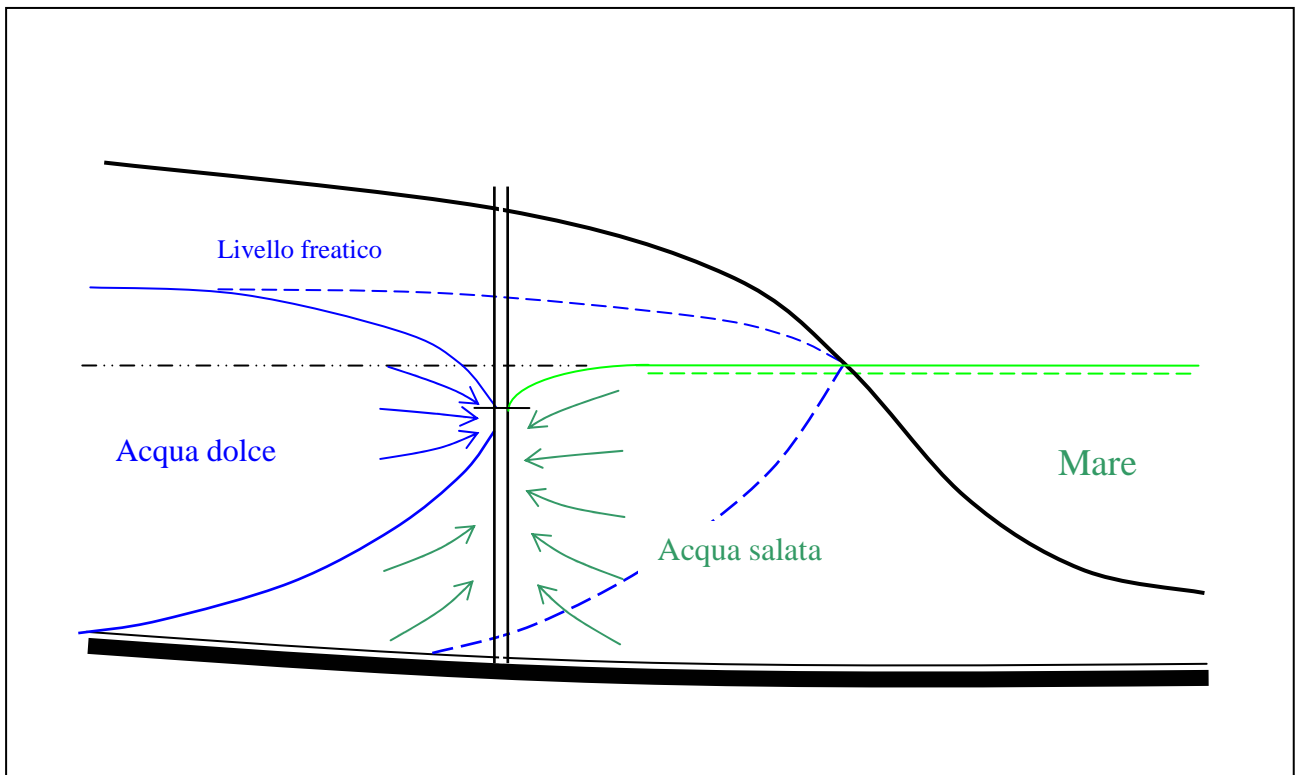


Figura 4.3. Avanzamento del cuneo salino prodotto dal prelievo lungo un fronte di emungimento

La contaminazione salina si può verificare anche per prelievi molto più bassi della disponibilità desunta dal bilancio idrologico a causa dell'eccessiva concentrazione degli emungimenti.

Si è visto come l'abbassamento dinamico cresca con la portata; nella migliore delle ipotesi con legge lineare. Si è anche visto come le superfici piezometriche di pozzi distanti meno del raggio di depressione interferiscano tra loro. Come mostra la Figura 4.4, concentrando tutto il prelievo in un solo pozzo o in più pozzi ravvicinati (caso **A**), il cono di depressione si abbassa molto di più di quanto si abbasserebbe se la medesima portata fosse ripartita su più pozzi adeguatamente distanziati (caso **B**).

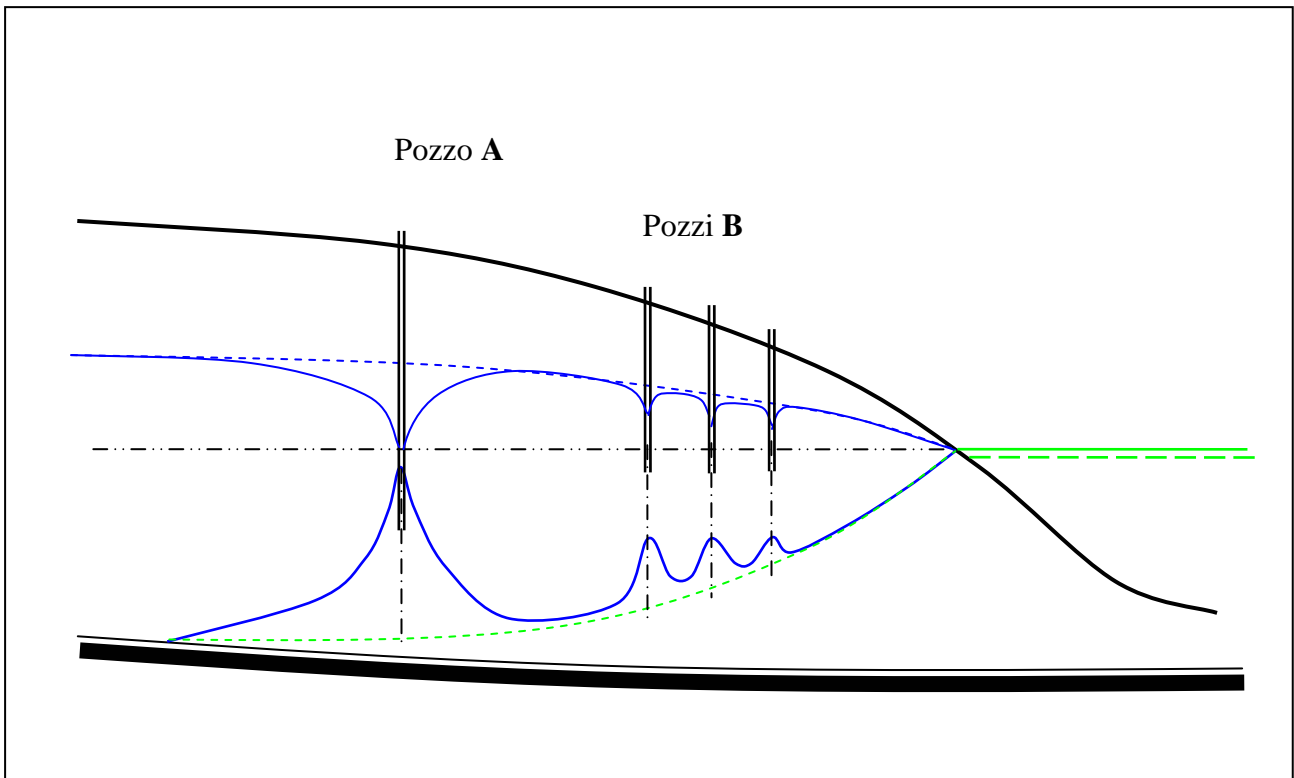


Figura 4.4. Effetto della distribuzione dei prelievi sul cuneo salino

L'abbassamento della superficie piezometrica della falda genera una *risalita del cuneo salino*, che, per la 4.2:

$$H = G h \quad H_0 = G h_0$$

vale:

$$H - H_0 = G (h - h_0) \quad (4.3)$$

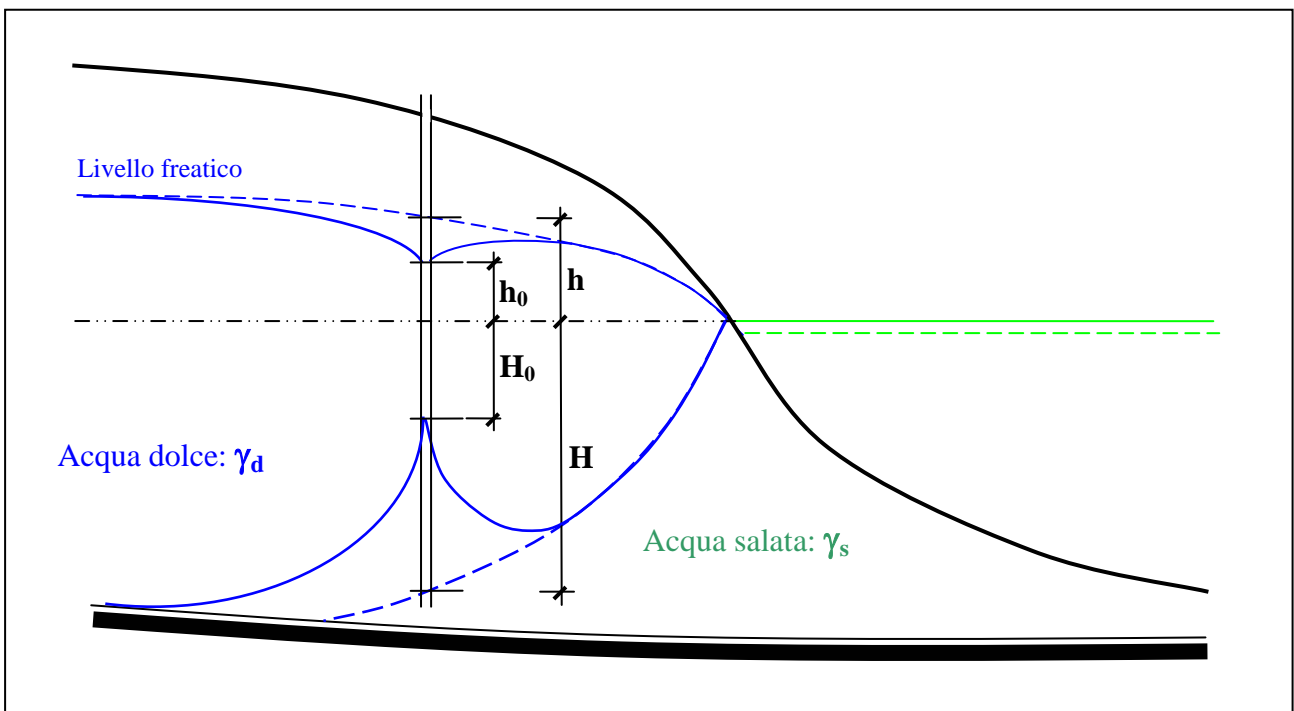


Figura 4.5. Risalita del cuneo salino in corrispondenza degli emungimenti

FONTI BIBLIOGRAFICHE

RUGGIERO C. Idraulica. Libreria scientifica Giordano Pellegrini. Pisa 1962

SCHOELLER H. Les eaux souterraines. Masson & Cie Editeurs. Paris 1962.

DE MARCHI G. Idraulica. Ulrico Hoepli editore. Milano 1977

CITRINI D., NOSEDA G. Idraulica. Casa editrice Ambrosiana. Milano 1994

CUSTODIO E., LLAMAS M.R. Hidrología subterránea. Ediciones Omega. Barcelona 1996.