

# Le prove in pozzo ed a gradini

Alessio Fileccia<sup>1</sup>

## Premessa

Durante la prova di portata, le misure più accurate sono quelle per cui l'abbassamento nel pozzo è uguale a quello dell'acquifero, immediatamente esterno al tubo di rivestimento ed al dreno. Questa condizione è quella che si verifica quando il pozzo è completo e l'acquifero ideale.

In realtà quando l'acqua si avvicina al pozzo si assiste ad una progressiva transizione da regime laminare (nell'acquifero) a regime turbolento (attorno al pozzo). Il gradiente diventa via via più elevato, dato che la sezione di passaggio diminuisce, la velocità aumenta ed il livello dinamico si approfondisce.

Questo abbassamento addizionale viene chiamato perdita di carico (well loss).

La prova in pozzo e soprattutto la prova a gradini viene effettuata per calcolare questo fenomeno e secondariamente l'efficienza dell'intervento.

## La prova in pozzo

La fig. 1 mostra una delle prove più semplici che possono essere eseguite per determinare la curva caratteristica del pozzo. Si tratta di mettere in funzione la pompa con una o più portate, crescenti e per periodi uguali. Al termine di ogni periodo stabilito si determina la portata specifica, cioè il rapporto tra portata ed abbassamento massimo registrato ( $Q_s = Q/\Delta s$ ).

Ripetendo la prova a distanza di tempo (ad esempio ogni anno) ed anche per una sola coppia di valori portata-abbassamento, si può evidenziare il progressivo deterioramento dei filtri evidenziato dalla diminuzione della portata specifica.

Gli acquiferi freatici danno in genere abbassamenti inferiori dei confinati ed oltre un certo valore di portata, la curva cessa di essere lineare (fig. 1 a sinistra); questo indica il superamento del punto critico a cui corrisponde una portata ( $Q$  critica), per la quale si innescano fenomeni di turbolenza, con eventuale trascinamento di sabbia ed abbassamenti elevati.

La portata critica va raggiunta solo in fase di prova e serve ad indicare quale sarà quella di esercizio del pozzo, in prima approssimazione pari a  $2/3 Q_c$ .

Negli acquiferi artesiani l'abbassamento è lineare, almeno fino al momento in cui il livello piezometrico è al di sopra del tetto dell'acquifero, e la portata di utilizzo sarà quella per la quale gli abbassamenti sono ragionevolmente contenuti (ad esempio tali da lasciare comunque un battente elevato sopra la pompa).

## La prova a gradini (Step dradown test, SDT)

La prova a gradini viene effettuata di norma in un pozzo di produzione messo in pompaggio per portate variabili, crescenti, e periodi costanti di tempo (Clark).

La prova è eseguita principalmente per prevedere gli abbassamenti a diverse portate (anche leggermente superiori a quelle di uso normale), per conoscere l'efficienza del pozzo (buona esecuzione) e ricavare alcuni parametri dell'acquifero.

## Descrizione

Nelle vicinanze di un pozzo in pompaggio il flusso idrico è in una situazione di regime turbolento ed il suo moto non segue più la legge di Darcy.

Questo fatto comporta che gli abbassamenti non sono

<sup>1</sup> Geologo, libero professionista, Treviso.

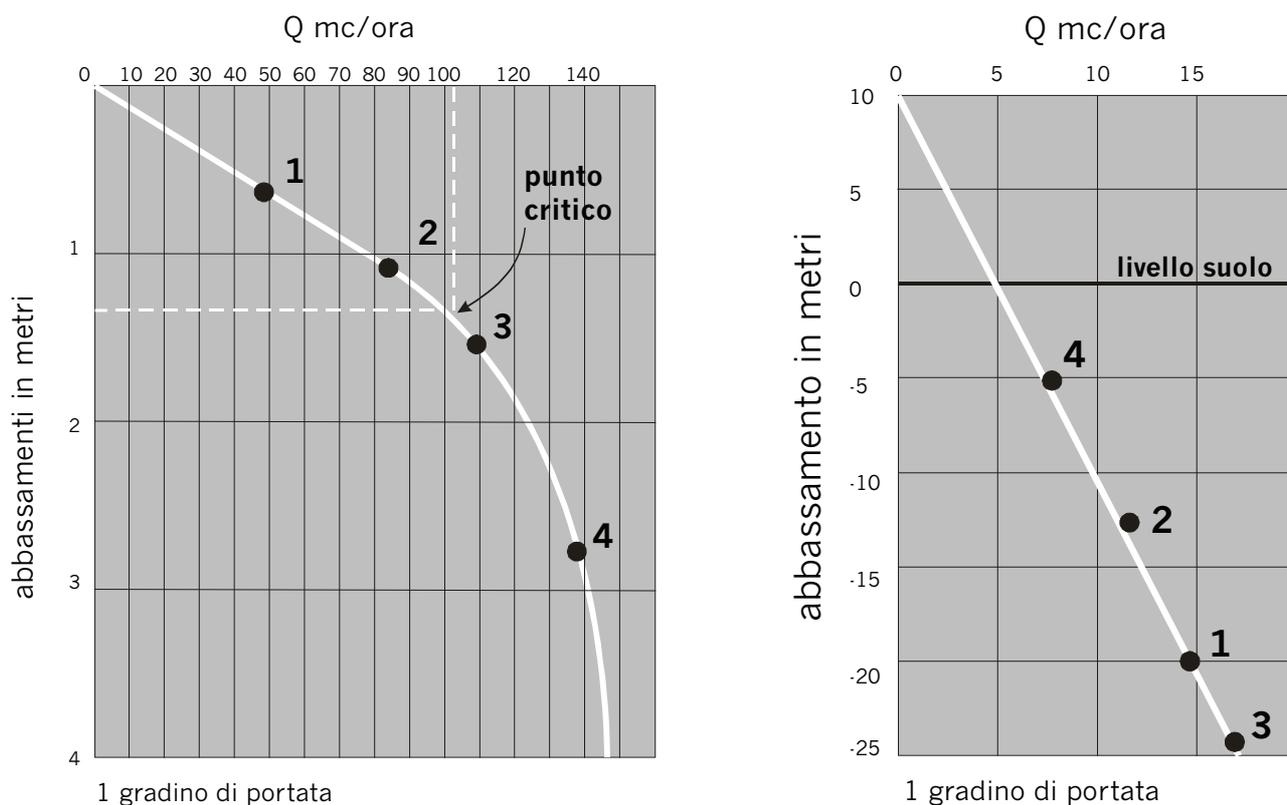


Figura 1. Curva abbassamento – portata per un acquifero freatico (a sinistra) e per un acquifero artesiano (a destra); nel caso del freatico è evidenziata la portata critica ( $Q_c$ ), oltre la quale gli abbassamenti aumentano in modo esponenziale; la portata di utilizzo è bene sia circa 1/3 minore.

più prevedibili con le normali formule ed in genere sono superiori a quelli teorici.

In altre parole siamo in presenza di perdite di carico non più lineari ma che variano con il quadrato (od il cubo) della portata estratta.

Conoscendo gli abbassamenti corrispondenti a diverse portate si può ricavare una formula generale ed una curva caratteristica del pozzo di grande utilità per:

- Fissare la portata di esercizio
- Conoscere le caratteristiche dell'acquifero
- Conoscere l'efficienza costruttiva dell'opera (anche nel tempo), separando quelle che sono le due componenti fondamentali degli abbassamenti: le perdite di formazione e quelle di pozzo
- Valutare alcuni parametri dell'acquifero (mediante formule approssimate in fase di pompaggio, o più precise se vengono effettuate anche le misure in risalita)

In questo articolo ci soffermeremo sui primi tre punti

dando alcune formule approssimate per il calcolo di  $T$ , dalla portata specifica. Il calcolo della trasmissività dalle misure di abbassamento residuo durante la risalita, può invece essere effettuato con la formula approssimata di Cooper-Jacob e l'utilizzo di un opportuno valore di portata che in genere è quello corrispondente all'ultimo gradino.

**Abbassamenti di livello osservati nel pozzo**

L'abbassamento di livello misurato in pozzo (livello dinamico) è dovuto ad una serie di fenomeni riconosciuti da vari autori (Jacob, Rorabaugh, Hantush ecc.) e che si possono riassumere in due grandi categorie:

1. Perdite di carico lineari (formation losses), causate dalla modificazione dell'acquifero a seguito della perforazione e completamento del pozzo per:
  - Parziale compattazione delle pareti del foro
  - Parziale impermeabilizzazione per uno spurgo inefficiente
  - Inserimento del dreno

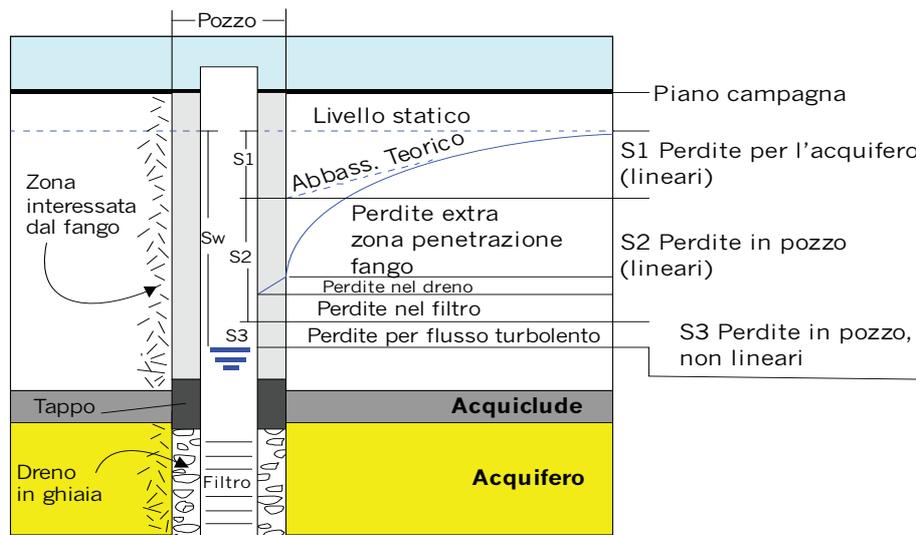


Figura 2. Le perdite in pozzo (well loss) sono la differenza tra l'abbassamento totale misurato (sw) e quello teorico (s1)

- Inserimento dei filtri

2. Perdite di carico non lineari (well losses), causate principalmente dall'inserimento e funzionamento delle attrezzature di pompaggio:

- Attrito all'interno dei filtri e tubo pompa
- Attrito alla superficie di passaggio acquifero-pozzo

Tutte queste perdite di carico sono responsabili del fatto che l'abbassamento all'interno del pozzo è superiore a quello che ci si potrebbe aspettare.

In ambito petrolifero si parla di "skin effect" per caratterizzare tutte quelle perdite di carico che si verificano nelle vicinanze del pozzo.

Il termine si basa sul fatto che l'acquifero viene considerato omogeneo fino alla parete del pozzo, mentre tutte le perdite di carico si considerano concentrate in un sottile strato ad essa aderente.

Facendo riferimento alla fig. 2, le cause che determinano il livello dinamico all'interno del pozzo in pompaggio sono:

a) perdite di carico nell'acquifero

causano l'abbassamento all'esterno della colonna, sono caratterizzate da flusso laminare e dipendono dal diametro del pozzo e dai parametri dell'acquifero; il valore di abbassamento che si ottiene è comprensivo di:

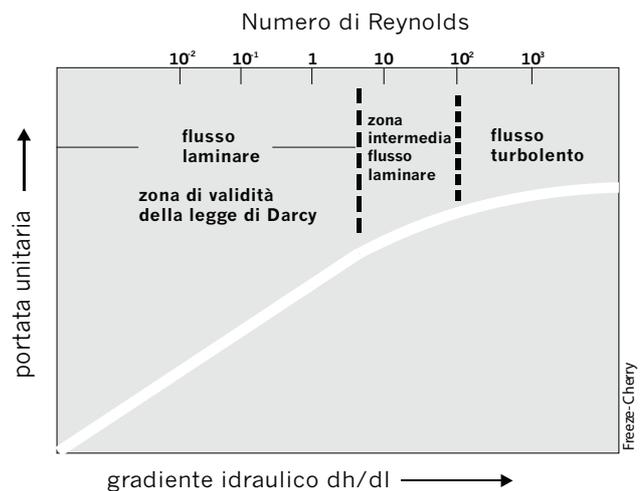


Figura 3. Si è visto sperimentalmente che la legge di Darcy resta valida in una certa gamma di velocità. In particolare essa non è verificata nei moti turbolenti, (ad esempio nei flussi veloci attraverso condotte aperte), né in quelli estremamente lenti, come in certe argille a bassa permeabilità.

Ad alte velocità esiste un parametro (adimensionale) che permette di stabilire se il movimento è ancora di tipo laminare o turbolento: il numero di Reynolds, esso lega alcune caratteristiche del fluido (densità, viscosità  $\mu$ ), con il diametro dei canali tra i diversi granuli (D).  $N = v D / \mu$ , dove v è la velocità di flusso; negli acquiferi si considera  $D = d50$ .

- pozzo incompleto
- anisotropia
- eterogeneità
- progressiva riduzione dello spessore saturo in falda freatica
- limiti

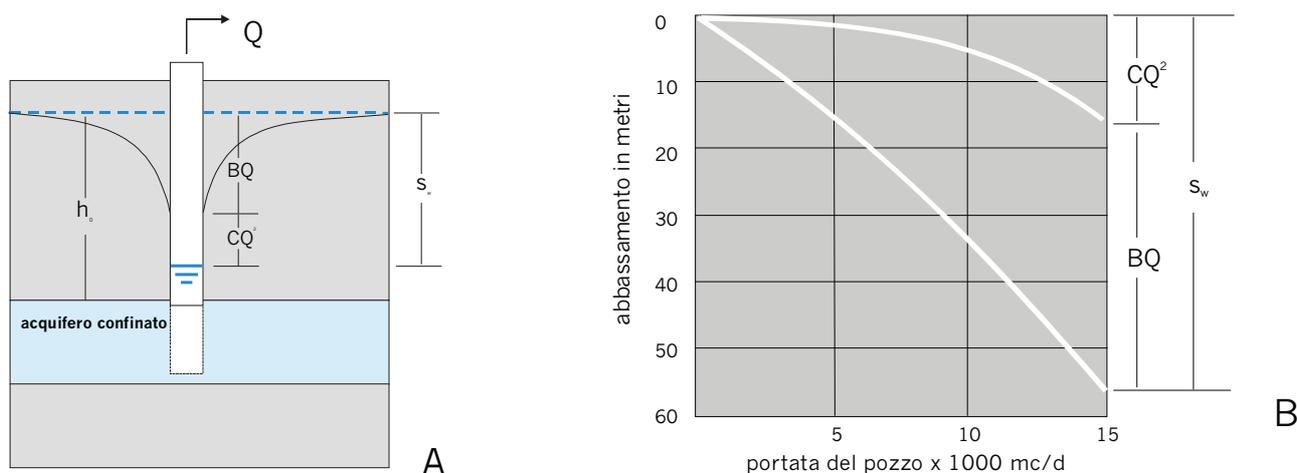


Figura 4. Abbassamenti provocati dall'opera e dall'acquifero, A: geometria della prova e scomposizione dell'abbassamento totale nelle due componenti (lineare e quadratica); B: grafico abbassamento – portata della prova e scomposizione nelle due curve lineare e quadratica

*b) perdite di carico non laminari nelle vicinanze del pozzo*

se il numero di Reynolds supera il valore soglia (circa 10), la legge di Darcy non è applicabile e si entra in regime turbolento, la velocità dell'acqua è allora proporzionale a  $i^{1/2}$  e gli abbassamenti al quadrato della portata (in alcuni casi l'esponente è anche maggiore di 2); questo abbassamento è importante ad esempio, in pozzi di piccolo diametro, con filtri corti, poco porosi o con uno sviluppo insufficiente (fig. 3).

*a) skin effect*

L'area attorno al pozzo è modificata dalla perforazione e non possiede più le stesse caratteristiche dell'acquifero, in particolare la sua conducibilità idraulica è modificata; questa zona è chiamata "skin zone" e caratterizzata da un suo proprio valore di K ed abbassamento (Kroening).

*b) perdite ascensionali nel pozzo*

sono quelle che si verificano nel percorso tra filtri e pompa; si considerano quando tale distanza è elevata e/o il diametro del rivestimento è piccolo rispetto alla portata estratta (fig. 5).

*c) perdite in ingresso nella pompa*

si verificano quando il diametro della pompa è solo leggermente inferiore a quello del rivestimento.

**Modalità esecutive**

Nella prova a gradini (step drawdown test, SDT) la portata viene aumentata progressivamente per diversi intervalli temporali.

La metodologia può variare leggermente ed avere gradini di durata diversa o di lunghezza tale da raggiungere la stabilizzazione, oppure al termine di ogni gradino si deve attendere il ritorno del livello alle condizioni iniziali prima di aumentare nuovamente la portata.

In ogni caso un'opportuna scelta dei valori sul grafico permette di ricondurre il metodo ad uno standard.

Nella metodologia descritta si utilizza una delle procedure più seguite e che riduce anche la possibilità di un'interpretazione soggettiva:

- le portate sono scelte per coprire la gamma di quelle previste per l'utilizzo normale e come le altre prove anche per produrre uno "stress" sufficientemente elevato nell'acquifero (Clark)
- ogni gradino ha durata costante; valori indicativi sono tra 30 e 120 minuti (Krusemann – de Ridder), o tra 100 e 180 minuti (Clark)
- al termine di ogni gradino la portata viene aumentata senza attendere il ritorno al livello statico spegnendo la pompa
- le portate dei vari gradini devono essere abbastanza diverse tra loro, ad esempio crescere nella proporzione 1,2,4,8 (Custodio)
- la portata dell'ultimo gradino va scelta un po' più alta di quella d'esercizio

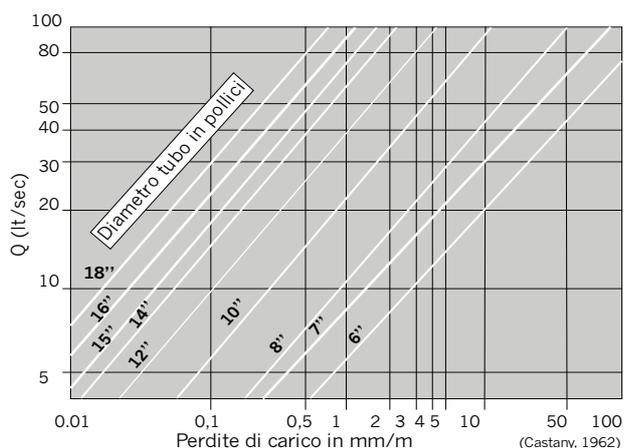


Figura 5. Relazione tra le perdite di carico ed il diametro della tubazione di mandata, per diverse portate

- la prova può essere continuata misurando la risalita dopo avere chiuso la pompa alla fine dell'ultimo gradino e fino al ritorno al livello iniziale; con questa metodologia si ottiene un valore di trasmissività non influenzato da variazioni di portata (Kruseman – de Ridder)
- durante la prova vengono riportati i valori di abbassamento (livello dinamico), tempo da inizio della prova, portate, abbassamento residuo

### Interpretazione

L'interpretazione dei risultati si esegue mediante:

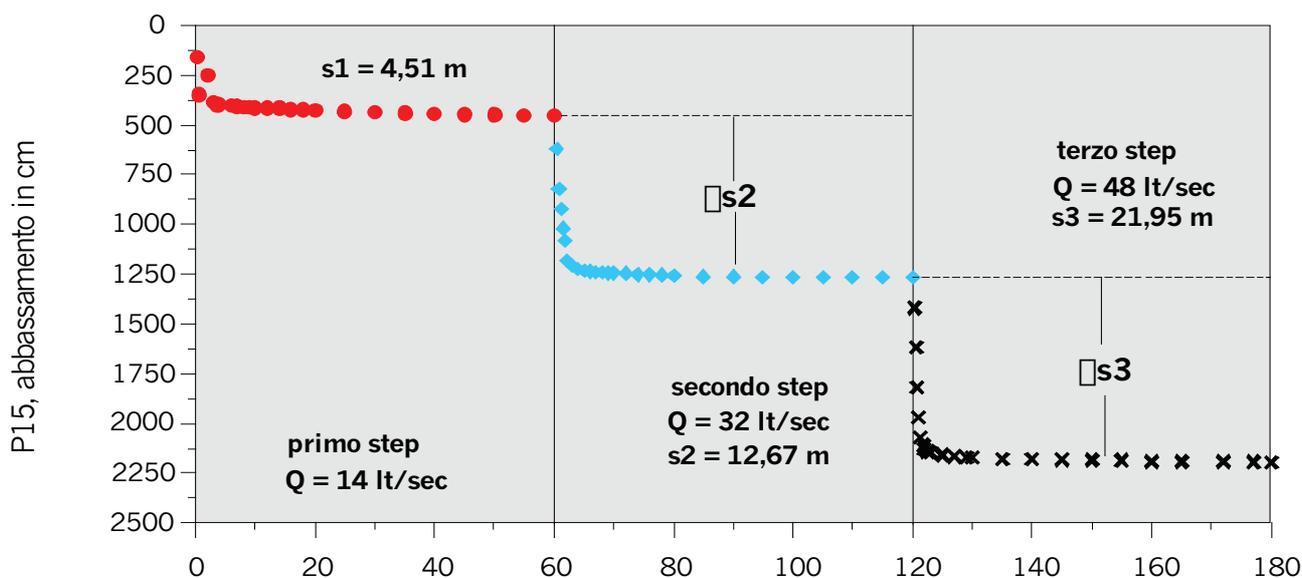


Figura 6. Prova con tre gradini di portata, in acquifero freatico; le curve mostrano il raggiungimento di una pseudo stabilizzazione al termine di ogni gradino

- costruzione di grafici
- applicazione di formule

questo permette di ottenere i seguenti parametri:

- portata ottimale di utilizzo
- efficienza dell'opera (percentuale delle perdite di carico non lineari)
- trasmissività

oltre che una serie di valutazioni qualitative sull'insieme pozzo-acquifero

### A. Grafici

In fig. 5 è riportato l'esempio di una prova a gradini, ciascuno dei quali ha uguale durata di un'ora con il raggiungimento di una situazione di quasi equilibrio.

Consideriamo ora una situazione più realistica, in cui non si raggiunge la situazione di quasi equilibrio al termine di ogni gradino, come in fig. 7.

In questo caso gli abbassamenti da considerare sono quelli estrapolati al termine dello step successivo:

S1 è l'abbassamento con la prima portata (Q1); l'abbassamento al secondo gradino è:

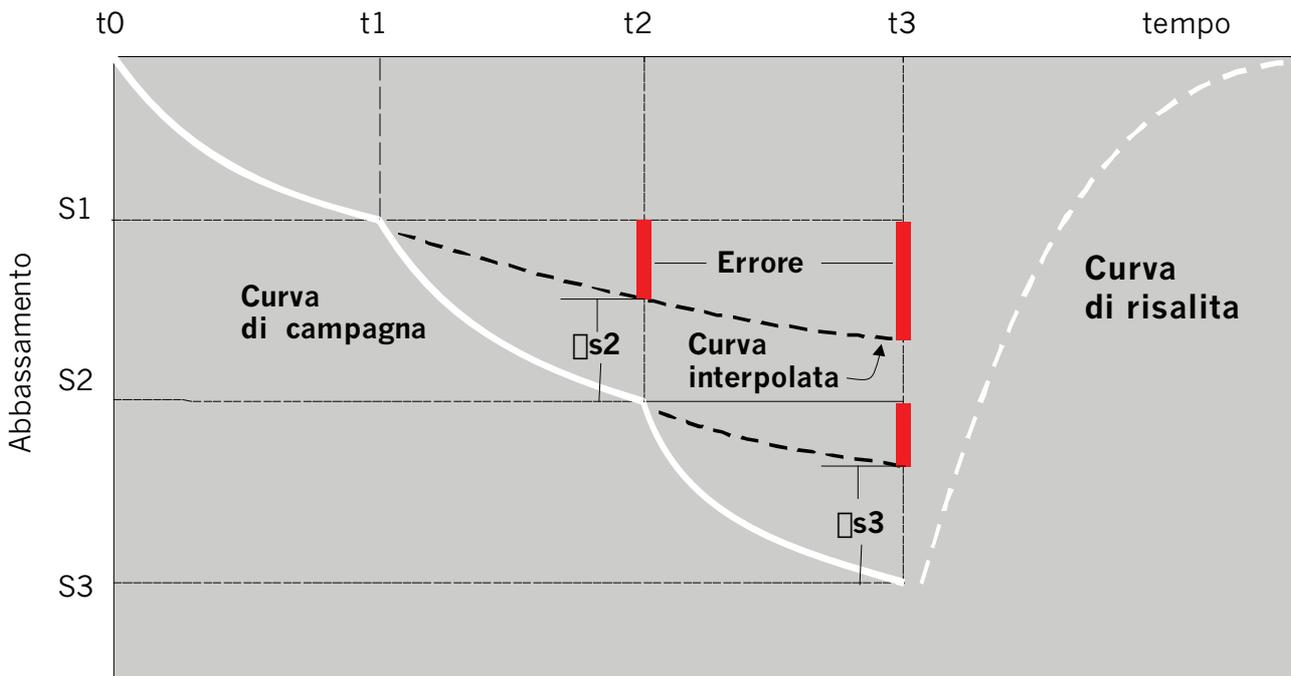


Figura 7. Prova con gradini di uguale durata senza raggiungere la stabilizzazione.

$$S2 = s1 + \Delta s2$$

e quello alla portata Q3:

$$S3 = s1 + \Delta s2 + \Delta s3$$

L'incremento di abbassamento  $\Delta s2$  comprende le perdite di carico che si hanno all'aumento di portata da Q1 a Q2.

Per facilitare l'interpretazione è quindi consigliabile adottare gradini di uguale durata al termine dei quali si presume possa avvenire una pseudostabilizzazione.

**B. applicazione delle formule**

Le prime analisi numeriche si devono a Jacob (1947) che cercò di valutare gli abbassamenti in pozzo se questo era sottoposto a portate diverse da quelle di prova. In prima approssimazione egli propose la seguente equazione per giustificare le perdite lineari e non:

$$(1) \quad sw = B(re,t) Q + CQ^2$$

sw = abbassamento totale misurato in pozzo (fig. 2)

B(re,t) abbassamento lineare dovuto all'acquifero, ricavabile ad es. con il metodo di Thiem, Theis o Cooper-Ja-

cob,  $CQ^2$  è la frazione di abbassamento provocata dalle perdite non lineari (chiamate anche perdite di pozzo). A sua volta il primo termine a destra dell'equazione (1) è costituito da altri due:

$$B(re,t) = B1 + B2$$

B1 = coefficiente lineare delle perdite di carico nell'acquifero

B2 = coefficiente lineare delle perdite di carico nel pozzo

re = raggio equivalente del pozzo (distanza alla quale l'abbassamento teorico è uguale a quello immediatamente esterno al filtro)

La formula deriva da quella di Thiem in regime permanente per un acquifero confinato, dove l'abbassamento teorico al pozzo è:

$$(2) \quad s = \frac{0,366 Q}{T} \log R/rw$$

(se l'abbassamento è preso in un ciclo logaritmico,  $\log R/r = 1$ )

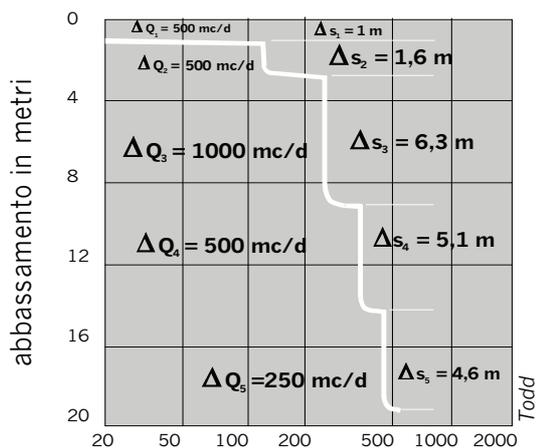
R = raggio d'influenza; rw = raggio del pozzo

ponendo  $B = (0,366/T) \log R/rw$ , si ottiene la (1)

Tabella 1. Aumento della portata estraibile con l'aumento del raggio del pozzo

Diametro	2D	3D	4D	6D	8D
Portata	1,12 Q	1,19 Q	1,25 Q	1,35 Q	1,43 Q

Curva di un pozzo durante una prova a gradini di portata (calcolo dell'efficienza)



Perdite in pozzo (calcolo coefficienti B e C)

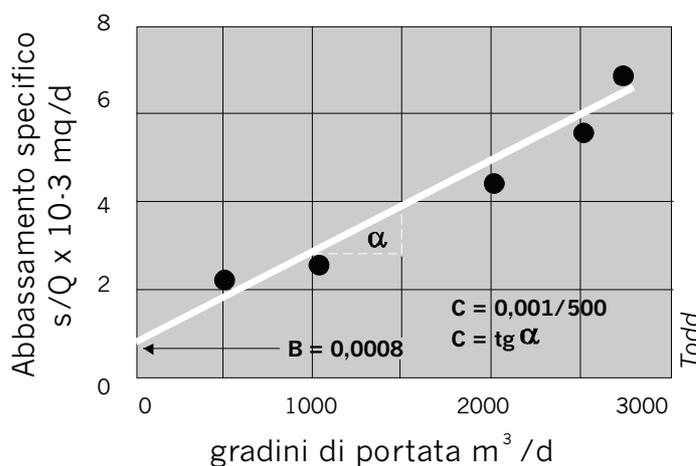


Figura 8. Prova a gradini e calcolo dei coefficienti B - C.

$$sw = B(re,t) Q + CQ^2$$

L'equazione (2) mostra anche la relazione esistente tra portata e raggio del pozzo: la prima è inversamente proporzionale a log R/rw.

Questo significa che essendo  $R \gg rw$  l'aumento di portata che si può ottenere raddoppiando il raggio del pozzo è solo del 10%. Ai fini delle perdite in pozzo questo effetto è invece molto importante: raddoppiare il raggio del pozzo, aumenta notevolmente la superficie di ingresso, riduce la velocità del fluido di quasi la metà e (per  $n = 2$ ) anche l'attrito generale.

La formula originaria di Jacob fu modificata nel 1953 da Rorabaugh che rilevò come in alcuni casi le perdite in pozzo variavano in maniera diversa dal quadrato della portata, ottenendo la seguente:

$$s = B(re,t)Q + CQ^p$$

dove il coefficiente  $p$  è  $1,5 < p < 3,5$  a seconda del valore di  $Q$ .

L'ipotesi di Jacob che  $BQ$  e  $CQ^2$  sono due termini di-

stinti è stata rivista in seguito (Driscoll, Krusemann, de Ridder) e Kasenow ha dimostrato come in realtà il termine  $BQ$  contiene una porzione di abbassamento dovuto al flusso turbolento e  $CQ^2$  una porzione dovuta al flusso laminare.

La prova a gradini permette quindi di ricavare i coefficienti B e C e conoscere gli abbassamenti per diverse portate. Per ottenere tali coefficienti si può impostare un sistema di due o più equazioni (quanti sono i gradini) del tipo:

$$\begin{aligned} s_1 &= BQ_1 + CQ_1^2 \\ s_2 &= BQ_2 + CQ_2^2 \\ &\text{ecc.} \end{aligned}$$

oppure

$$\begin{aligned} s_1/Q_1 &= B + CQ_1 \\ s_2/Q_2 &= B + CQ_2 \\ &\text{ecc.} \end{aligned}$$

L'alternativa più seguita è comunque il metodo grafico (Bierschenk), costruendo l'equazione della curva

$$(4) \quad s/Q = B + CQ \text{ (vedi fig. 8)}$$

Il grafico  $S/Q - Q$  è in scala aritmetica, il valore  $B$  è l'ordinata della retta interpolata, mentre  $C$  è il coefficiente angolare della stessa retta.

La precisione può essere migliorata applicando l'analisi di regressione e riducendo l'incertezza nella scelta della retta d'interpolazione.

**Efficienza del pozzo**

Determinare l'efficienza del pozzo significa in pratica valutare la sua corretta esecuzione. Oltre alla portata specifica ( $Q/s$ ), già vista in precedenza, si ricorre ad altri parametri che risultano dalla elaborazione dell'equazione caratteristica di Jacob:

- il coefficiente  $C$
- l'efficienza ( $WE$ )
- l'indice di turbolenza ( $T.I.$ )

**Il coefficiente delle perdite di carico  $C$**

Alcuni Autori (Walton, De Marsily) hanno proposto il parametro  $C$  (perdite di pozzo) come riferimento per valutare la funzionalità dei filtri e dell'opera in genere, anche se da solo non sempre è indice di efficienza<sup>2</sup>.

Tabella 2. Relazione tra parametro  $C$  (perdite di carico) e condizioni di un pozzo (Walton 1970)

$C$ (sec <sup>2</sup> / m <sup>5</sup> )	Condizioni del pozzo
< 1800	ben progettato
1800 – 3600	Leggermente deteriorato od ostruito
3600 - 14400	Fortemente deteriorato od ostruito
> 14400	Difficilmente recuperabile

**Calcolo dell'efficienza del pozzo ( $WE$ ) Jacob**

La formula più utilizzata è quella di Jacob:

$$(5) \quad WE = 100 BQ / (BQ + CQ^2)$$

Se un pozzo non ha perdite di carico è un pozzo perfetto; in pratica si può valutare solo l'incidenza delle perdite non lineari ( $C$ ) e molto difficilmente separare i due coefficienti  $B_1, B_2$  dell'equazione (1).

Valori di  $WE > 60-70\%$  indicano un buon comportamento dell'opera.

**Calcolo dell'Indice di Turbolenza ( $T.I.$ )**

Questo parametro è stato proposto da Gorla (2003) e vale:

$$T.I. = 100 CQ^2/s$$

( $s$  = abbassamento)

è da sottolineare che rispetto al parametro  $WE$  i valori sono diversi, e cioè:

- T.I. 30% - 65 % indica un pozzo non idoneo
- T.I. < 30% flusso turbolento ridotto
- T.I. > 60% flusso turbolento elevato

**Esempi di calcolo delle perdite di carico e dell'efficienza di un pozzo**

Illustriamo quanto detto finora, con due esempi di calcolo delle perdite di pozzo, di formazione e dell'efficienza in generale dell'opera. Il primo esempio è applicato ad una prova con pozzo e tre piezometri, il secondo al pozzo singolo senza il raggiungimento della pseudostabilizzazione

**Prova a gradini su acquifero confinato con piezometri**

Per illustrare il fenomeno well loss, presentiamo un esempio elaborato dai dati di una prova di portata (Kresic, 1997) con tre successivi gradini, in un acquifero confinato ed effettuando le misure sia nel pozzo di produzione ( $PW$ ) sia in tre piezometri ( $PZ1, PZ2, PZ3$ ) situati a varie distanze.

Ogni fase di pompaggio (gradino, step) ha la durata di

2. Secondo alcuni Autori, la tabella 2 è da preferire all'equazione (5), vedi anche esercizio risolto.

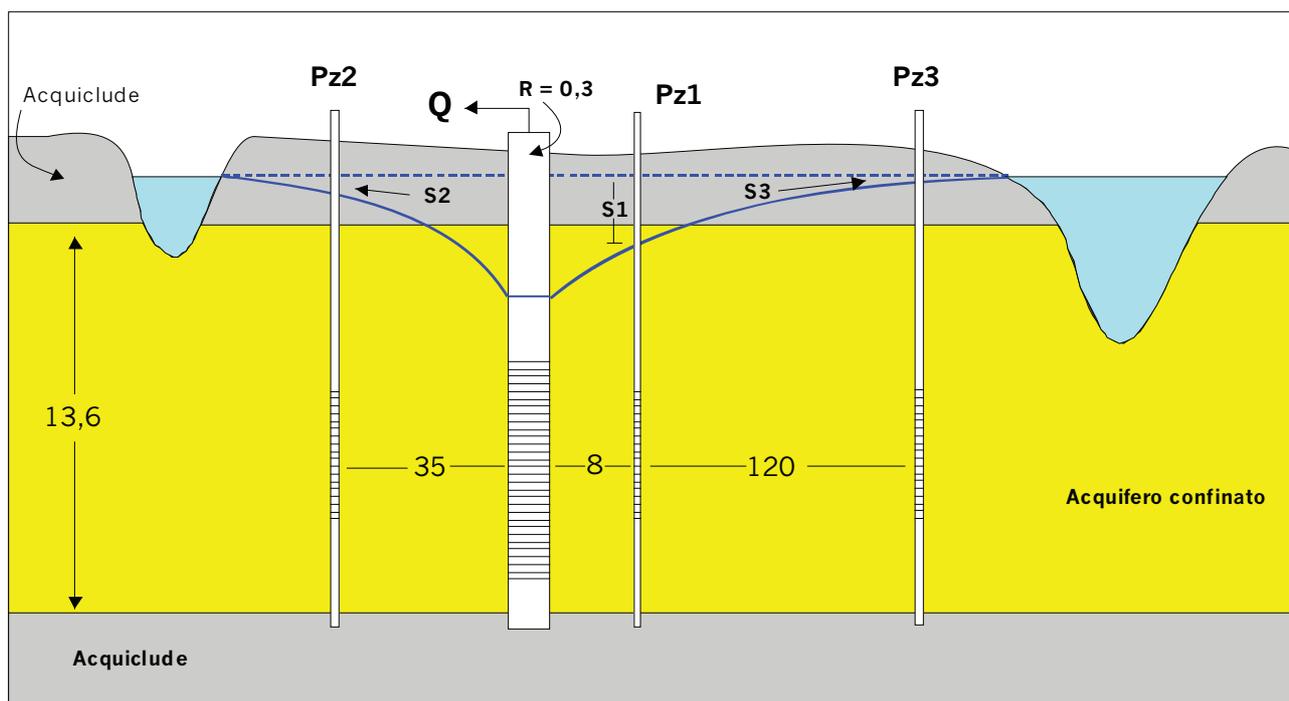


Figura 9. Disposizione dei piezometri e del pozzo in pompaggio durante la prova a gradini.

6 ore e tra uno step ed il successivo la portata estratta in PW viene aumentata da 10 a 15 a 20 lt/s.

Nella fig. 8 i tre piezometri sono situati a distanze progressive dal pozzo, di 8, 35 120 m; il pozzo ha un raggio di 0,3 m, l'acquifero è confinato con spessore medio di 13,6 m; esistono inoltre due fiumi in contatto idraulico con l'acquifero che costituiscono due limiti di ricarica e permettono il raggiungimento dell'equilibrio dopo un tempo di pompaggio relativamente breve (6 ore).

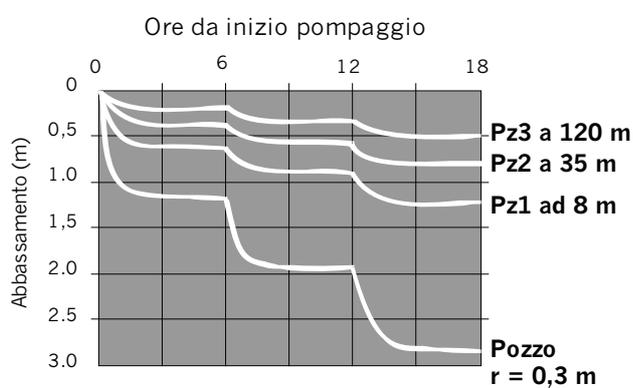


Figura 10. Abbassamenti al termine di ogni gradino

Q1 = 10 lt/s;  
Q2 = 15 lt/s;  
Q3 = 20 lt/s

Nella figura 10 è riportato il grafico che mostra gli abbassamenti al termine di ogni gradino sia per i piezometri che per il pozzo.

Se ora riportiamo su di un grafico semilog gli abbassamenti e le distanze progressive da PW, otteniamo la figura 11.

Si può vedere che l'abbassamento nel pozzo, per i tre valori di portata, non è situato sul prolungamento delle tre rette ricavabili dai piezometri; nel pozzo, che a differenza dei piezometri è dotato di pompa, si verifica un ulteriore abbassamento dovuto alle perdite di carico che si somma a quello dell'acquifero.

Secondo Jacob l'abbassamento complessivo nel pozzo ( $\Delta s_1, \Delta s_2, \Delta s_3$ , in fig. 11) è scomponibile in due: il primo dovuto all'acquifero ed il secondo all'opera. L'equazione che lo rappresenta è:

$$(6) \quad s = BQ + CQ^2$$

(B = coefficiente per le perdite lineari; C = coefficiente per le perdite quadratiche)

Dato che al termine di ogni gradino è stato raggiunto l'equilibrio, la prova permette di ricavare la trasmissivi-

ABBASSAMENTO in m				
	Pozzo	Pz1	Pz2	PZ3
PRIMO GRADINO	1,1	0,54	0,32	0,17
SECONDO GRADINO	1,84	0,8	0,48	0,24
TERZO GRADINO	2,72	1,08	0,65	0,33

ABBASSAMENTO SPECIFICO s/Q (m/mc/s)				
	Pozzo	Pz1	Pz2	PZ3
PRIMO GRADINO	110	54	32	17
SECONDO GRADINO	123	53	32	16
TERZO GRADINO	136	54	32,5	16,5

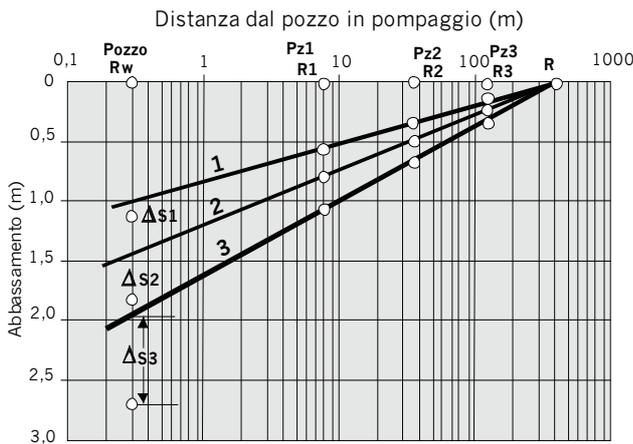


Figura 11- Grafico abbassamento (scala lineare) distanza (scala log), nel pozzo e nei tre piezometri, al termine di ogni gradino di portata di 6 ore ciascuno.

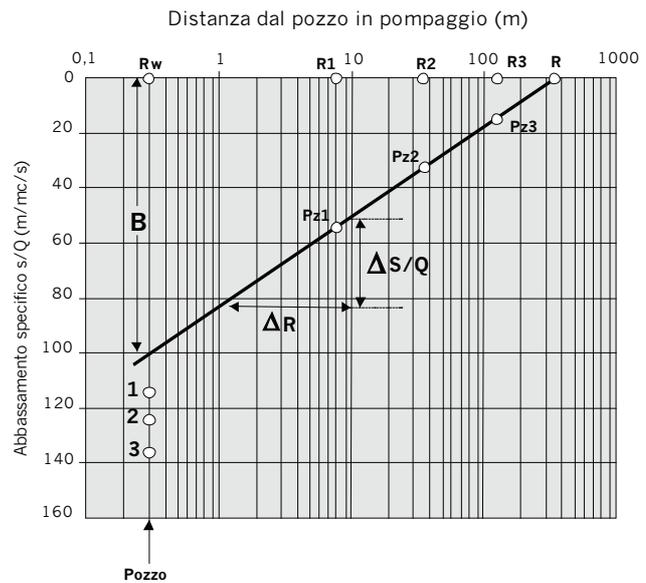


Figura 12. Grafico abbassamento specifico (scala lineare) distanza (scala log) nel pozzo e nei tre piezometri, al termine di ogni gradino di portata di 6 ore ciascuno.

tà, con la formula di Thiem, ed il raggio d'azione, per via grafica (fig. 11).

$$(7) T = \frac{0,366 Q}{(s_1 - s_2)} \log r_2 / r_1$$

(se l'abbassamento è preso in un ciclo logaritmico,  $\log r_2 / r_1 = 1$ )

Gli abbassamenti devono riferirsi ai soli piezometri, dato che quelli del pozzo sono modificati dalle perdite di carico.

Se ora utilizziamo l'equazione di Thiem dividendo ciascun abbassamento per la portata corrispondente, otteniamo:

$$(8) s/Q = \frac{0,366}{T} \log r_2 / r_1$$

(se l'abbassamento è preso in un ciclo logaritmico,  $\log r_2 / r_1 = 1$ )

Anche questa relazione permette di calcolare la trasmis-

sività, col vantaggio di mediare gli abbassamenti nei tre piezometri, e quindi:

$$(9) T = 0,366 / (\Delta s/Q)$$

In fig. 14 si può vedere come i rapporti  $s/Q$  per i tre piezometri siano simili, pur variando la portata, lo stesso non succede per il pozzo che mostra valori maggiori all'aumento di  $Q$  (fig. 11).

Come per la fig. 11, anche per la fig. 12 il raggio di azione si ricava graficamente.

Ritornando ora all'equazione (4), per ricavare i due coefficienti  $B$  e  $C$  è sufficiente costruire il grafico in fig. 13, dove  $B$  è l'ordinata del punto di intersezione della retta interpolata, con l'asse verticale (per  $Q = 0$ ) e  $C$  è il coefficiente angolare della stessa retta.

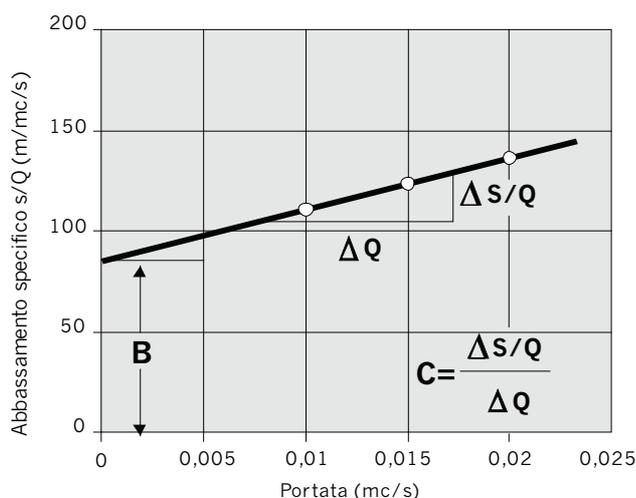


Figura 13. Grafico portata - abbassamento specifico per il pozzo di produzione, utilizzato per calcolare le componenti dell'abbassamento dovute al flusso lineare dell'acquifero e turbolento del pozzo; B = perdite di abbassamento lineari, C = perdite di abbassamento quadratiche; i valori di s/Q sono quelli in prima colonna della tabella di fig. 5.

Se effettuiamo la stessa operazione per i tre piezometri vediamo che, essendo nulle le perdite di carico, le tre rette sono orizzontali ( $C = 0$ ;  $B \neq 0$ ) ed inoltre, i coefficienti B per i piezometri, hanno valori simili nell'ambito dello stesso gradino.

Passiamo ora a valutare l'efficienza. Dalla fig. 15, è possibile ricavare la portata specifica per ogni gradino e notare come essa diminuisca all'aumentare della portata,

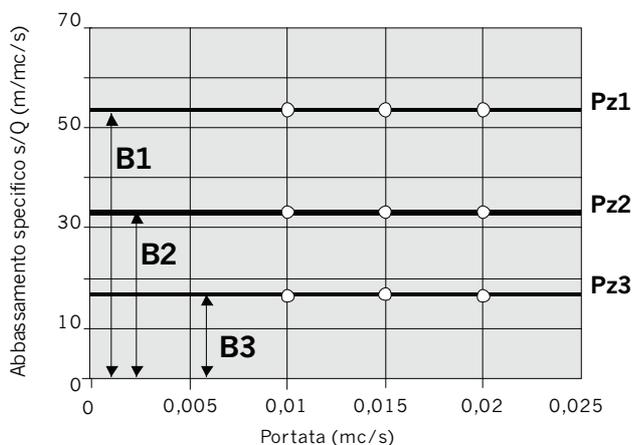


Figura 14. Grafico portata - abbassamento specifico per determinare il valore della componente lineare dell'abbassamento, dovuta all'acquifero nei tre piezometri (i valori B1-B2-B3 sono quelli della tabella in fig. 11).

passando da 0.009 a 0.008 e 0.007 m<sup>2</sup> /s.

Il calcolo del coefficiente C tramite il grafico di fig. 13, da:

$$C = 2000$$

che in base alla tabella di Walton definisce una situazione al limite tra il pozzo ben progettato e quello leggermente deteriorato.

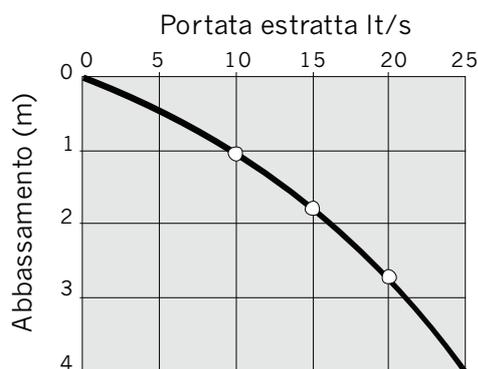


Figura 15. Grafico portata - abbassamento (curva caratteristica del pozzo); sono evidenziati gli abbassamenti al termine di ogni gradino di portata

Consideriamo ora l'equazione caratteristica di Jacob: l'efficienza è data dal rapporto percentuale tra abbassamento dovuto al solo acquifero ed abbassamento totale (acquifero + perdite di pozzo); l'esame della fig. 11 mostra, ad esempio, che per il primo gradino, l'abbassamento lineare è 0,98 m (prolungamento della retta degli abbassamenti dei tre piezometri) mentre l'abbassamento totale (comprese le perdite di carico) è 1,1 m, quindi:

$$WE = 100 \times 0,98 / 1,1 = 89,1 \%$$

Per calcolare l'efficienza del pozzo è sufficiente quindi separare i due diversi tipi di abbassamento che si verificano durante le prove, mediante le due equazioni:

$$s = BQ + CQ^2$$

$$(7) \quad T = \frac{0,366 Q}{(s_1 - s_2)} \log r_2 / r_1$$

(se l'abbassamento è preso in un ciclo logaritmico,  $\log r_2 / r_1 = 1$ )

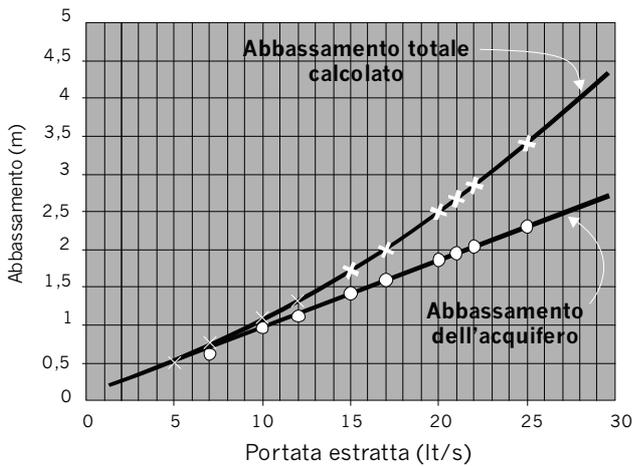


Figura 16. Curve di abbassamento per il pozzo calcolate per il solo acquifero (in basso) e totali (comprehensive dei moti turbolenti).

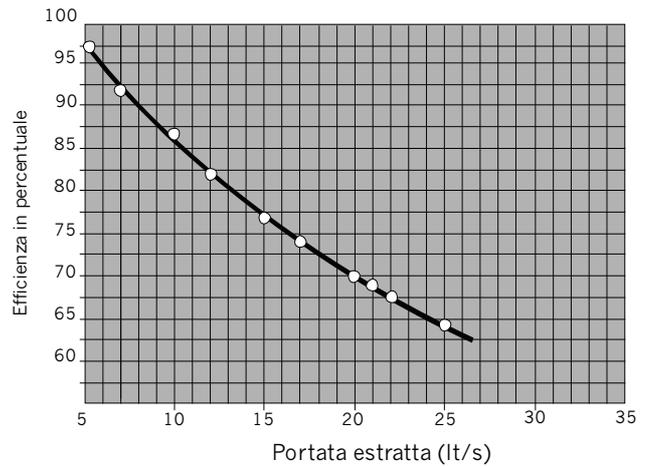


Figura 17. Diminuzione dell'efficienza del pozzo all'aumentare della portata estratta-

e costruire i due grafici in fig. 16-17

Dovendo decidere quale sarà la portata ottimale di un pozzo, l'analisi si può completare calcolando gli abbassamenti per una serie numerosa di portate in aumento, mediante l'equazione caratteristica (1 - 5) e costruendo il grafico di fig. 21, quindi si può passare a calcolare l'efficienza con l'equazione (8) e ricavando il grafico in fig. 22.

**Prova a gradini nel solo pozzo di produzione**

La prova a gradini è stata effettuata in un pozzo completo che filtra un acquifero artesianico. La tabella mostra le portate e gli abbassamenti corrispondenti, mentre dal grafico di fig. 18 in scala semilog (abbassamento - tempo) si nota come al termine di ogni gradino non si è raggiunta la pseudo stabilizzazione. Per ridurre gli errori, gli abbassamenti devono pertanto essere interpolati alla fine del gradino successivo.

Tempo minuti	Tempo secondi	Abbassamento metri	Portata mc/s	
480	28800	3.87	0.007	PRIMO GRADINO
960	57600	5.84	0.01	SECONDO GRADINO
1440	86400	7.84	0.013	TERZO GRADINO

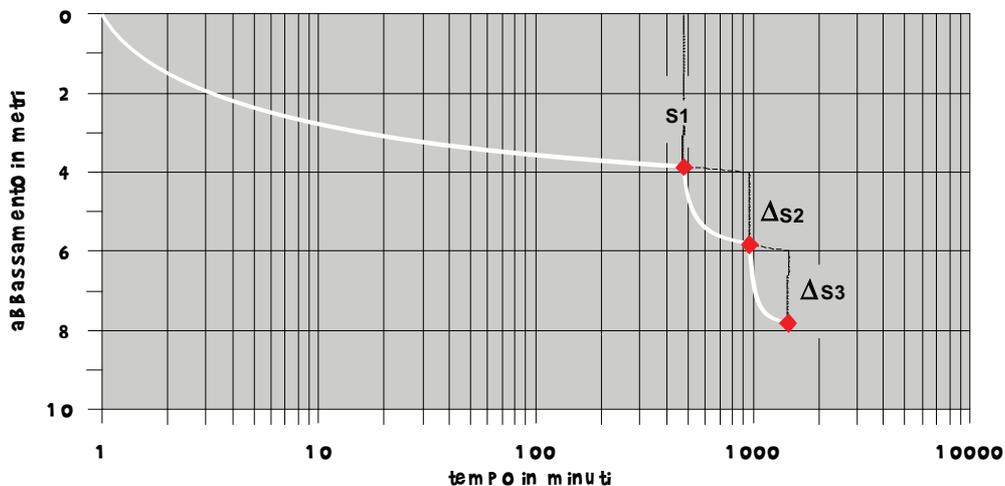


Figura 18. Calcolo degli abbassamenti interpolati durante la prova a gradini.

Abbassamento	Abbassamento interpolato metri	Portata mc/s	Abbassamento specifico non corretto m/mc/s	Abbassamento specifico corretto m/mc/s
3.87	3.87	0.007	552.9	552
5.84	5.7	0.01	584.0	570
7.84	7.56	0.013	603.1	581

Valori di abbassamento specifico, corretto e non.

Per ricavare i due coefficienti (B, C) costruiamo ora il grafico di fig. 19 che riporta i tre valori di Q ed i corrispondenti abbassamenti specifici corretti; a titolo di confronto, la linea a tratti è quella costruita con i valori non corretti.

L'equazione caratteristica del pozzo, diventa ora:

$$s = 520 Q + 4833 Q^2$$

(C = 29/0,006 sec<sup>2</sup> / m<sup>5</sup>)

il valore di C confrontato con la Tabella 2 (Walton) indica che il pozzo necessita di un maggiore sviluppo per migliorarne la resa produttiva.

### Curve Abbassamento specifico - portata

Normalmente le curve che si ottengono costruendo i diagrammi portata/abbassamento specifico sono del tipo in fig. 20.

- La retta n. 1 rappresenta la situazione classica

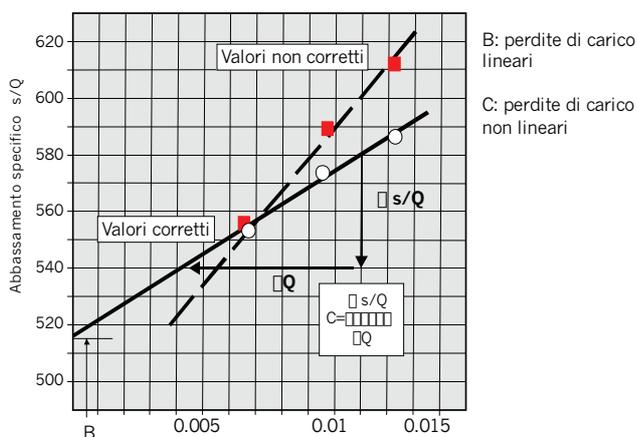


Figura 19. Grafico abbassamento specifico – portata, utilizzato per ricavare i due coefficienti B, C; la curva a tratteggio è quella ottenuta utilizzando gli abbassamenti non corretti.

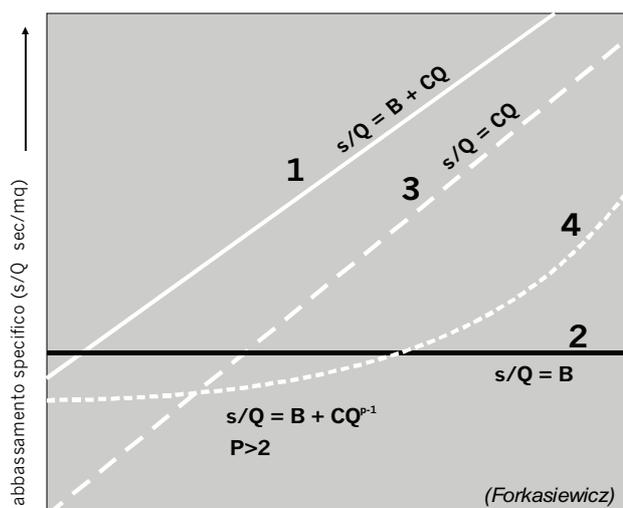


Figura 20. Esempi teorici di curve abbassamento specifico/portata.

dell'equazione di Jacob:  $sw = B(re,t) Q + CQ^2$ .

- La retta n. 2 parallela alle ascisse, indica deflusso laminare con perdite di carico quadratiche nulle ( $CQ^2 = 0$ , essendo  $tg\theta^\circ = 0$ ).
- La retta n.3, passante per l'origine degli assi, indica che sono trascurabili le perdite lineari e sono predominanti quelle legate al regime turbolento ( $s = CQ^2$ ).
- La retta n. 4 indica che è valida l'espressione:  $s = B(re,t) + CQ^p$  con  $n > 2$

Andamenti diversi delle curve possono indicare eterogeneità dell'acquifero o prove eseguite in modo non corretto.

### Esempi di sviluppo di pozzi

Le figure seguenti illustrano le varie situazioni che si possono presentare una volta costruito il grafico caratteristico, con un breve commento.

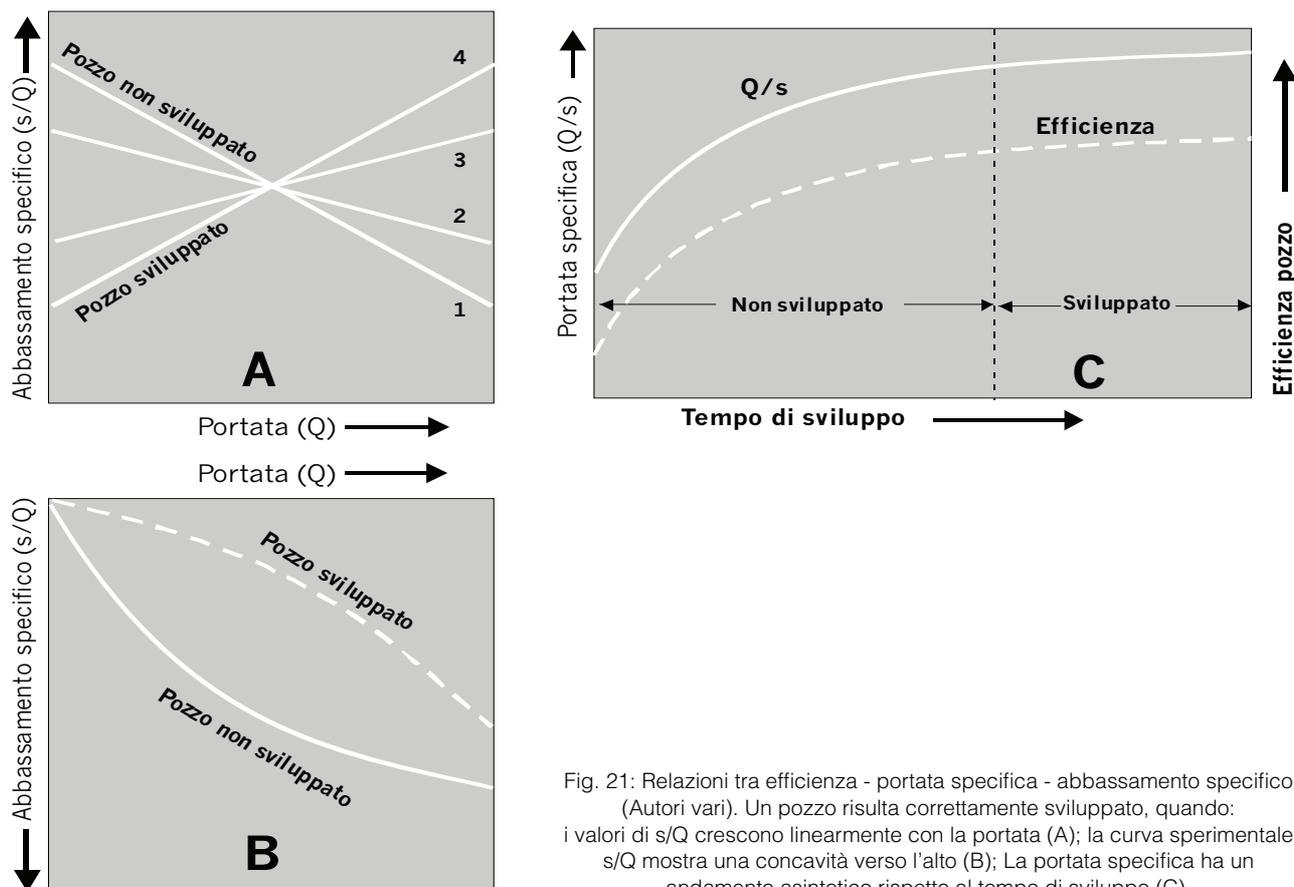


Fig. 21: Relazioni tra efficienza - portata specifica - abbassamento specifico (Autori vari). Un pozzo risulta correttamente sviluppato, quando: i valori di  $s/Q$  crescono linearmente con la portata (A); la curva sperimentale  $s/Q$  mostra una concavità verso l'alto (B); La portata specifica ha un andamento asintotico rispetto al tempo di sviluppo (C).

**Formule approssimate per il calcolo della trasmissività**

Esistono numerose formule empiriche che permettono di valutare la trasmissività dalla portata specifica e per varie tipologie di acquifero, ne elenchiamo alcune per  $Q$  in mc/giorno,  $s$  in metri e  $T$  in mq/giorno:

Batu (1999)

$$T = 1,385 (Q/s) \text{ acquifero confinato}$$

$$T = 1,042 (Q/s) \text{ acquifero freatico}$$

Razack – Huntley (1991)

$$T = 15,3 (Q/s)0,67 \text{ acquifero alluvionale grossolano}$$

Mace (1997)

$$T = 0,76 (Q/s)1,08 \text{ acquifero carsico confinato}$$

Huntley (1992)

$$T = 0,12 (Q/s)1,18 \text{ acquifero fratturato}$$

In tutte queste applicazioni è importante sottolineare che i valori ottenuti sono indicativi e la loro accuratezza diminuisce se il pozzo non è efficiente.

**Bibliografia**

Bierschenk, W.H. 1964. *Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests*. In. Ass. of Scientific Hydrology, publ. 64

Birsoy, Summers 1980. *Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumpign data*. Ground Water , v.18, n. 2

Clark, 1977. *The analysis and planning of stepdrawdown tests*. Quarterly Journal of Engineering Geology. V. 10

Custodio E., Llamas M.R., 2005. *Idrologia Sotterranea* (vol. 1). Flacovio editore

Ghezzi, 1993. *Prove di portata e definizione dei parametri quantitativi dei pozzi e degli acquiferi, Metodi di esecuzione e di interpretazione*. Ordine Geologi Toscana, Corso di Aggiornamento

Kasenow, 1999. *Analysis and design of step-drawdown tests*. Water res. Publ. LLC, Highlands Ranch Colorado

Krusemann, de Ridder, 1990. *Analysis and Evaluation of Pumping Tests Data*. ILRI, Publ. 47, Netherlands