

**Corso di Idrogeologia Applicata**  
*Dr Alessio Fileccia*

# **Prove in sito**

## **Le prove in pozzo ed a gradini** *(Step drawdown tests)*

Le immagini ed i testi rappresentano una sintesi, non esaustiva, dell'intero corso di Idrogeologia tenuto presso il Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine dell'Università di Trieste. Il programma completo prevede, oltre agli argomenti in elenco e per ogni capitolo, una serie di esercizi con applicazione delle formule analitiche, la descrizione di alcuni software specifici per geostatistica, prove di portata, modellistica ed un'uscita con prove pratiche in un campo pozzi. Le lezioni sono periodicamente aggiornate e controllate. Per una versione definitiva, informazioni, segnalazione di errori o commenti, rivolgersi a:

Dr Alessio Fileccia ([geofile@libero.it](mailto:geofile@libero.it))

Per scaricare l'intero corso: [www.disgam.units.it/didattica/insegnamenti-13.php](http://www.disgam.units.it/didattica/insegnamenti-13.php)

*(figure e foto sono dell'autore, se non diversamente specificato)*

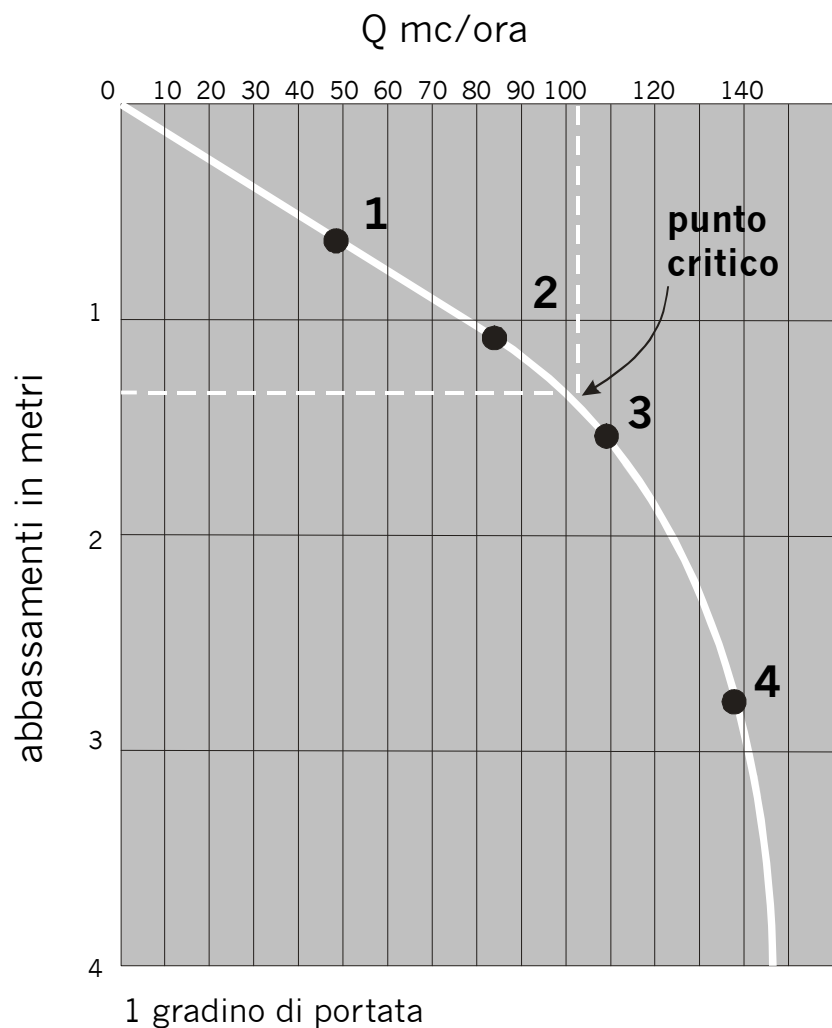
La prova in pozzo viene utilizzata principalmente per caratterizzare l'opera, valutando la sua efficienza in risposta alla potenzialità dell'acquifero

Si tratta di mettere in funzione la pompa con una o più portate, crescenti e per periodi uguali.

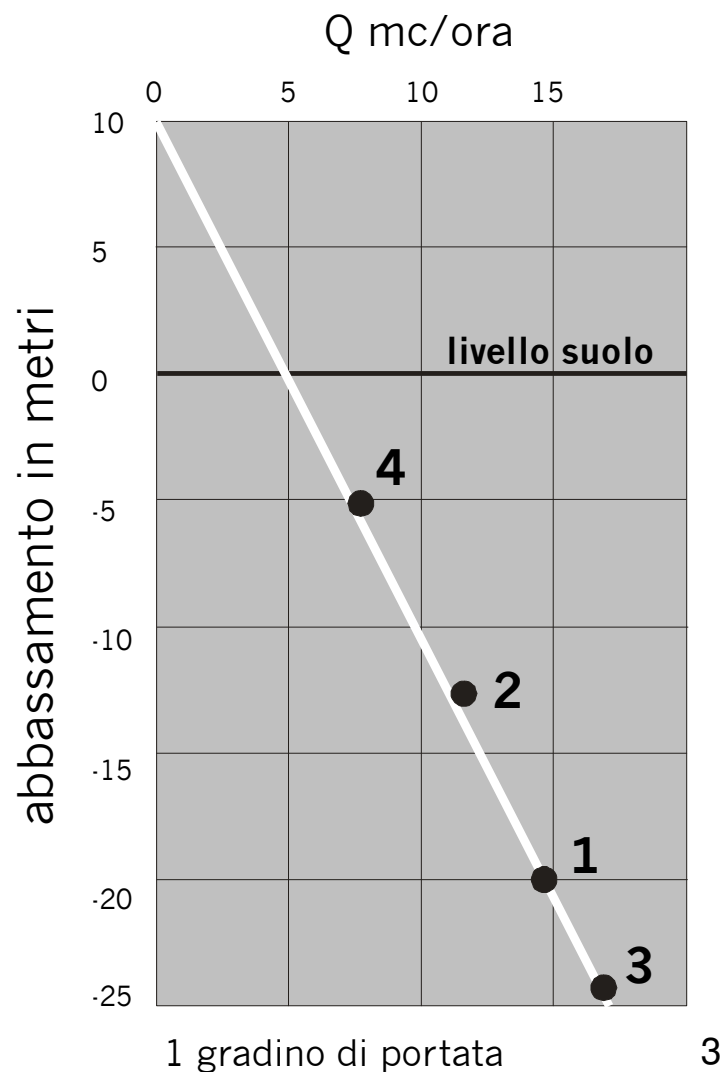
Al termine di ogni periodo stabilito si determina la **portata specifica**, cioè il rapporto tra portata ed abbassamento massimo registrato ( **$Q_s = Q/\Delta s$** ).

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.

## Curva caratteristica di un pozzo in falda freatica (Q variabile)

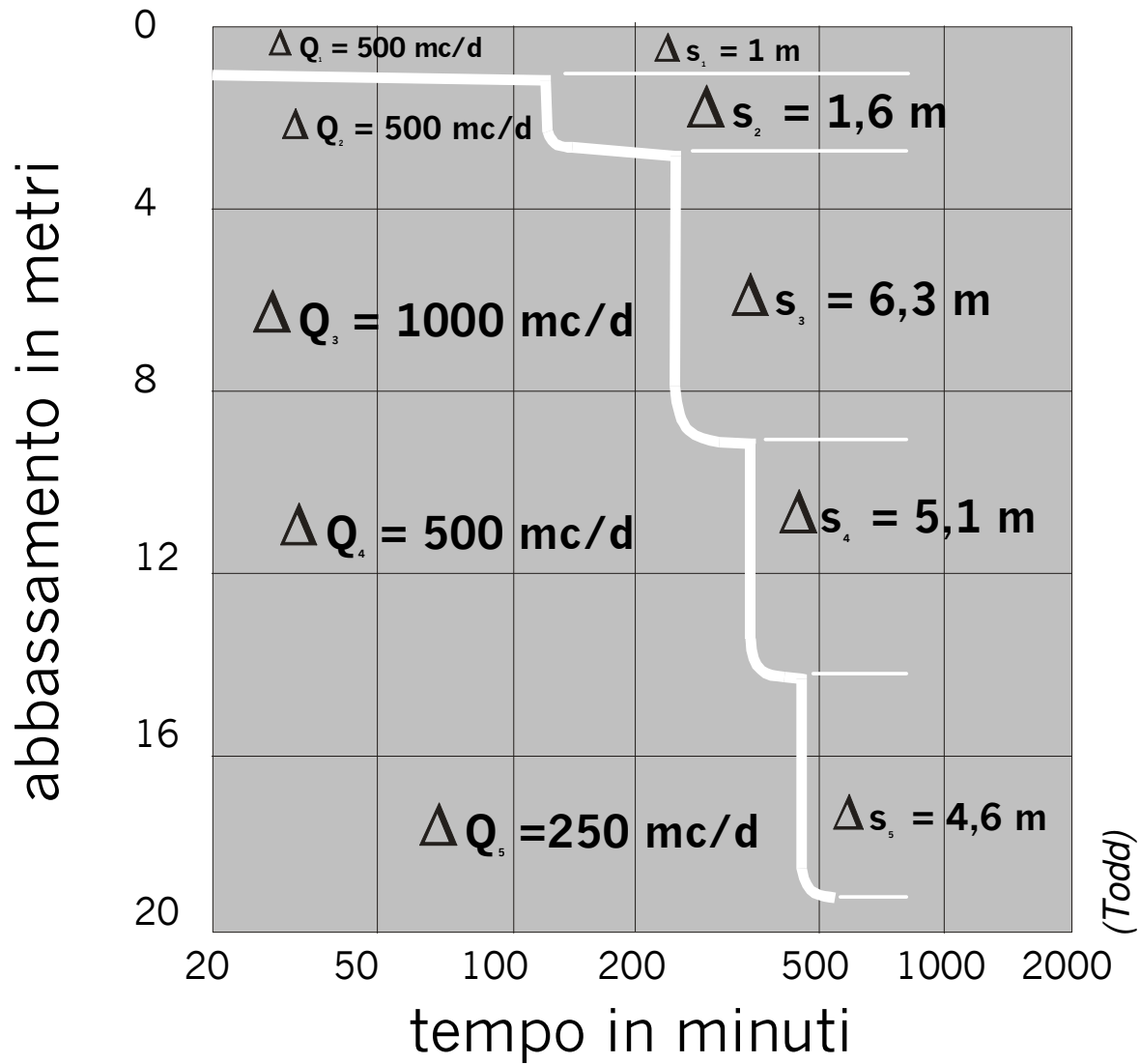


## Curva caratteristica di un pozzo in falda artesianiana (Q variabile)



(Idrogeologia: prove in sito)

## Curva di un pozzo durante una prova a gradini di portata



(Idrogeologia: prove in sito)

# Prova di portata a gradini

L'abbassamento di livello in un pozzo è funzione di due fattori principali:

Abbassamento causato dall'acquifero (lineare)

Abbassamento causato dalle perdite in pozzo (non lineare)

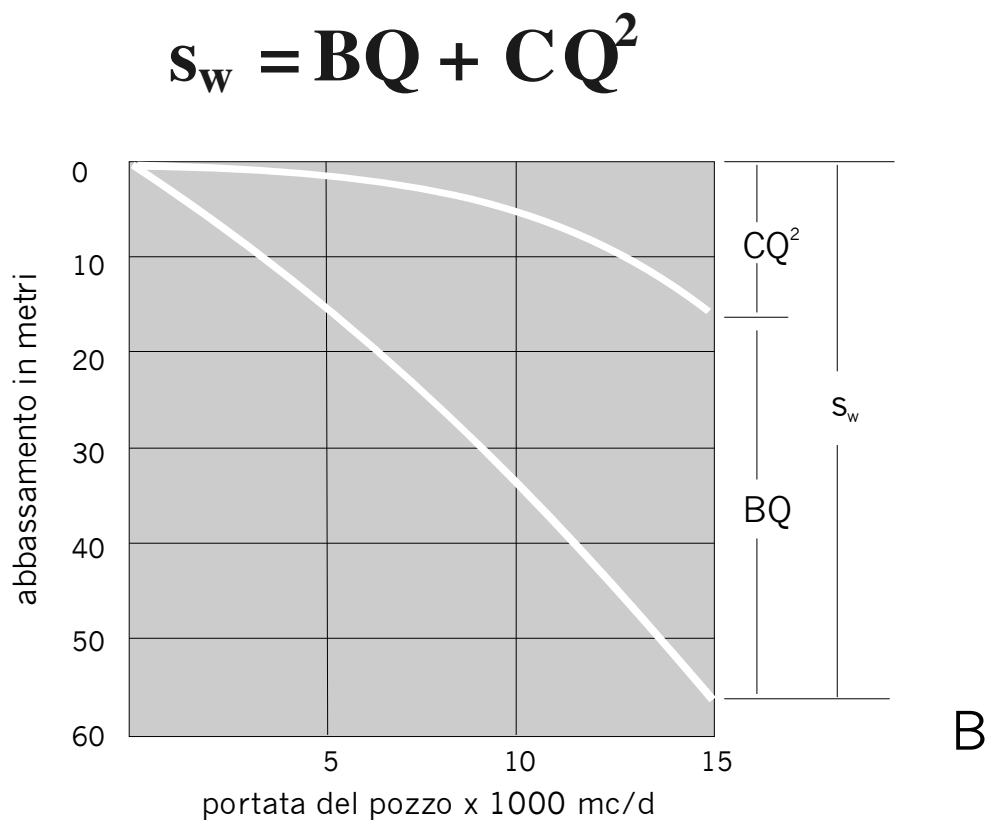
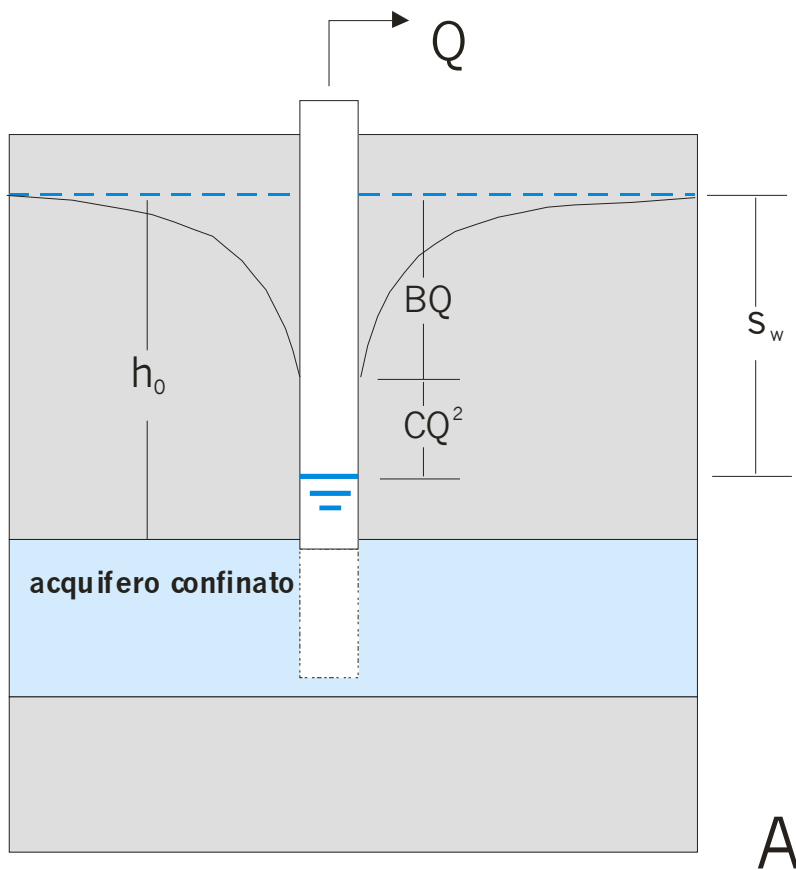
Il valore di  $s_w$  che noi misuriamo nel pozzo dipende, in prima approssimazione, da due fattori:

$$s_w = BQ + CQ^2$$

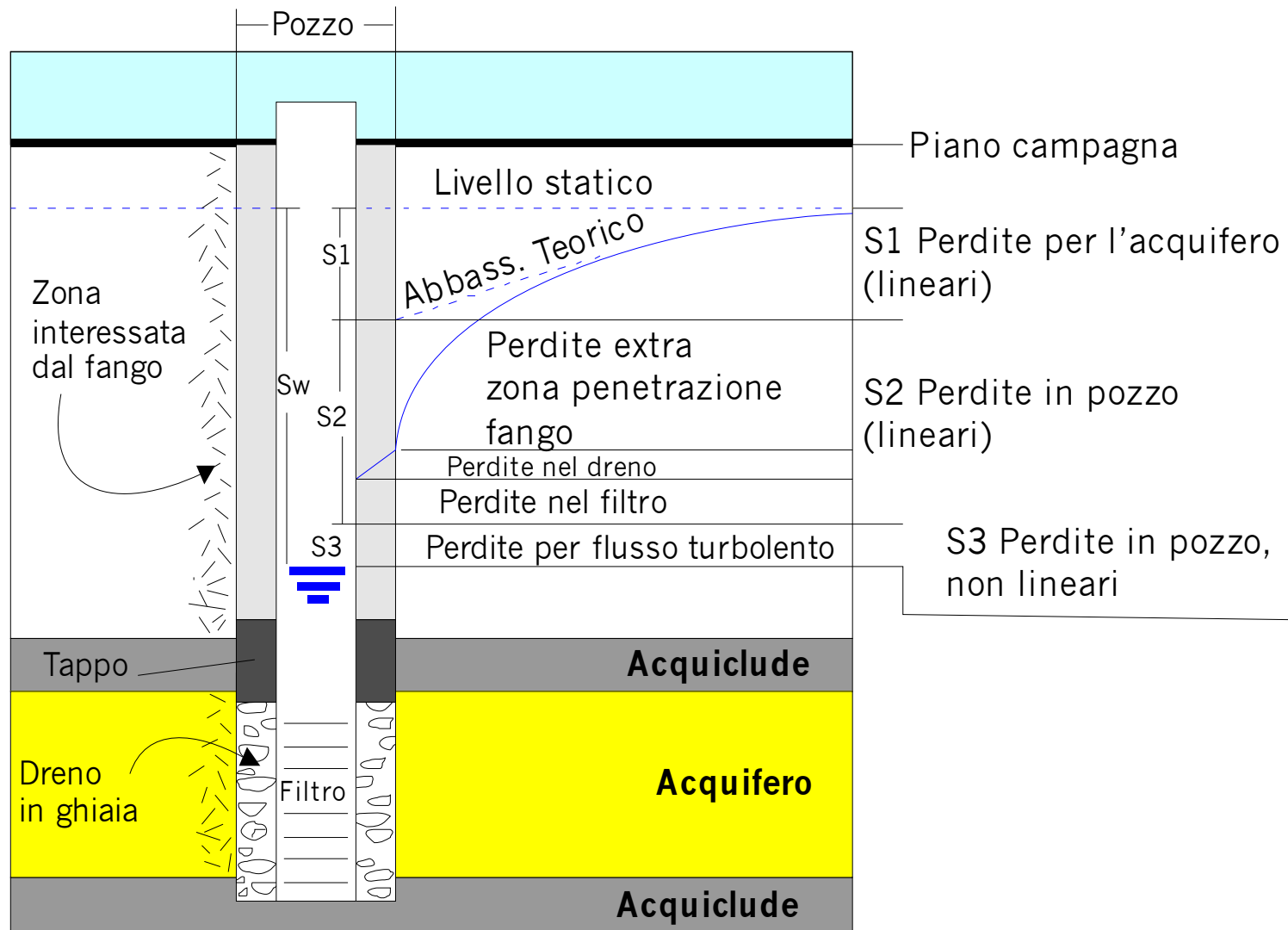
con  $BQ$  perdite di formazione e  $CQ^2$  perdite di pozzo (*Jacob*)



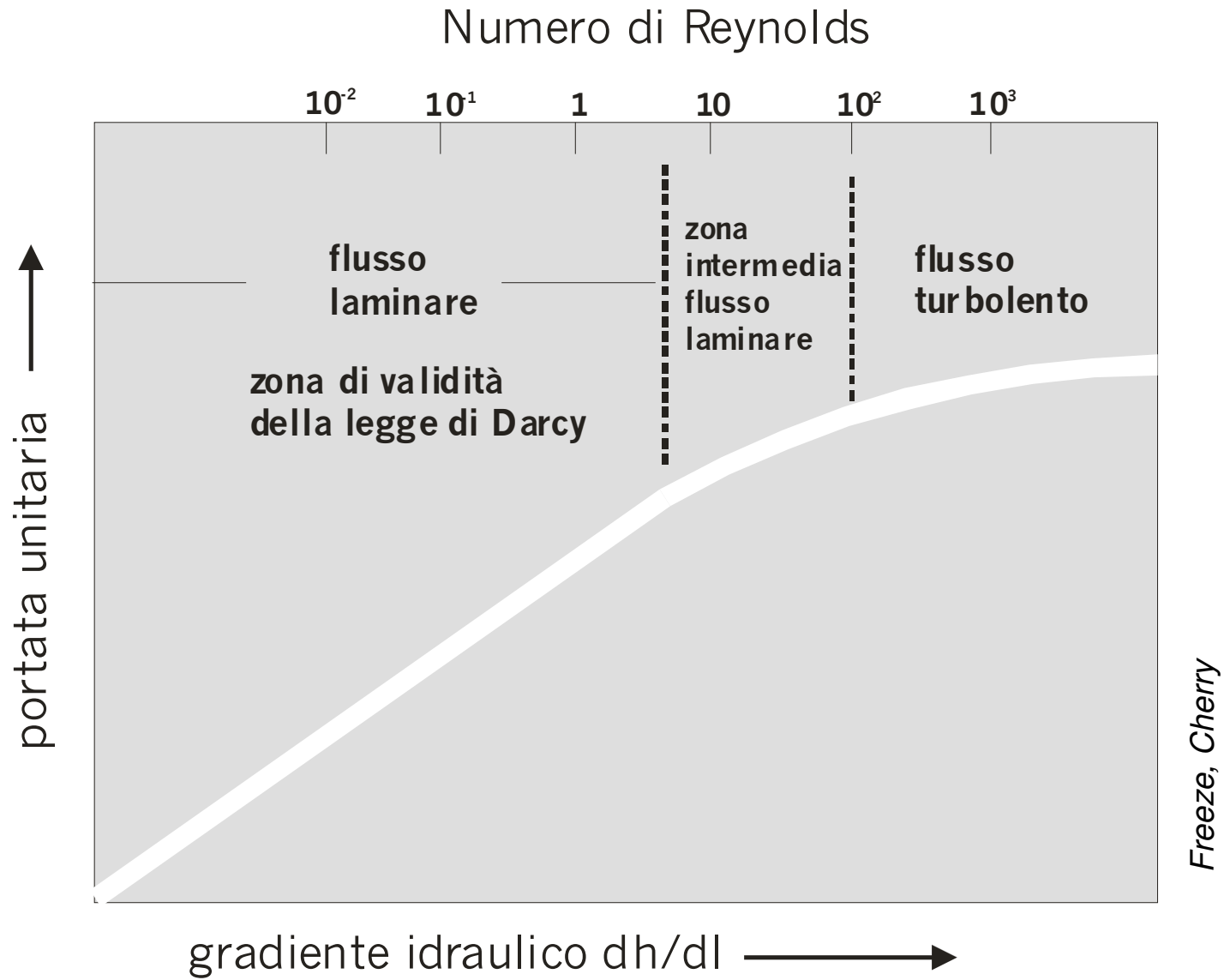
# Perdite totali in pozzo



# Le diverse perdite di carico in un pozzo in pompaggio



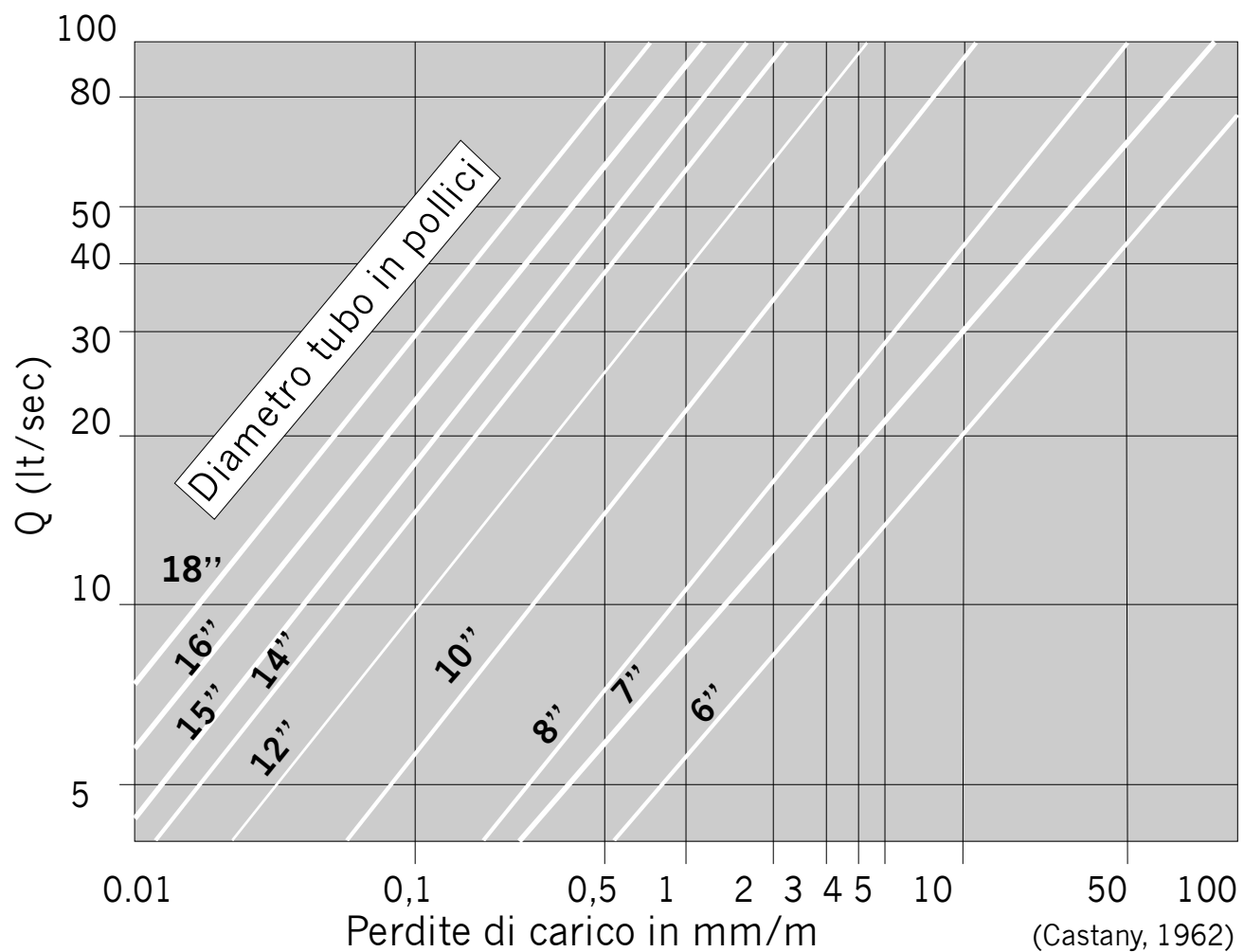
# Campo di applicazione della legge di Darcy



(Idrogeologia: parametri fondamentali)



## Relazione tra perdite di carico ed il diametro della tubazione della pompa



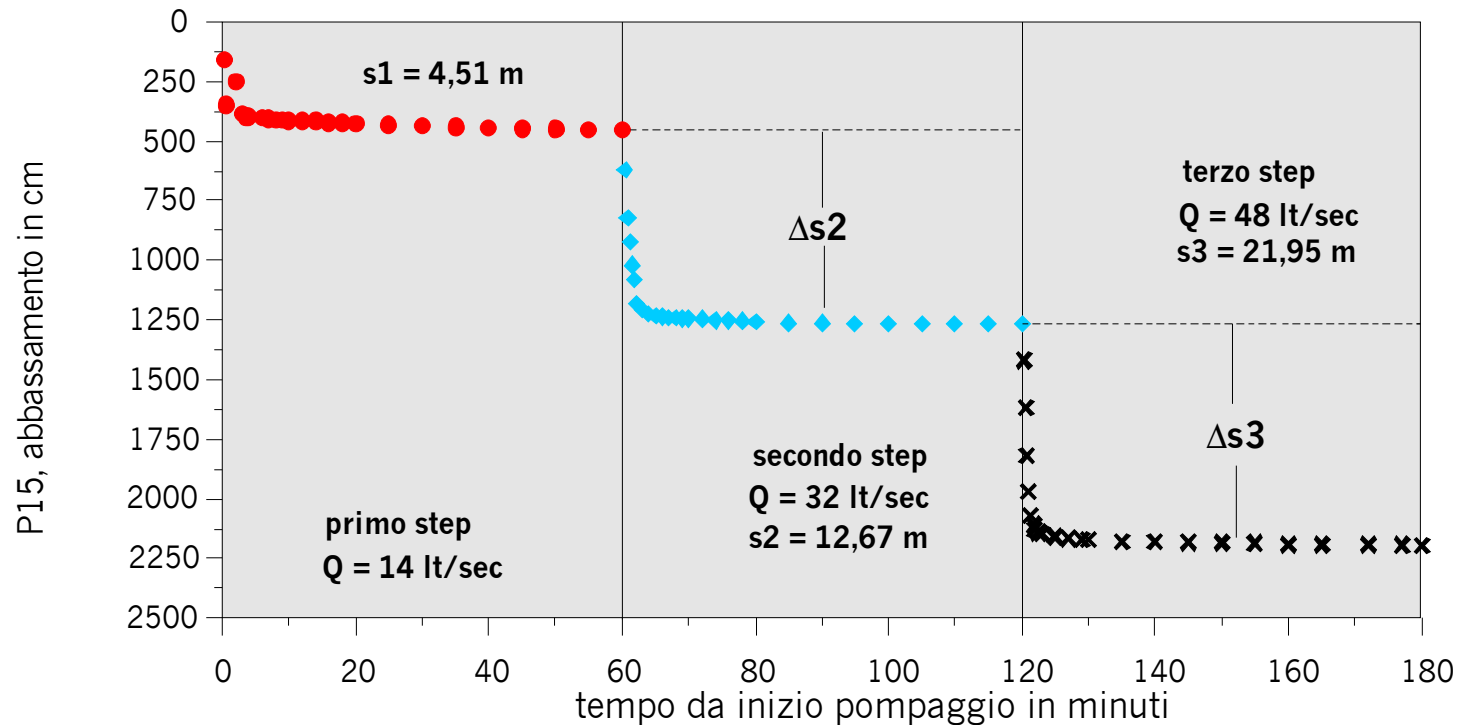
(Idrogeologia: prove in sito)

Aumentando il diametro del pozzo, la portata aumenta solo di poco, infatti facendo riferimento alle formule precedenti (Dupuit, Thiem, Jacob ecc,) se raddoppiamo il diametro, la portata aumenta solo di 1,12, come si può vedere dalla seguente tabella:

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

Aumentare il diametro serve comunque a ridurre le perdite di carico mantenendo un flusso più laminare in ingresso

## Prova a gradini di durata costante e con pseudostabilizzazione



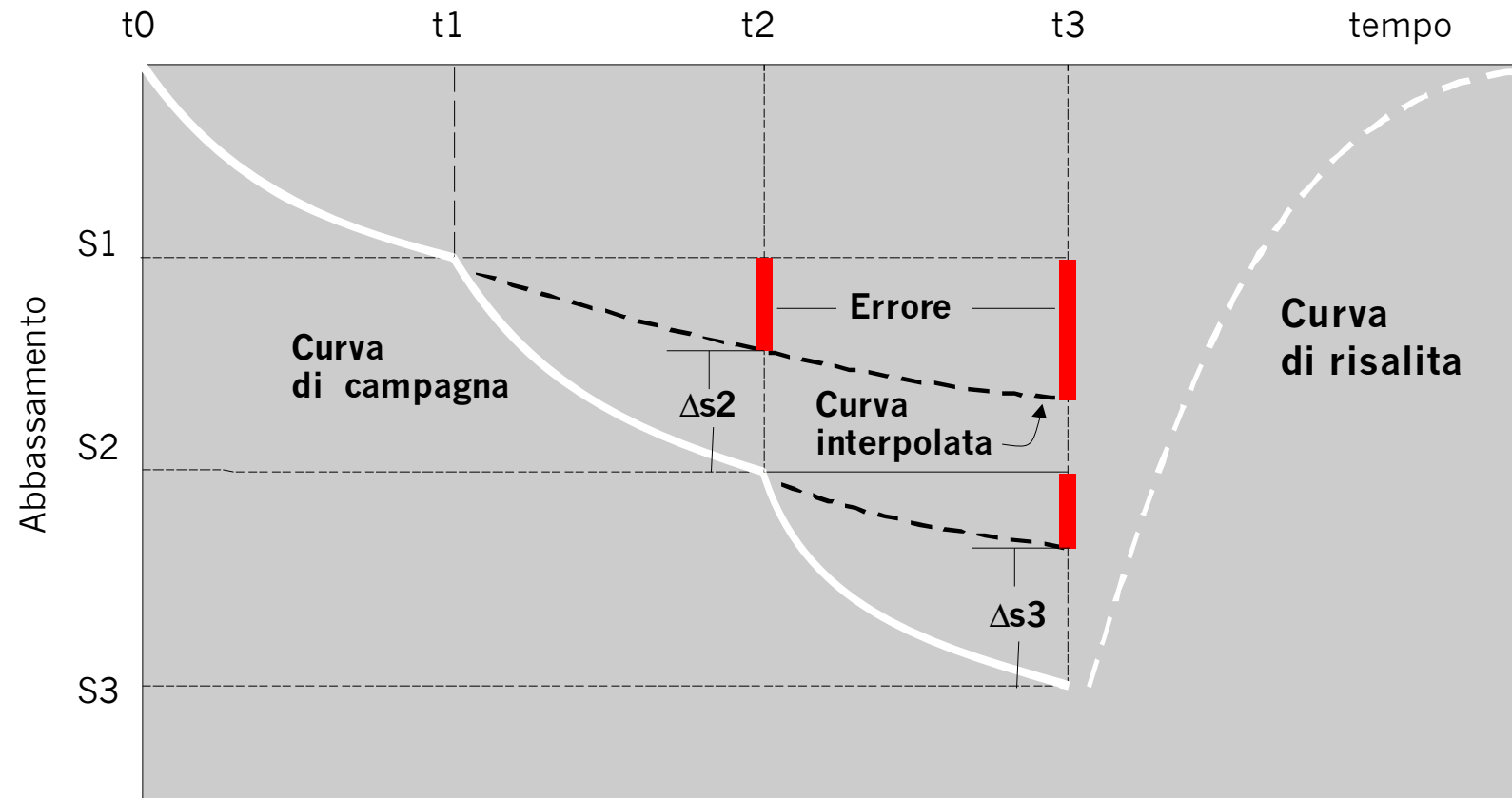
Se  $S_1$  è l'abbassamento con la prima portata  $Q_1$ , quello al secondo gradino è

$$S_2 = S_1 + \Delta S_2$$

ed al terzo gradino

$$S_3 = S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3$$

## Prova a gradini di durata costante senza pseudostabilizzazione



Se alla fine del gradino la curva tende a scendere marcatamente, gli abbassamenti vanno scelti per estrapolazione.

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:

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

$s_w$  = abbassamento totale misurato in pozzo

$B(re,t)$  abbassamento lineare dovuto all'acquifero, ricavabile ad es. con il metodo di Thiem, Theis o Cooper - Jacob,  $CQ^2$  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:

$$(2) \quad B(re,t) = B_1 + B_2$$

$B_1$  = coefficiente lineare delle perdite di carico nell'acquifero

$B_2$  = 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.

L'abbassamento teorico al pozzo è:

$$(3) \quad s = (Q/2IT) \ln R/r_w$$

$R$  = raggio d'influenza;  $r_w$  = raggio del pozzo

Ponendo  $B = (1/2\pi T) \ln R/rw$

Si ottiene

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

L'equazione (3) mostra anche la relazione esistente tra portata e raggio del pozzo: la prima è inversamente proporzionale a  $\ln R/rw$ .

Questo significa che essendo  $R \gg rw$  l'aumento di portata che si può ottenere raddoppiando il raggio del pozzo è solo del 10% (vedi tabella precedente)

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 in 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:

$$(4) \quad s = B(re,t) + CQ^p$$

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

Nella pratica il valore di  $p=2$  è il più accettato.

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:

$$s_1 = BQ_1 + CQ_1^2$$

$$s_2 = BQ_2 + CQ_2^2$$

ecc.

oppure

$$s_1/Q_1 = B + CQ_1$$

$$s_2/Q_2 = B + CQ_2$$

ecc.

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

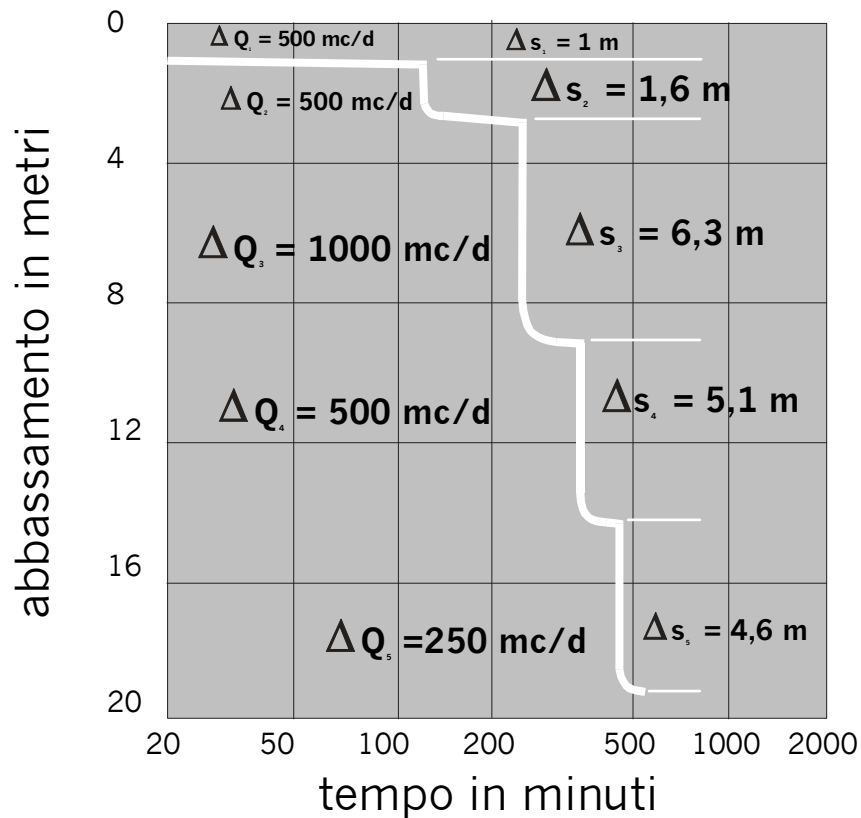
$$s/Q = B + CQ$$

(La diapositiva seguente mostra l'interpretazione nel caso in cui i vari gradini raggiungono una pseudostabilizzazione)



## Curva di un pozzo durante una prova a gradini di portata

(calcolo dell'efficienza, Todd)

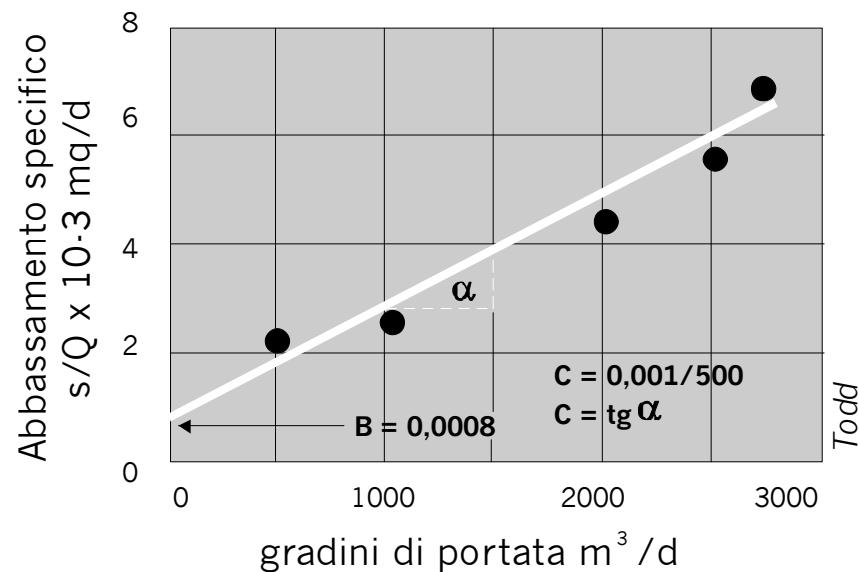


## Perdite in pozzo

(calcolo coefficienti B e C, Todd)

Perdite in pozzo

(calcolo coefficienti B e C)



## Relazioni tra perdite di carico e condizioni del pozzo

(Walton)

Coefficiente $C \text{ sec}^2/\text{m}^5$	Condizioni del pozzo
< 1800	Ben progettato e sviluppato
1800 – 3600	Leggero intasamento od invecchiamento
3600 – 14400	Grave intasamento od invecchiamento
> 14400	Difficile da recuperare ai valori iniziali

# Efficienza dell'opera

**Calcolo della portata specifica (Q/s)**

**Calcolo delle perdite di pozzo**

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

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

## **Calcolo della portata specifica (Q/s)**

Questo è un parametro molto generico e tende a diminuire per portate elevate; in molti casi è utile effettuare dei confronti a distanza di tempo (una diminuzione della portata specifica a distanza di anni e per le stesse portate, indica una progressiva riduzione di efficienza del pozzo)

## Calcolo delle perdite di pozzo (C)

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

<b>Coefficiente C <math>\text{sec}^2/\text{m}^5</math></b>	<b>Condizioni del pozzo</b>
< 1800	Ben progettato e sviluppato
1800 – 3600	Leggero intasamento od invecchiamento
3600 – 14400	Grave intasamento od invecchiamento
> 14400	Difficile da recuperare ai valori iniziali

# Calcolo dell'efficienza del pozzo (WE)

La formula più utilizzata è quella di Jacob:

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

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 B1, B2 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:

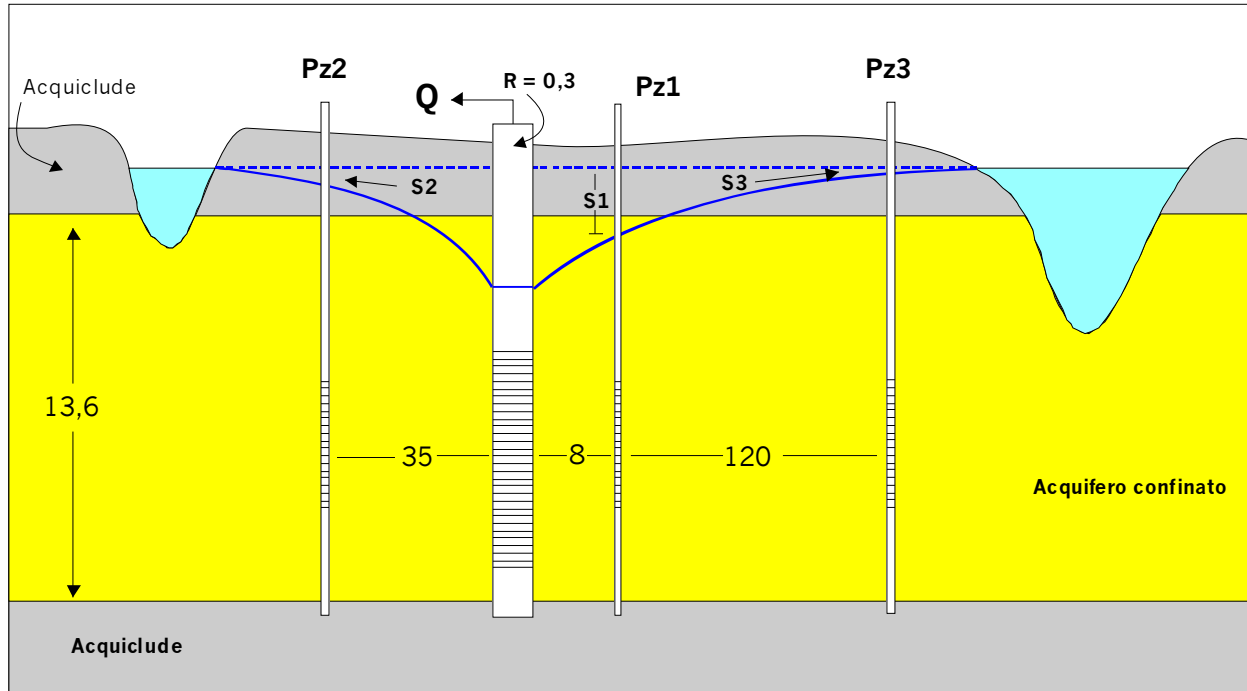
$$T.I. = 100 CQ^2 / s$$

(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 (Kresic, 1997)



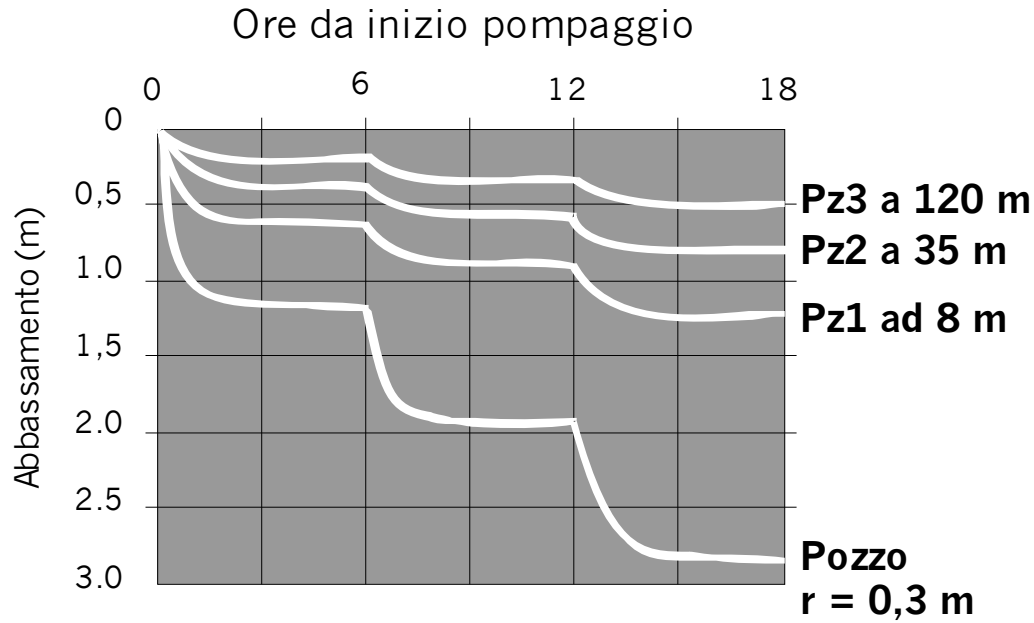
tre step di 6 ore  
a:

10 – 15 – 20 lt/s

Prova a gradini su acquifero confinato con piezometri

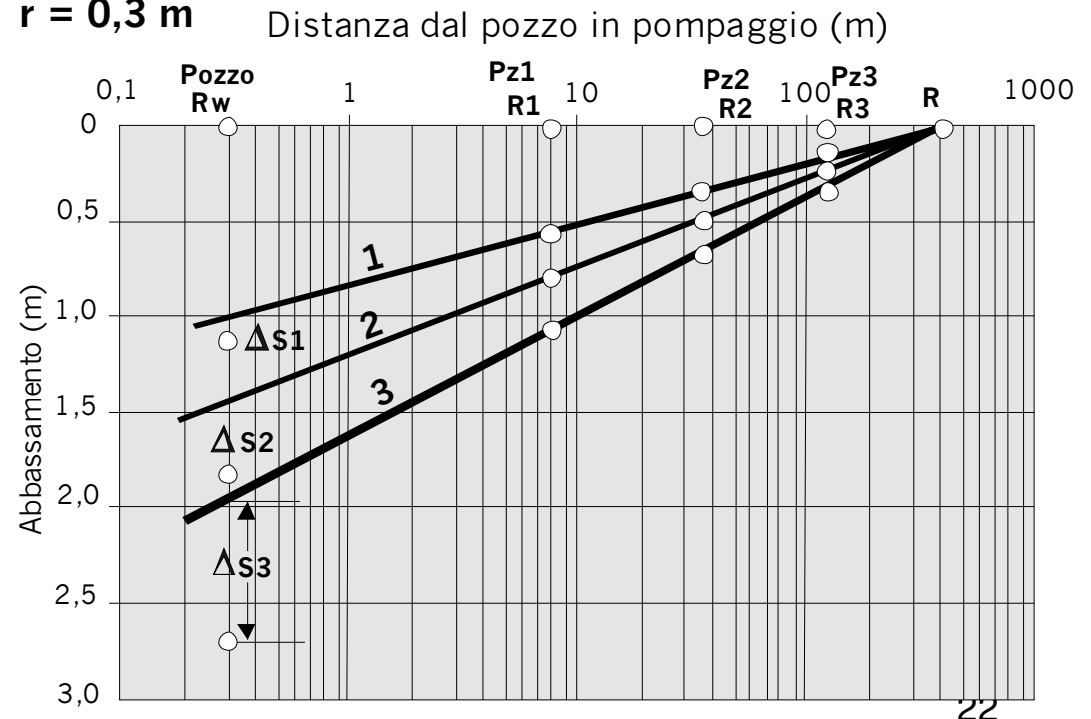
(Idrogeologia: prove in sito)

# Perdite di carico



	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

**Grafico abbassamento tempo per i tre step**



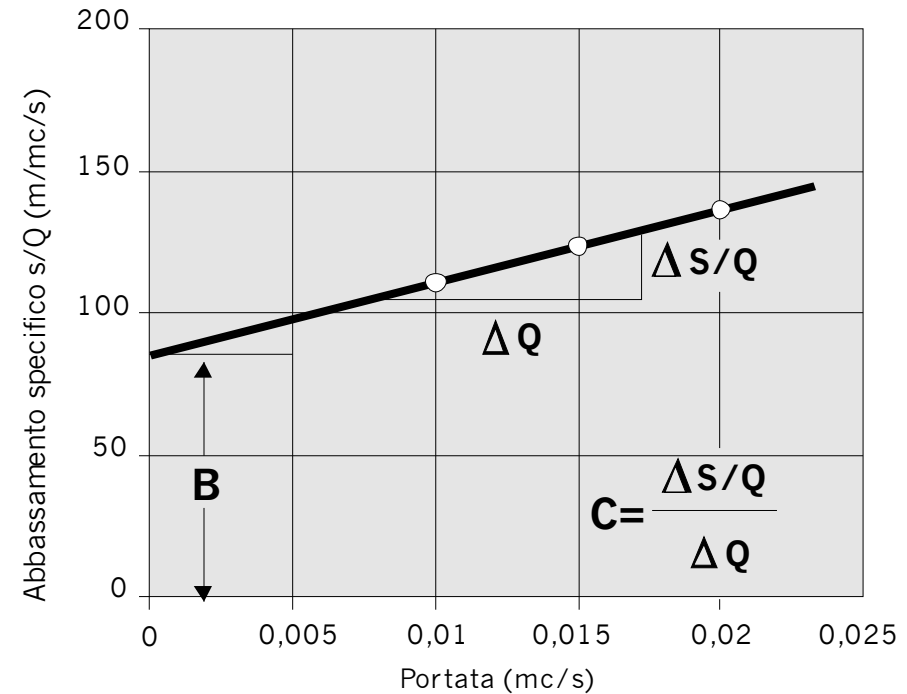
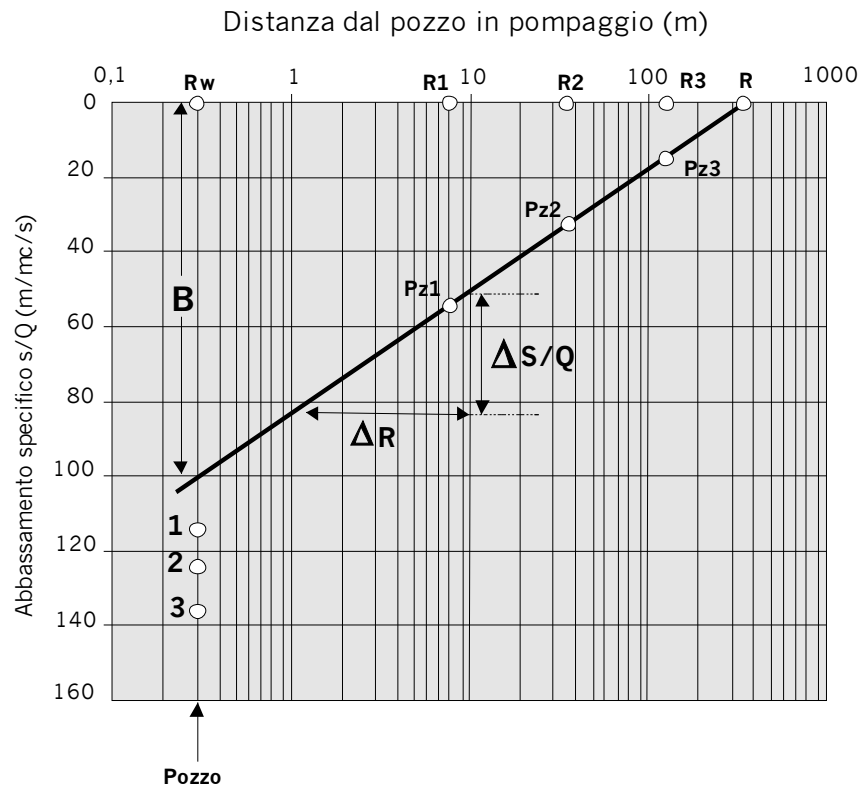
**Grafico abbassamento distanza per i tre step**

(Idrogeologia: prove in sito)



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

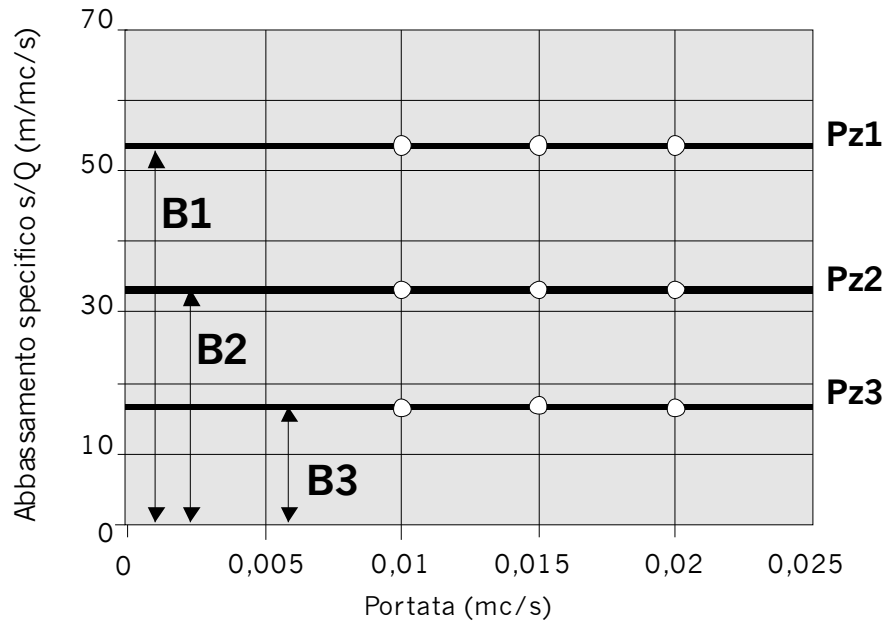
# Perdite di carico



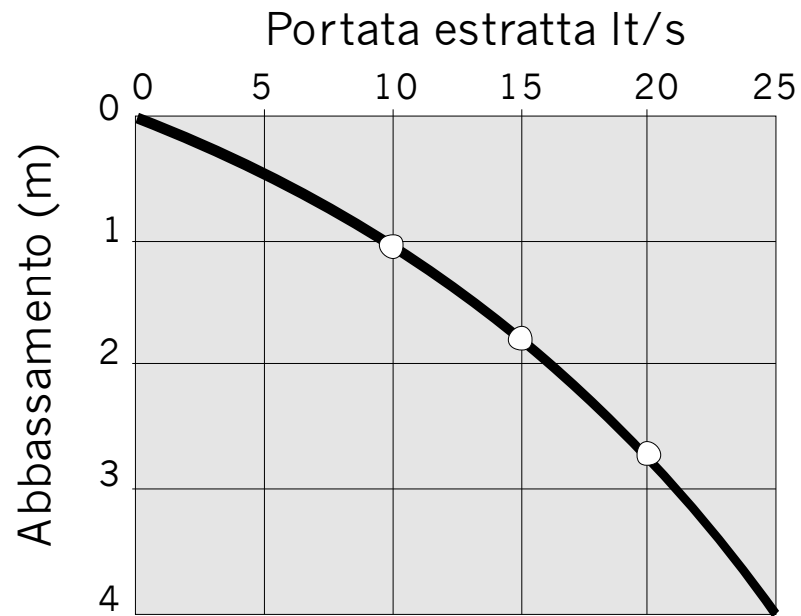
**Grafico abbassamento specifico – portate, per il calcolo dei coefficienti B, C**

**Grafico abbassamento specifico - distanza**

# Perdite di carico



# Portata specifica



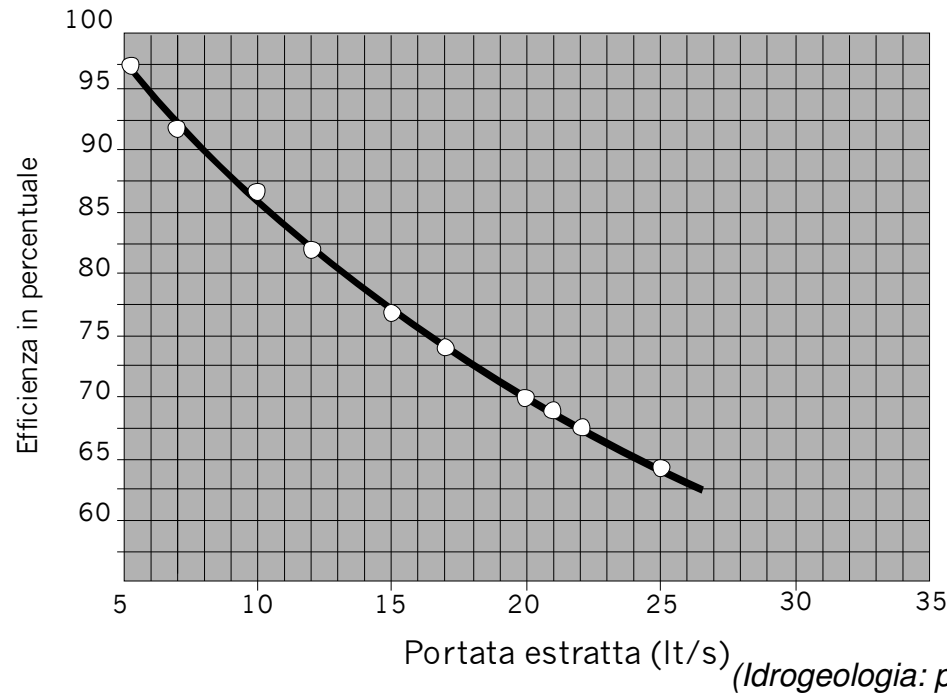
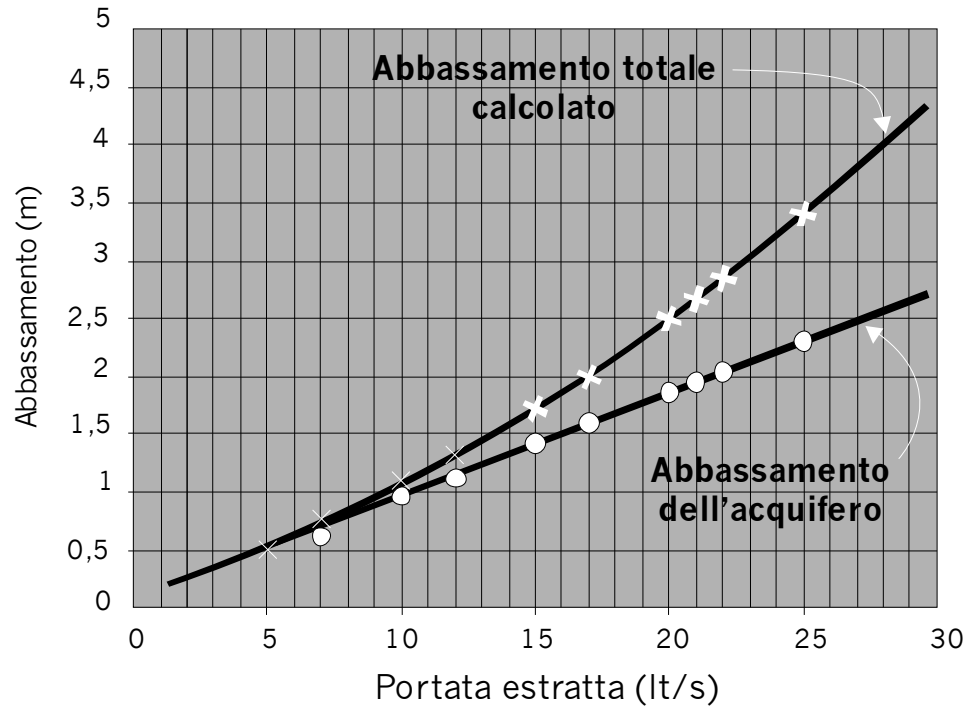
**Q / s**

*(Idrogeologia: prove in sito)*

# Efficienza del pozzo

$$s = BQ = 0,366 Q(\log R/r) / T$$

$$s = BQ + CQ^2$$

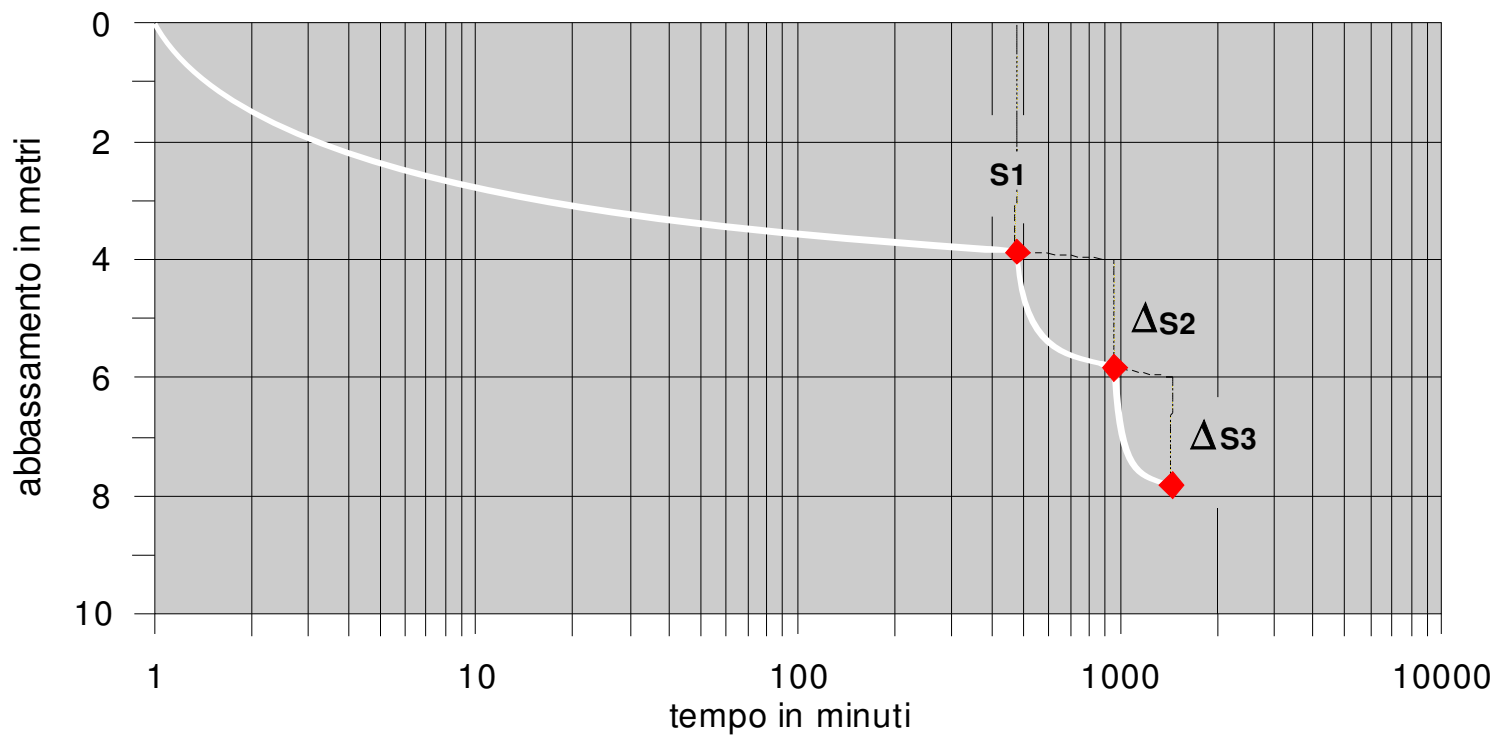


**abbassamento totale  
( $BQ + CQ^2$ )**

**abbassamento lineare  
( $BQ$ )**

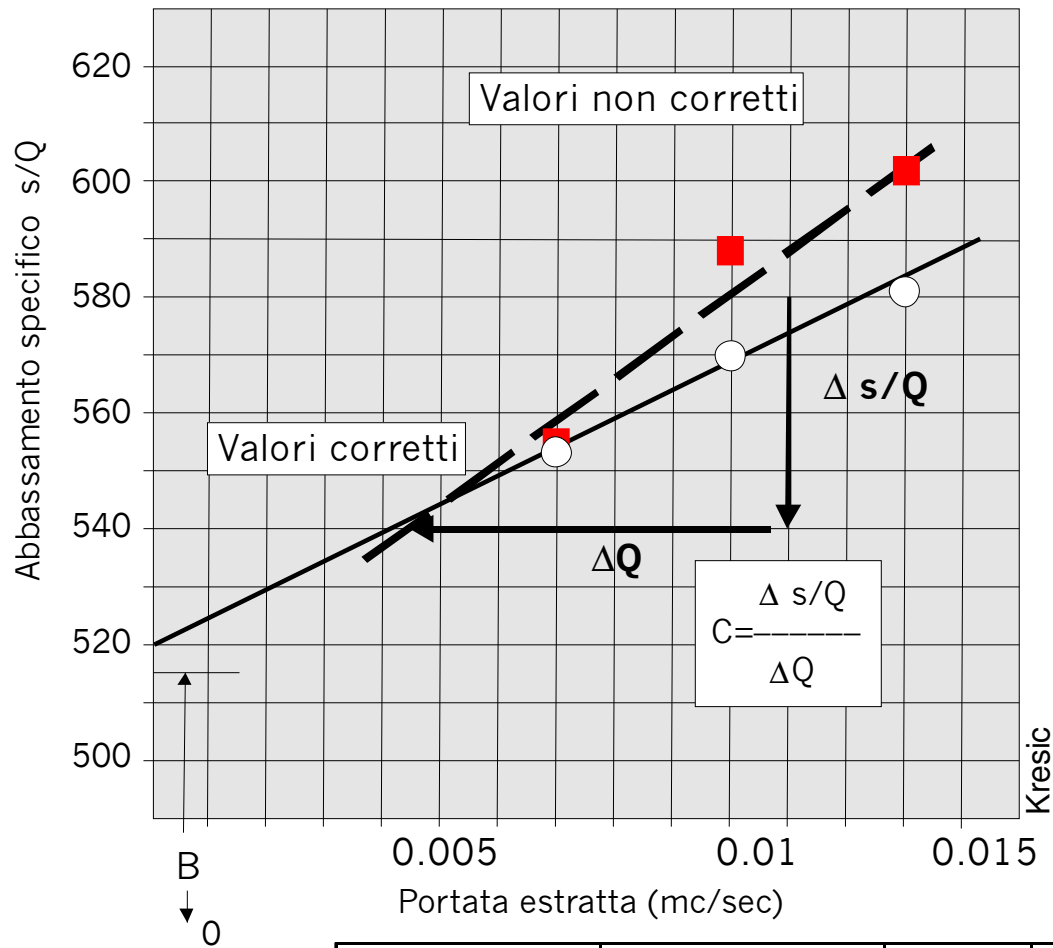
$$WE = 100 (BQ) / (BQ + CQ^2)$$

## Prova a gradini in unico pozzo su acquifero confinato



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

(Idrogeologia: prove in sito)



B: perdite di carico lineari

C: perdite di carico non lineari

Nella figura a lato è riportata l'interpretazione nel caso non sia raggiunta la pseudostabilizzazione alla fine di ogni gradino. La retta tratteggiata mostra l'errore che si sarebbe compiuto senza considerare gli abbassamenti non interpolati

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

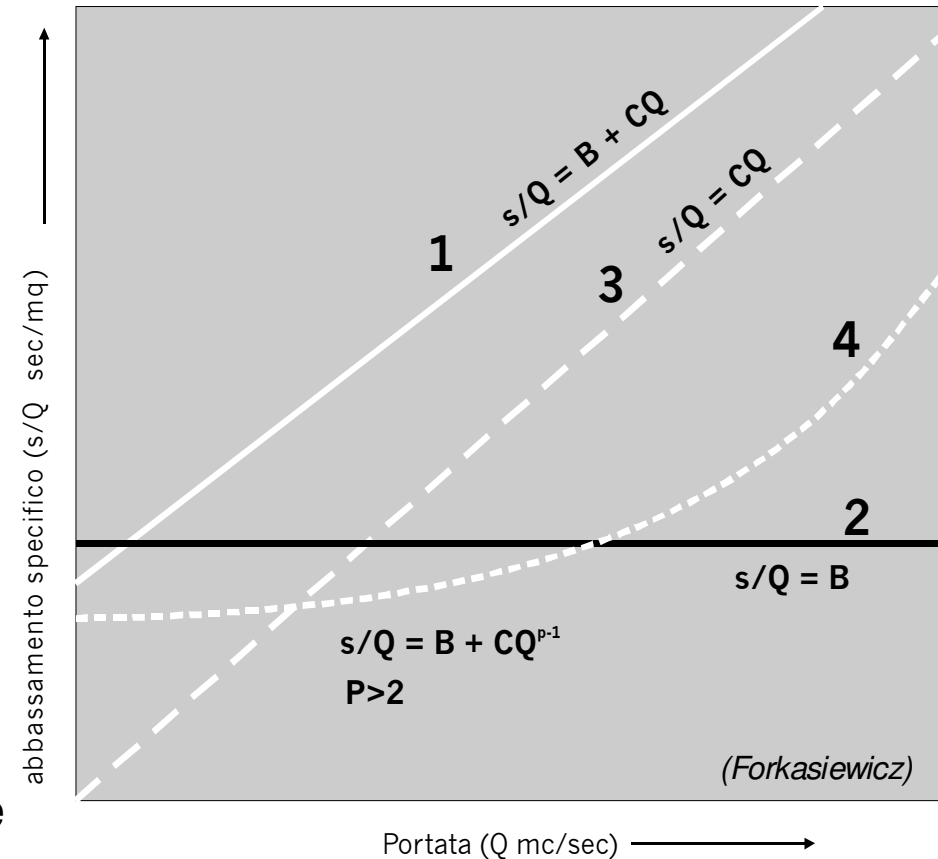
## Esempi teorici di curve Abbassamento specifico - portata

La retta n. 1 rappresenta la situazione classica dell'equazione di Jacob:  
 $sw = B(re,t) Q + CQ^2$  .

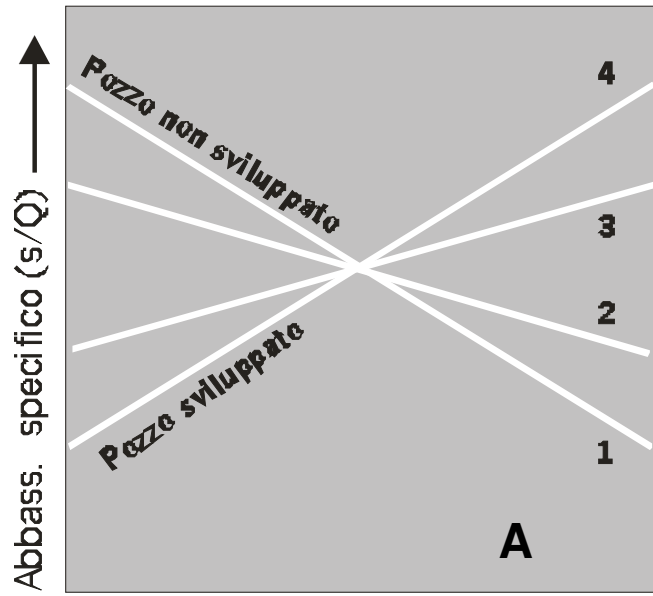
La retta n. 2 parallela alle ascisse, indica deflusso laminare con perdite di carico quadratiche nulle ( $CQ^2 = 0$ , essendo  $tg\theta = 0$ ).

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  
 $s = B(re,t) + CQ^n$  con  $n > 2$

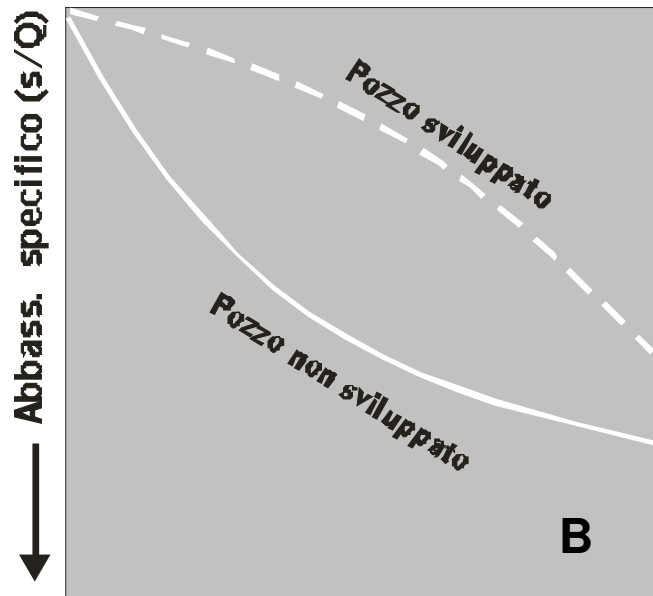


Andamenti diversi delle curve possono indicare eterogeneità dell'acquifero o prove eseguite in modo non corretto.



Portata (Q) →

Portata (Q) →

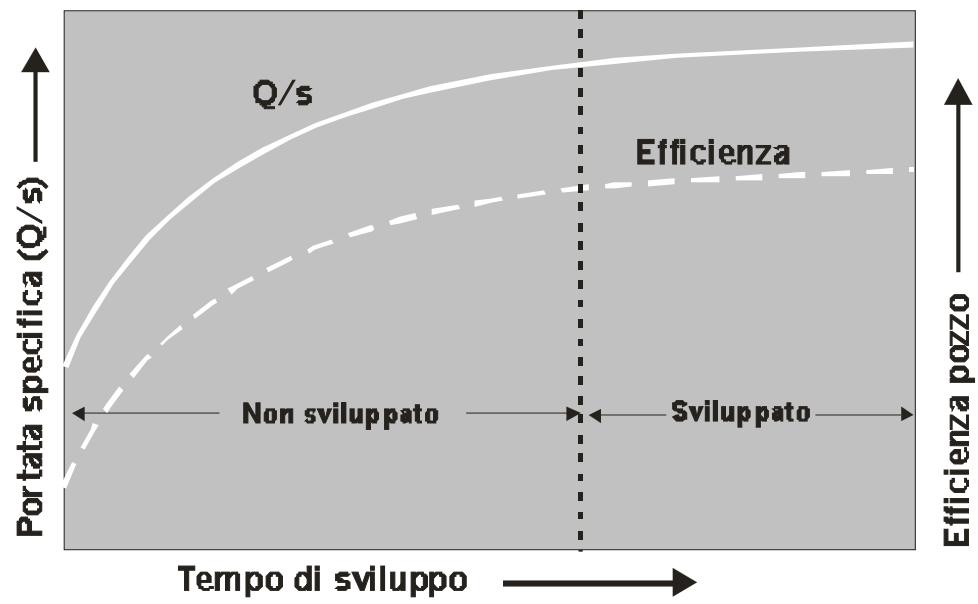


Un pozzo risulta correttamente sviluppato, quando:

A, i valori di  $s/Q$  crescono linearmente con la portata

B, la curva sperimentale  $s/Q - Q$  non ha una concavità verso l'alto

C, la portata specifica ha un andamento asintotico rispetto al tempo di sviluppo



**C**  
29

(Idrogeologia: prove in sito)



## Riassumendo

Per valutare le perdite in pozzo e quindi la sua corretta costruzione, si effettua una prova di portata a gradini, calcolando:

- L'abbassamento specifico  $s/Q$
- I coefficienti B e C
- L'efficienza  $E = BQ / BQ + CQ^2$

e costruendo i grafici a scala aritmetica:

- Tempo-abbassamento, per diversi gradini
- Abbassamento-portate
- Abbassamento specifico-portate

Il valore di E dovrebbe mantenersi al di sopra del 60% - 70%

Un altro parametro a volte utilizzato è il Turbulence index (Gorla, 2003)

$$T = (CQ^2 / s) 100$$

In questo caso a pozzi efficienti corrispondono valori T.i. bassi

# Alcune domande di ripasso

Cosa si intende per prova di permeabilità ? E slug test ?

Quali sono i vantaggi ed i limiti di queste prove ?

Elencate e descrivete alcune prove tipiche di permeabilità

Cos'è ed a cosa serve una prova a gradini ?

Perché si effettuano queste prove ?

Quali sono le condizioni da rispettare per effettuarle ?

Come calcoliamo la trasmissività da una prova a gradini ?

Cosa si intende per efficienza di un pozzo ?

E per perdite di carico ?

Come si valuta la corretta esecuzione di un pozzo per acqua ?