

# Corso di Idrogeologia Applicata

*Dr Alessio Fileccia*

## Prove in sito

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)*

## Prove in sito

Lo scopo delle prove è in genere quello di ricavare dei valori più attendibili di alcuni parametri idrogeologici o meglio di investigare delle porzioni di acquifero molto più estese di quello che sarebbe possibile con le analisi sui campioni raccolti nei sondaggi esplorativi. I parametri che normalmente sono ricercati con questo tipo di prove, sono:

- Trasmissività e conducibilità idraulica
- porosità ed immagazzinamento
- raggio di azione
- Velocità di flusso
- dispersività longitudinale e trasversale
- efficienza dei pozzi

normalmente si tratta di prove che richiedono molte ore, sono alquanto costose e pertanto, devono essere programmate con precisione. La conducibilità idraulica, uno dei parametri più ricercati, può essere ricavata con diversi test direttamente od indirettamente nel foro, mediante:

- diluizione di un tracciante in un pozzo (pozzo singolo, due pozzi, pozzo in pompaggio)
- prove in pozzetto (Lefranc, slug test, ecc.)
- prove di portata

# Obiettivi ricercati nelle prove in sito

Determinare le caratteristiche e tipologia degli acquiferi

Effettuare previsioni sul loro comportamento

Migliorare la progettazione delle opere di captazione

Valutare l'efficienza dell'opera

Valutare la vulnerabilità degli acquiferi e le velocità di propagazione di potenziali inquinanti

# Concetti e parametri fondamentali

**Costituiscono la base necessaria per programmare  
la metodologia ed ubicazione delle prove**

**Acquifero libero**

**Acquifero confinato**

**Acquifero semiconfinato**

**Acquitardo Acquicludo**

*(Idrogeologia: prove in sito)*

# Parametri fondamentali

Costituiscono la base necessaria per programmare  
la metodologia ed ubicazione delle prove

**Conducibilità idraulica**

**Trammissività**

**Porosità efficace**

**Coefficiente di immagazzinamento**

**Conduttanza**

**Resistenza idraulica**

**Fattore di fuga**

*(Idrogeologia: prove in sito)*

## **Conducibilità idraulica (K)**

Velocità con la quale un volume unitario di acquifero trasmette un fluido sotto un gradiente unitario (il flusso avviene lungo x,y,z; K è una grandezza in 3D (si ricava dalla legge di Darcy)

## **Trammissività (T)**

Velocità con la quale un prisma di base unitaria ed altezza pari a quella dell'acquifero, trasmette un fluido sotto un gradiente unitario (il flusso avviene lungo x,y; T è una grandezza in 2D;  $T=kb$ )

## **Coefficiente di immagazzinamento (S)**

Volume di acqua rilasciato da una colonna di acquifero di altezza uguale al suo spessore e sezione unitaria, per caduta piezometrica unitaria



## Conduttanza (Cv)

Utilizzato con gli acquiferi semiconfinati, caratterizza il flusso verticale attraverso lo strato ( $Cv = K/b$ )

## Resistenza idraulica (c)

Utilizzato con gli acquiferi semiconfinati, caratterizza la resistenza di un Acquitrando al flusso verticale ( $c = b/K$ )

## Fattore di fuga (B)

Anch'esso utilizzato con gli acquiferi semiconfinati, caratterizza la distribuzione spaziale della conduttanza attraverso un acquitrando

$$( B = \sqrt{Tc} )$$

Valori di B elevati indicano bassa conduttanza

# **Prove di maggiore uso**

**Prova di tracciamento**

**Prova di porosità**

**Prove di permeabilità**

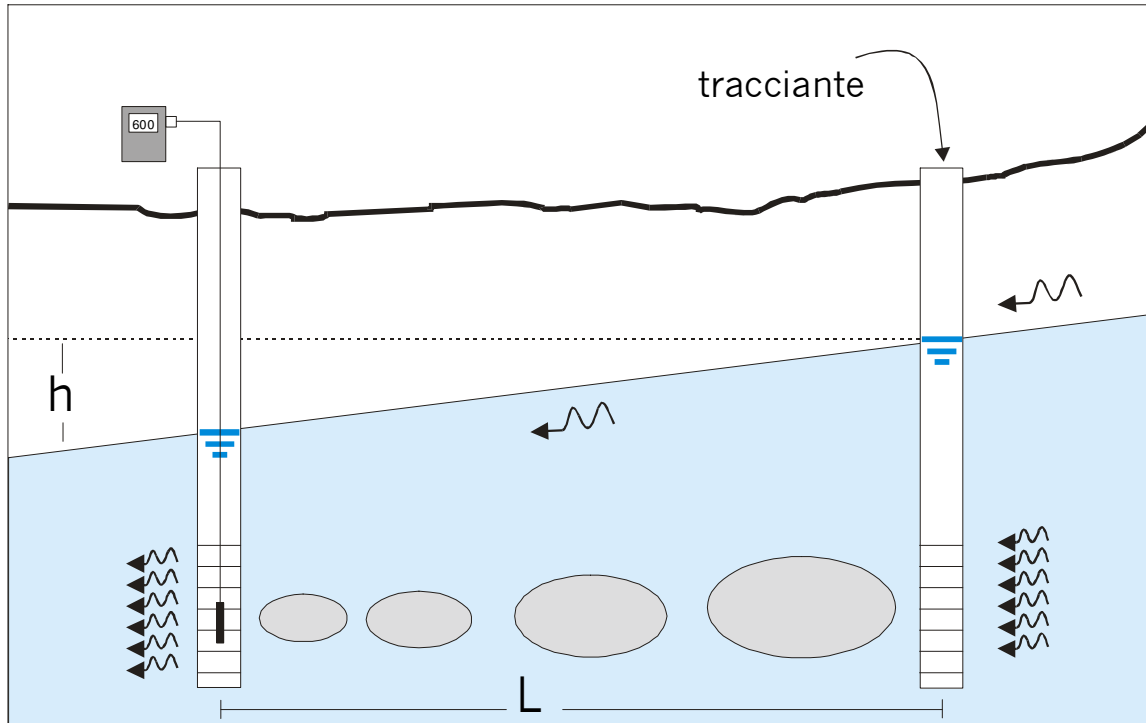
**Prove di pompaggio in pozzo**

**Prove di pompaggio con piezometri**

**Prova a gradini (SDT)**



## Prova di tracciamento



Prova con un tracciante in acquifero freatico per determinare la sua conducibilità idraulica.

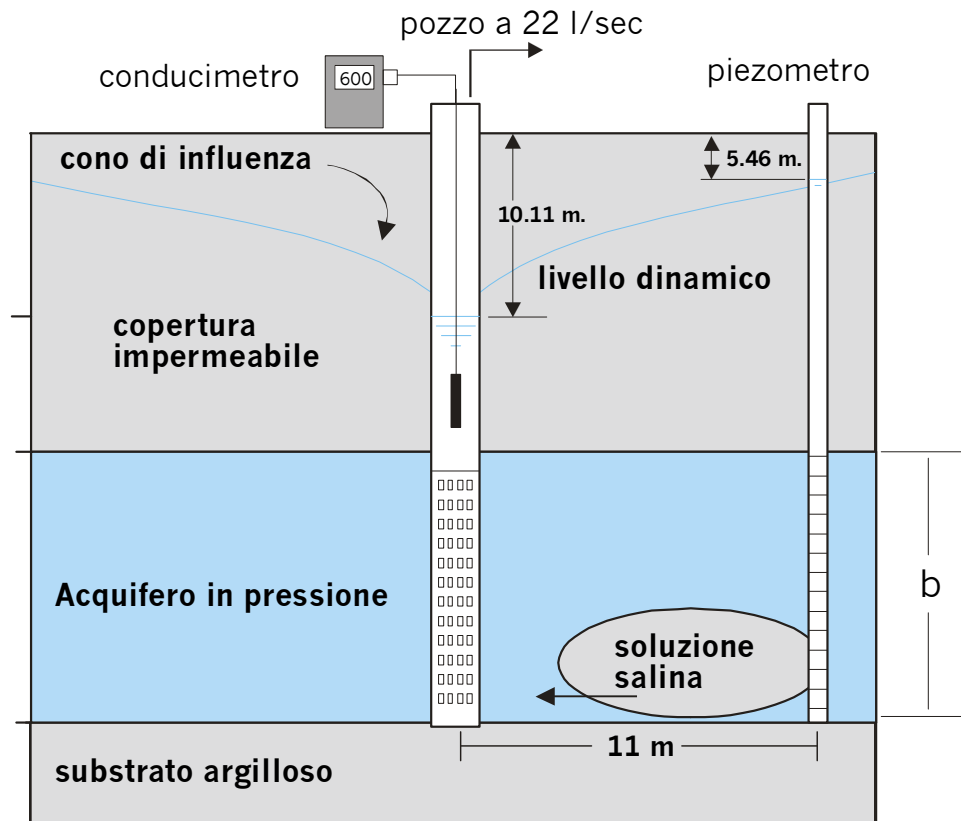
$$K = n L^2 / ht$$

$K$  = conducibilità idraulica dell'acquifero freatico;  
 $n$  = porosità dell'acquifero freatico

$L$  = distanza tra i due pozzi  
 $h$  = differenza di quota piezometrica

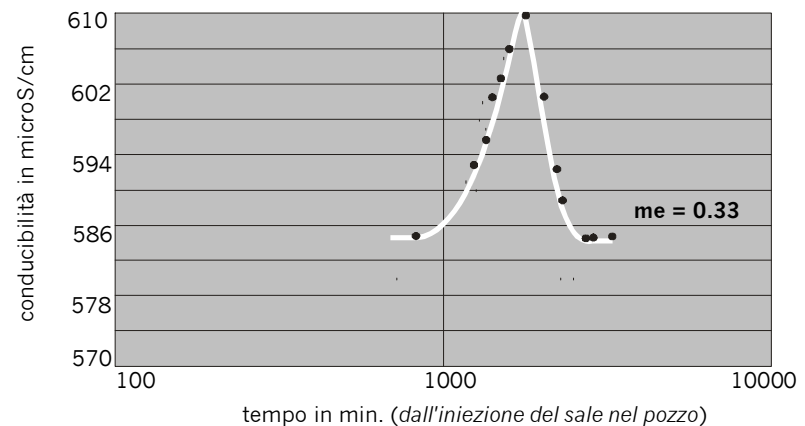
$t$  = tempo di arrivo del tracciante

## Misura della porosità dell'acquifero (uso di tracciante salino)



La prova serve per ottenere il valore della porosità efficace. Da un piezometro viene immessa una soluzione salina, mentre un vicino pozzo è in pompaggio. Il gradiente dinamico provoca dopo un certo tempo, l'arrivo del tracciante nel pozzo, che viene misurato tramite un conducimetro. Conoscendo il volume di acqua pompato durante la prova (Q), lo spessore di acquifero saturo ( $b = 11,5$  m), ed il tempo di arrivo del sale (t), si ottiene la porosità (n) dalla relazione:

$$n = Q t / \pi r^2 b$$



(Idrogeologia: prove in sito)

## Misura della porosità efficace con Volumenometro

La prova si effettua su terreno insaturo, il più possibile vicino alla falda, così da interessare un terreno dalle caratteristiche più simili a quelle dell'acquifero, (soprattutto per quanto riguarda il grado di compattazione).

Si tratta di calcolare il volume dei vuoti ( $V_v$ ) ed il volume totale del campione di terreno ( $V$ ) applicando la stessa definizione di porosità efficace:

$$m_e = (V_v / V)$$

Il metodo prevede quindi di scavare una buca, calcolare il volume di terreno asportato, corrispondente al volume del solido ( $V_s$ ) ed il volume della buca, corrispondente al volume totale ( $V$ ). Il volume dei vuoti ( $V_v$ ) si trova dalla differenza  $V - V_s$ , e quindi dividendo per  $V$  si ottiene la porosità efficace.

La porosità così ottenuta è quella totale, ma operando su terreni granulari sciolti, corrisponde bene a quella efficace. In realtà poi, nel campione scavato c'è una frazione (trascurabile) d'acqua pellicolare/gravifica che falsa leggermente il valore ottenuto (per come è fatta la prova quest'acqua è calcolata come volume di materiale e non di vuoti). Per maggiore precisione si può determinare il contenuto d'acqua di qualche campione, dopo essiccamento a  $105^\circ$  per 24 ore, e quindi correggere i valori. Il contenuto d'acqua è  $w = W_w / W_s$  (ora  $W_w = V_w$  cioè l'acqua capillare da togliere al  $V_v$  determinato con il metodo del volumenometro)

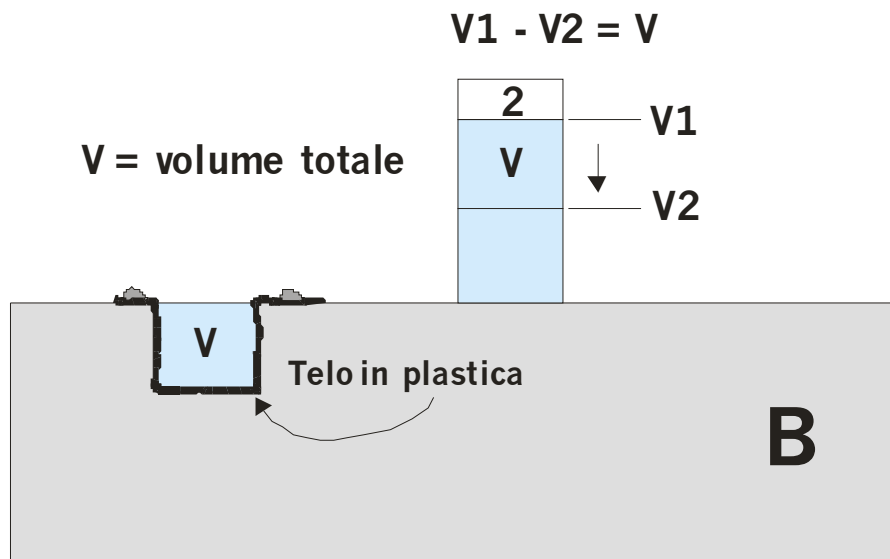
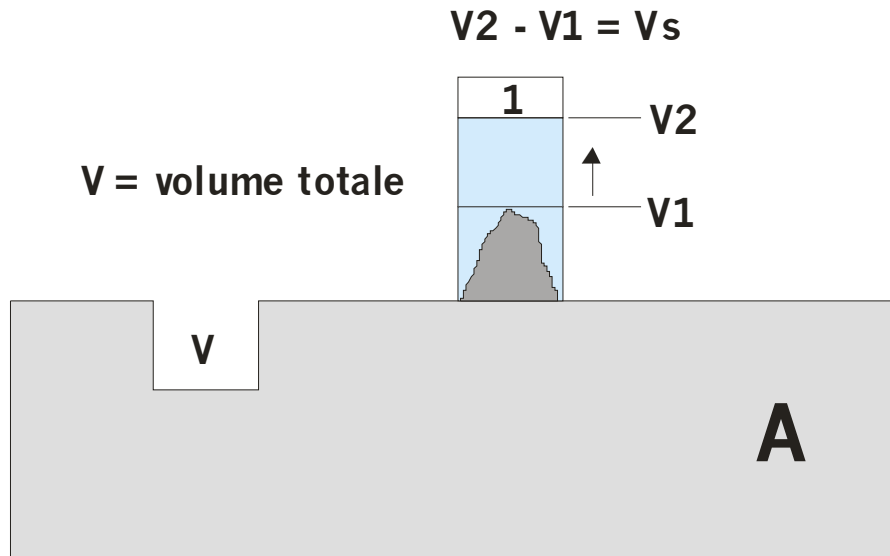
*(Idrogeologia: prove in sito)*

## Procedura

Il metodo descritto è generale e la sua rappresentatività dipende dal numero delle prove e dalla dimensione degli scavi (oltre che dalla precisione nel calcolo dei volumi).

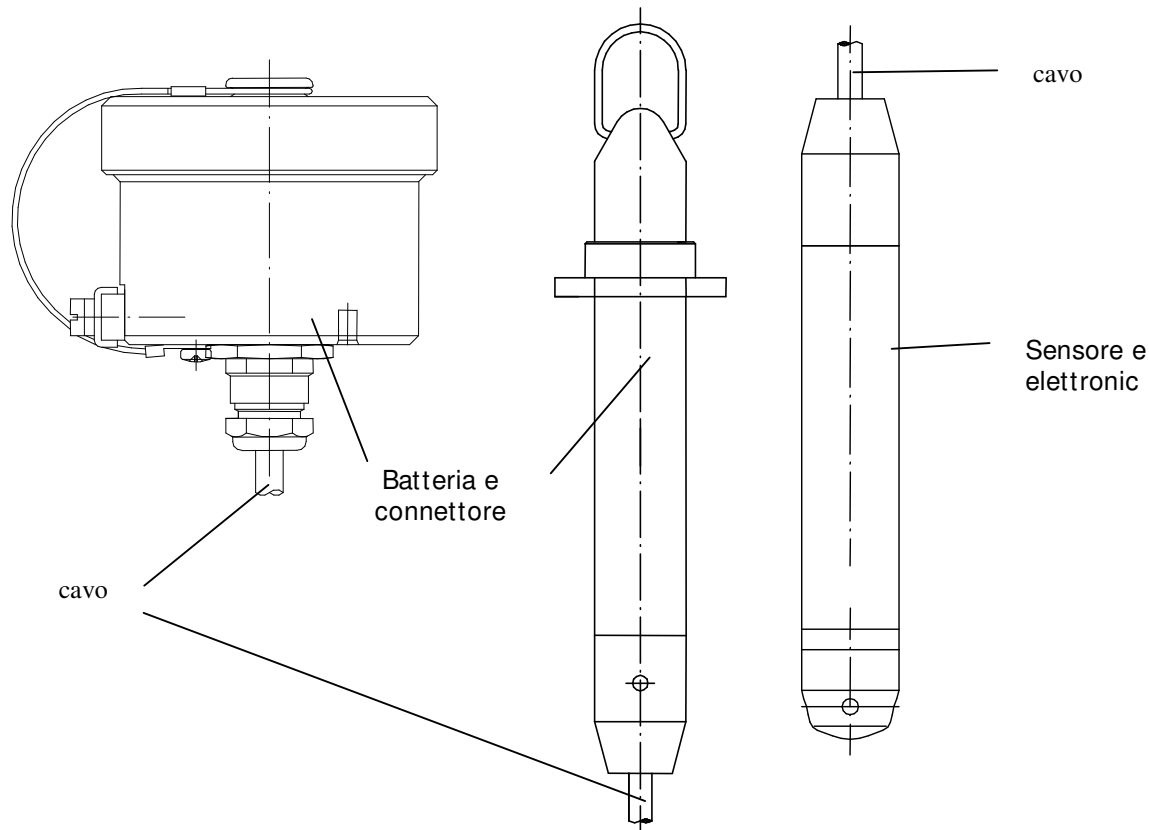
Effettuare uno scavo con una benna

- Preparare un telo impermeabile di misura adeguata ad essere steso sulle pareti dello scavo
- Preparare due fusti almeno di 200 lt ciascuno
- Riempire circa a metà un fusto d'acqua
- Utilizzare l'acqua del secondo fusto per riempire la buca dopo averla impermeabilizzata con il telo (prendere nota del volume utilizzato per riempire la buca a livello, corrisponde a  $V$ )
- Tutto il materiale scavato dalla benna e tolto dalla buca va inserito nel secondo fusto, misurando l'aumento di livello d'acqua (corrispondente a  $V_s$ )
- La porosità totale (corrispondente a quella efficace) è  $m_e = (V - V_s) / V$



(Idrogeologia: prove in sito)

Per tenere sotto controllo una falda si ricorre sempre più di frequente alle sonde di misura del livello con l'abbinamento anche di altri parametri (temperatura, conducibilità, ossigeno disciolto ecc.). Tali strumenti rilevano a scadenze prefissate il parametro richiesto, scaricandolo in un data logger che può registrare migliaia di misure (oltre 100000 dati in alcuni modelli). Il trasduttore di livello è calato nel pozzo, molto al di sotto della quota piezometrica e registra la pressione del fluido come l'altezza d'acqua sovrastante il sensore. Per calcolare anche la variazione di pressione barometrica che agisce sulla falda e quindi anche sul sensore immerso, si utilizza un secondo trasduttore calato nel pozzo e fuori dell'acqua. Alcuni strumenti utilizzano invece un tubicino in teflon, di diametro molto piccolo che collega il sensore con la superficie.



Le sonde automatiche per il monitoraggio di livello e temperatura sono composte da due parti, collegate con un cavo: Una parte sommersa che contiene il sensore e la relativa elettronica. Una parte esterna, che contiene la batteria e il connettore per la connessione con il PC. Anche qui il connettore, quando non viene usato, viene protetto da un coperchio a perfetta tenuta.

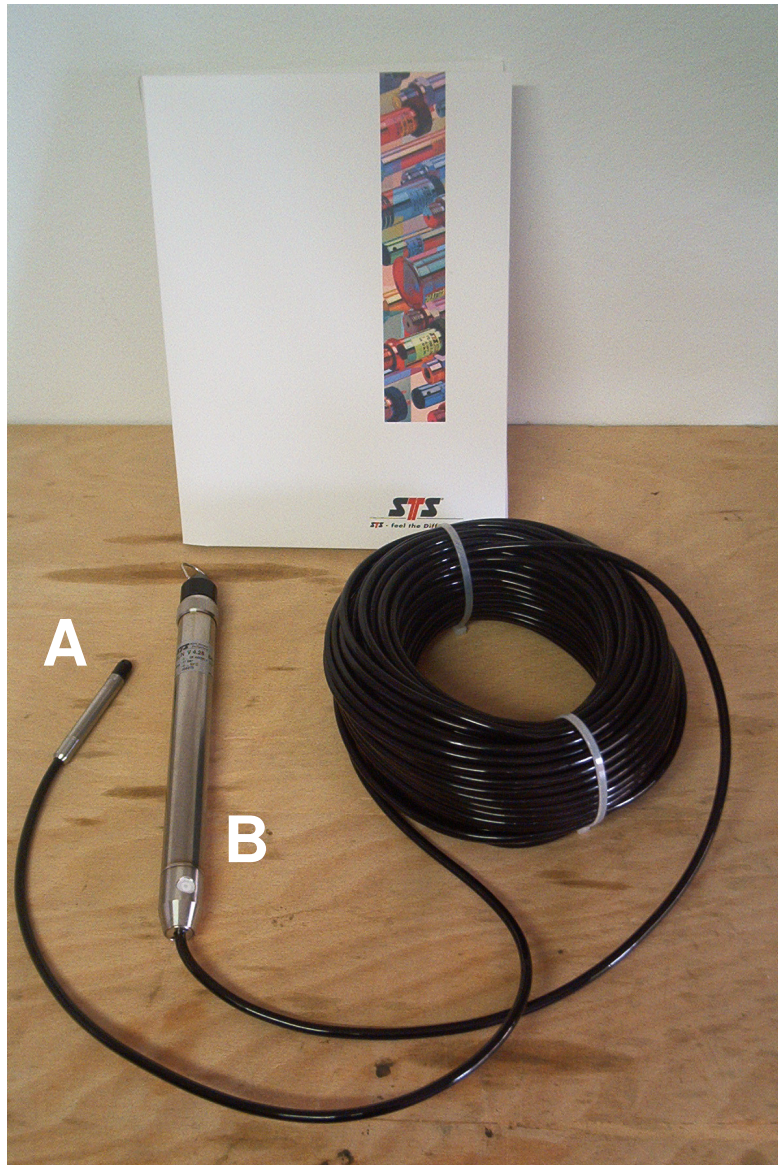
**(per gentile concessione di STS, Milano)**

*(Idrogeologia: prove in sito)*

## Data logger di livello con cavo per la compensazione della pressione barometrica

A: sensore (diametro 1 cm)

B: alloggiamento per data logger e batteria in superficie



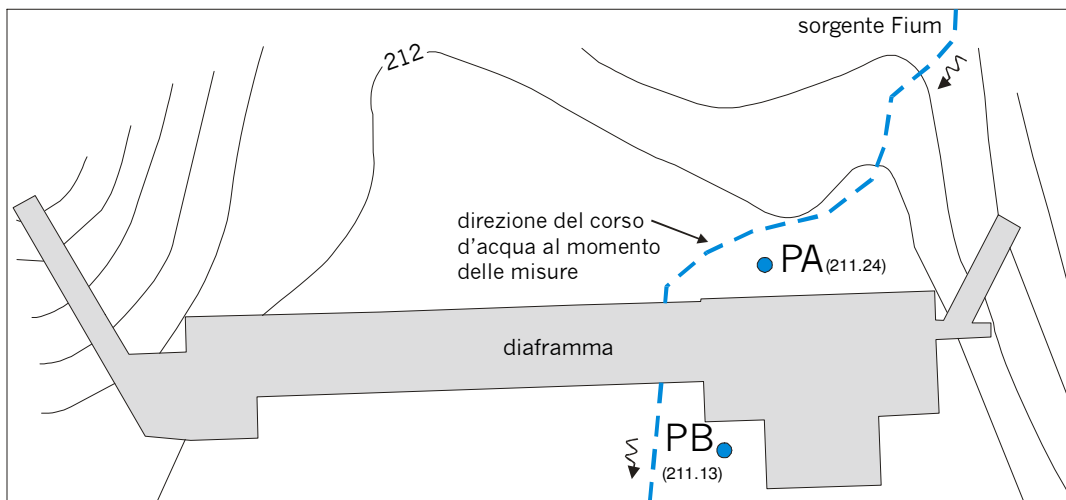
Fase di scaricamento delle misure su portatile mediante presa seriale



*Per gentile concessione  
STS, Opera, MI*

*(Idrogeologia: prove in sito)*

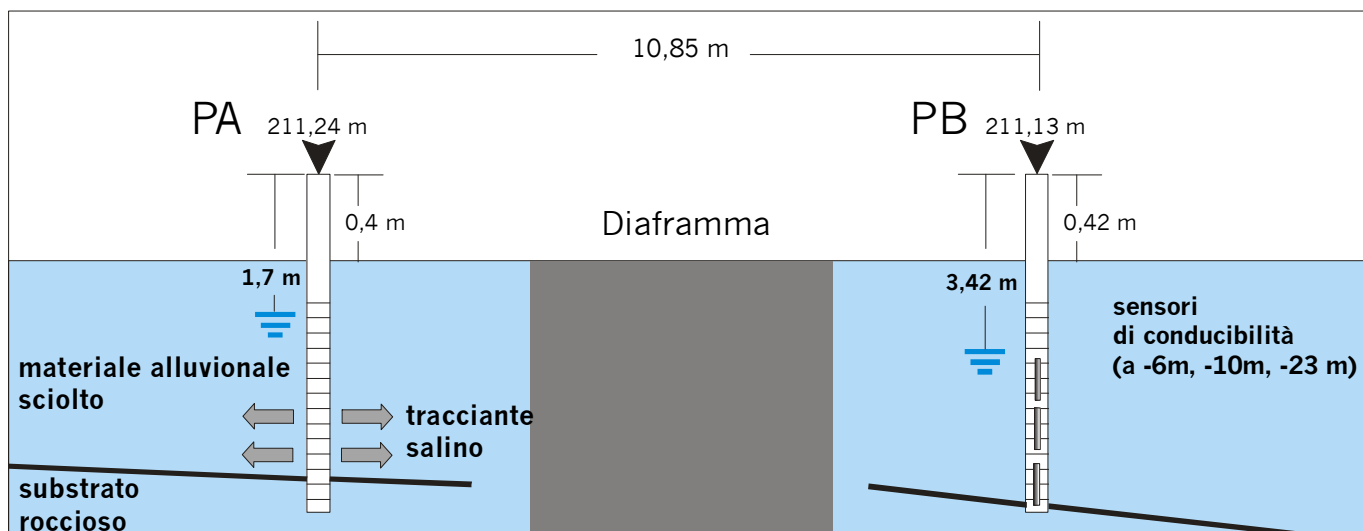




## Utilizzo di sonde multiparametriche in una prova di tracciamento

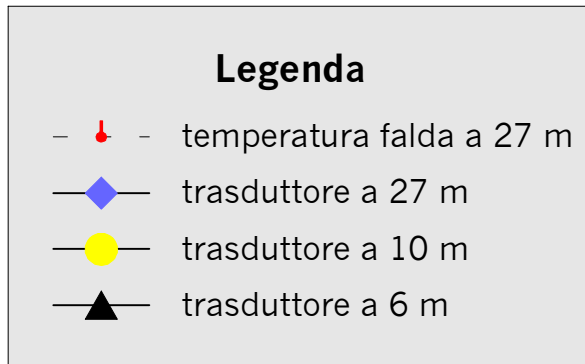
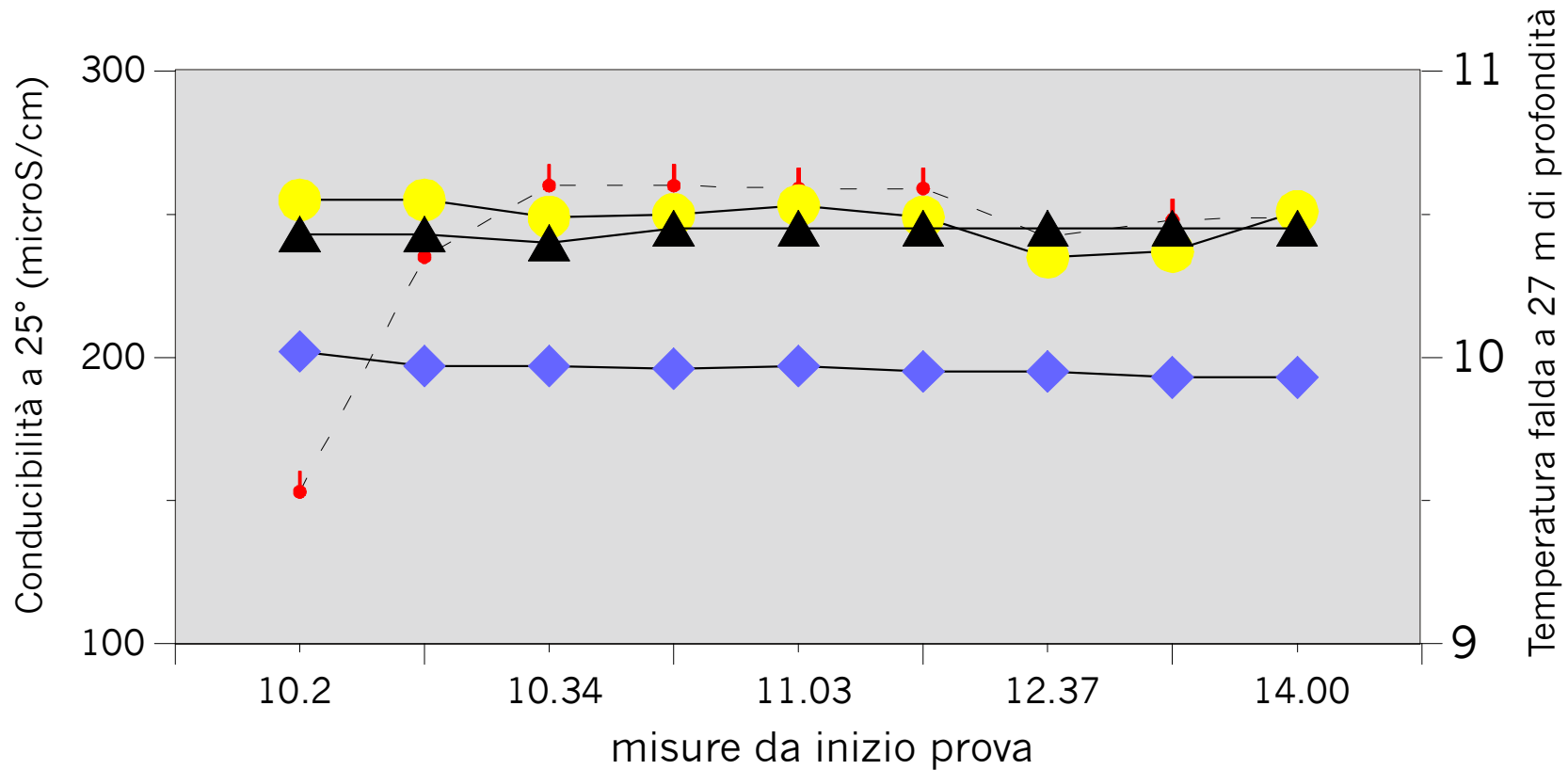
Diaframma di contenimento della Sorgente Fium, BL, (Studio Fileccia)

in alto planimetria con ubicazione dei piezometri (PA e PB) perforati a cavallo del diaframma. In basso schema della prova, lungo un piano verticale. Il tracciante salino è stato immesso da PA, a monte del flusso di falda, e da una profondità di circa 22-26 m. Al fondo, i valori sono rimasti pressochè costanti durante tutta la prova (12400 microS/cm). I sensori di conducibilità sono stati posizionati nel piezometro PB, a valle, alle quote di 6, 10, 23 m sotto la bocca pozzo. Le misure si sono protratte per circa 10 ore senza segnalare aumenti di conducibilità nel PB, riconducibili ad un passaggio di sale.



*(Idrogeologia:  
Prove in sito)*





### Utilizzo di sonde multiparametriche in una prova di tracciamento

Valori di conducibilità alle varie quote nel piezometro a valle del diaframma. Captazione sorgente Fium, BL (Studio Fileccia)

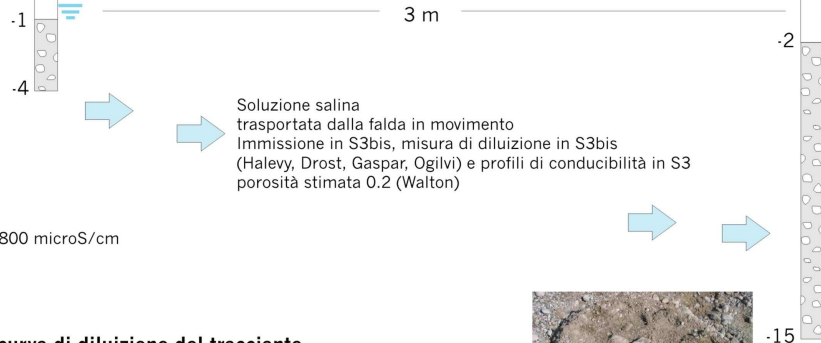
*(Idrogeologia: prove in sito)*

# Prova di velocità di falda

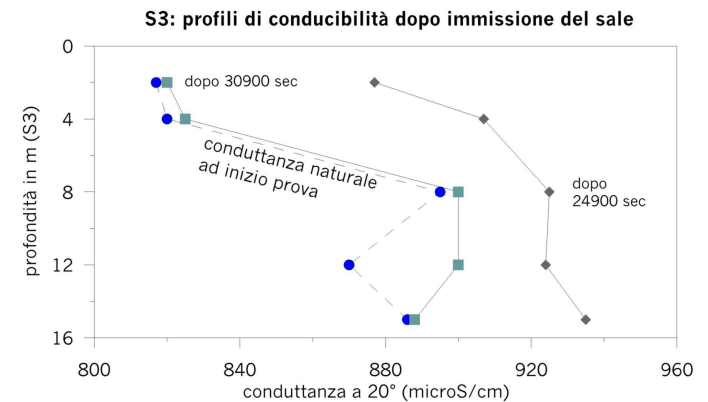
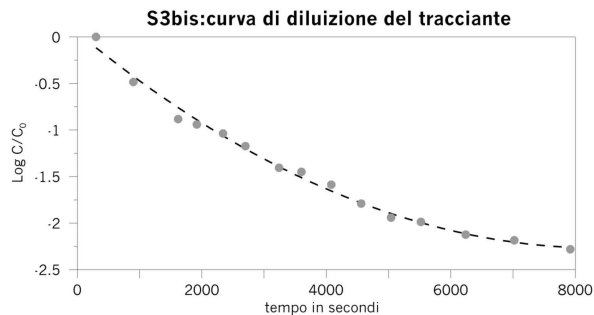
La prova è fatta immettendo del sale nel piezometro a monte S3bis e misurando la diminuzione di concentrazione nel tempo, contemporaneamente viene misurata la conducibilità in S3, a valle, per determinare il tempo di arrivo dell'onda salina



gradiente naturale 0.013  
conduttanza naturale (25°) 800 microS/cm  
massa tracciante 1 kg  
vel. reale 12.5 m/giorno



Soluzione salina trasportata dalla falda in movimento  
Immissione in S3bis, misura di diluizione in S3bis (Halevy, Drost, Gaspar, Ogilvi) e profili di conducibilità in S3 porosità stimata 0.2 (Walton)



vel. reale 10.4 m/giorno  
distanza percorsa durante la prova 3 m

*Studio Fileccia*

(Idrogeologia: prove in sito)

# Prove K in pozzetto superficiale

Si tratta delle prove di permeabilità, a carico costante o variabile eseguite in pozzetti di piccolo diametro e nei casi in cui la falda freatica sia situata poco sotto il piano campagna. Sono in genere utilizzate per ricavare l'ordine di grandezza della conducibilità idraulica. Le informazioni riguardano una zona di circa 0,5 – 1 metro attorno al filtro, ed i vantaggi offerti da queste procedure si possono riassumere nei seguenti:

- costi limitati, rispetto alle prove di portata classiche e quindi possibilità di estendere la zona investigata mediante numerose prove (analisi della variabilità spaziale)
- velocità di esecuzione
- in genere non serve una pompa e non è necessario un piezometro vicino
- i dati non sono influenzati da pozzi vicini in pompaggio o variazioni barometriche
- sono molto utili in terreni a bassa permeabilità ed anche per programmare le più costose prove di portata

Vi sono numerose metodologie per ricavare la conducibilità idraulica, quasi tutte si basano sull'inserimento o prelievo di un determinato volume di acqua dal pozzetto e nella misura dei livelli dinamici per un certo periodo di tempo o fino al ritorno all'equilibrio.

In alternativa, nei casi di terreni con permeabilità elevate, si mantiene un livello costante nel foro immettendo dell'acqua con una pompa.

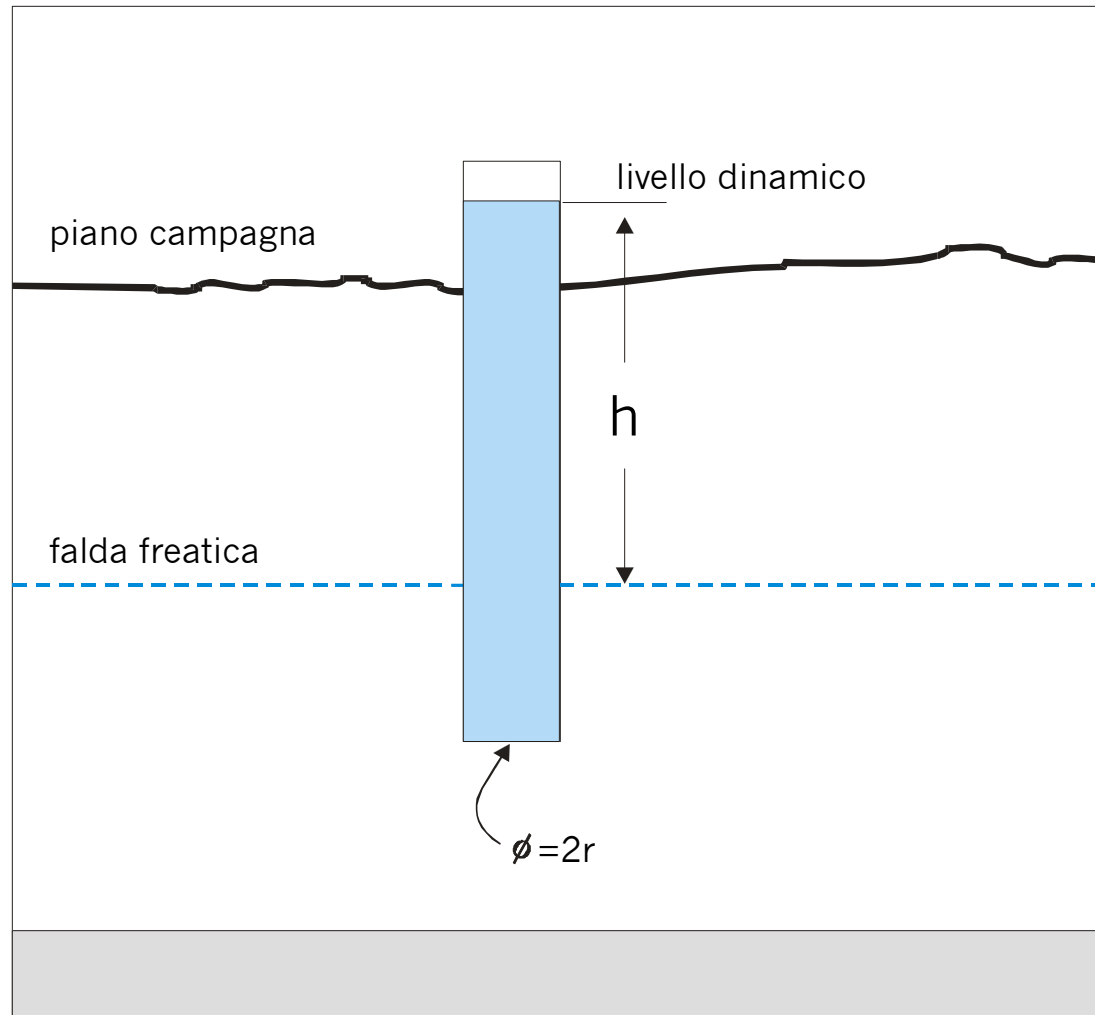
Gli aspetti limitanti di questo tipo di prove sono d'altronde legati a:

- errori di misura durante la rapida variazione di livello
- fenomeni di riflusso tra rivestimento e foro
- leggere fluttuazioni naturali del livello statico (in terreni a bassa permeabilità)
- sviluppo del foro (intasamento o zona ad alta  $K$  attorno al filtro)
- leggera compattazione del terreno a seguito dell'infissione del rivestimento

I metodi più utilizzati sono:

- Metodo USBR
- Auger hole
- Lefranc
- Time lag
- Slug test

Dato che la forma della zona filtrante è molto variabile, ed in certi casi il foro non è tubato, alcune metodologie utilizzano delle tabelle che elencano i valori di un coefficiente di forma  $C$ , da inserire nelle formule.



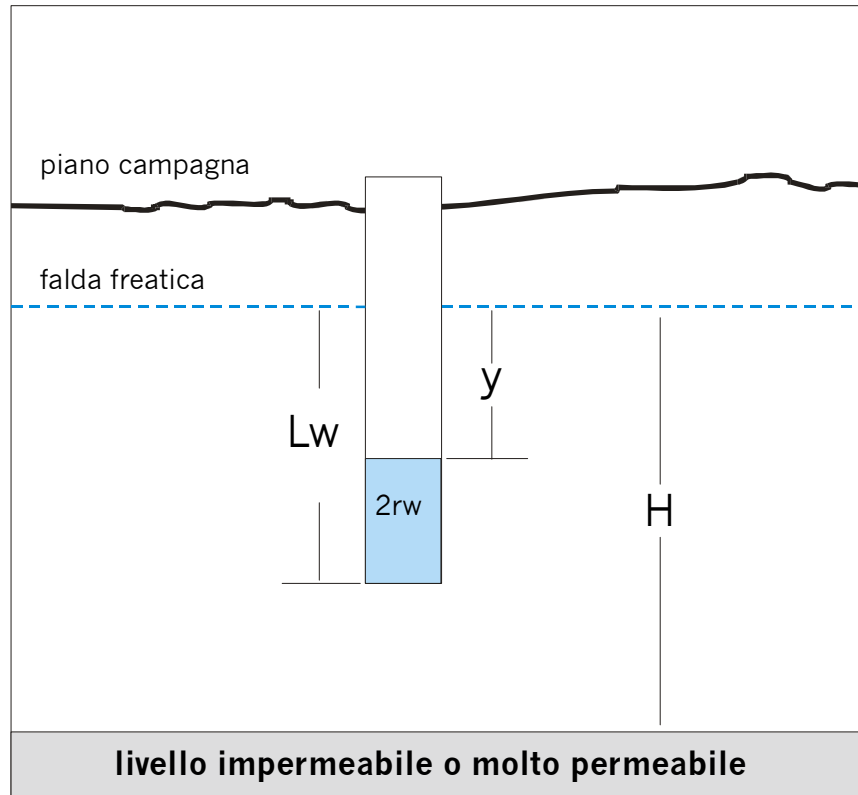
## **Metodo U.S.B.R.** (a carico costante)

*Nel Ground Water Manual, ne sono elencati parecchi e questo è solo uno dei più semplici.*

La prova è effettuata mantenendo un carico costante per almeno 5 minuti. La conducibilità idraulica (K), si ricava conoscendo la portata immessa Q (mc/sec), il raggio del tubo di rivestimento (r) in metri ed il carico idraulico (h) in metri, durante la prova:

$$K = Q / 5,5 rh$$

*(Idrogeologia: prove in sito)*



$L_w$  è il tratto filtrato o non tubato, sotto falda

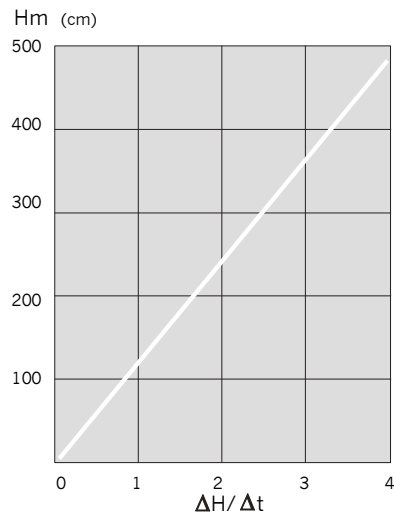
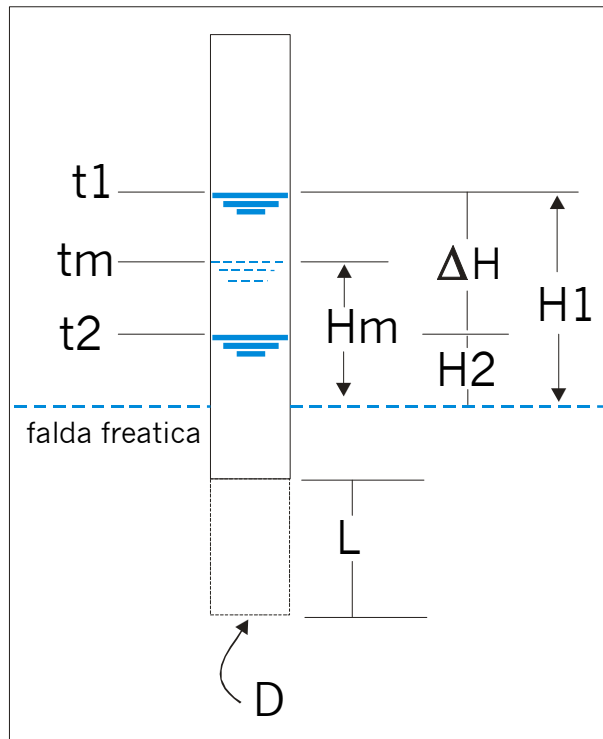
## Prova Auger Hole

La prova è effettuata in pozzetti superficiali ed acquiferi sciolti e consiste nel misurare le variazioni di livello nel foro, dopo la rimozione rapida di una parte dell'acqua di falda in esso contenuta. Il valore di  $K$  si riferisce ad una zona vicina al foro (0,5 - 1 m). L'applicazione della formula prevede l'uso di una tabella che da i valori del coefficiente di forma  $C$ , e come unità di misura cm e secondi (Todd)

$$K = C dy / 864 dt$$

( $K$  è in m/giorno)

# Schema della prova Lefranc



$D = 7,5 \text{ cm}$   
 $L = 50 \text{ cm}$   
 $L/D = 6,7$   
 $C = 115 \text{ cm}$   
 $A = 50,2 \text{ cm}^2$   
 $dH / dt H_m = 0,0085$   
 $K = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ cm/sec}$

**Per le prove a carico costante** la conducibilità idraulica è:

$$K = Q / CH$$

$Q$  = portata a regime ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )

$H$  = carico idraulico a regime (cm)

$C$  = coefficiente di forma (cm), in funzione della tasca inferiore di diametro  $D$  e lunghezza  $L$

**Per prove a carico idraulico variabile** la conducibilità idraulica è:

$$K = AdH / C dt H_m$$

$A$  = area di base della tasca filtrante

$dH = H_1 - H_2$  = differenza di carico idraulico

$dt = t_2 - t_1$  = intervallo di tempo corrispondente a  $dH$

$H_m$  = carico idraulico corrispondente al tempo medio  $(t_1 + t_2) / 2$

$C$  = coefficiente di forma

**Nel caso di foro aperto inferiore:**

$$C = 2,85 D$$

Per una tasca sferica con  $L = D$

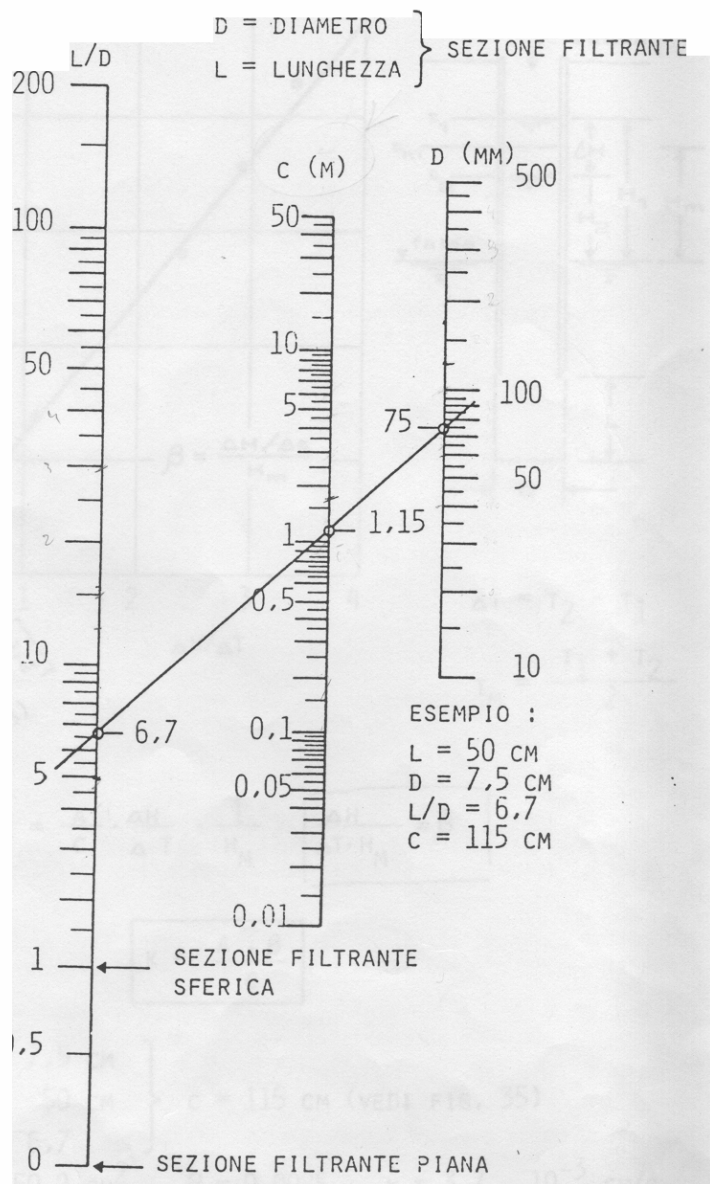
$$C = 2D\pi$$

Il grafico a sinistra indica la buona esecuzione della prova

(Idrogeologia: prove in sito)



## Coefficiente di forma



In base al diametro ed al rapporto tra questo e la lunghezza della parte filtrante del pozzetto superficiale, si determina il valore di C da inserire nelle formule precedenti

E' da sottolineare che in tutte le prove di questo tipo il rapporto L/D influenza il tipo di permeabilità ricavato. In genere si ammette che per:

L/D > 1,2 si ricava una permeabilità orizzontale  $K_h$

mentre per L/D tra 0 ed 1,2 una permeabilità media pari a :

$$K_{\text{media}} = \sqrt{K_h K_v}$$

## Tabella dei dati da rilevare durante la prova Lefranc

### Sondaggio:

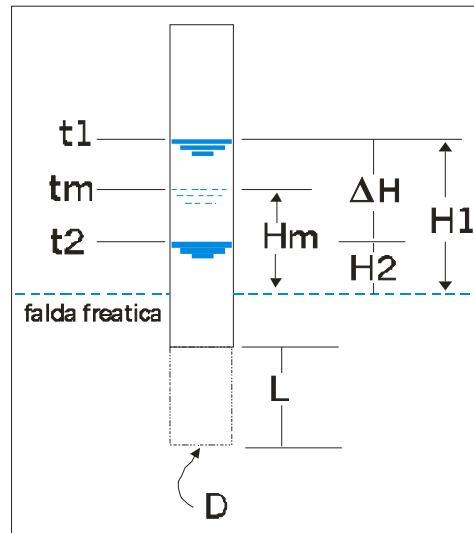
Committente:

Data:

Località:

**Prova Le Franc a carico variabile n.**

**Prova Le Franc a carico costante n.**



$$k = A \Delta H / C D t H_m$$

A = area base / tasca filtrante

$\Delta H = H_1 - H_2$  differenza di carico idraulico

$Dt = t_2 - t_1$  = intervallo di tempo corrispondente a  $\Delta H$

$H_m =$  carico idraulico corrispondente al tempo medio  
 $(t_1 + t_2) / 2$

C = coefficiente di forma

### Prova a carico costante

$$k = Q / C H$$

Q = portata a regime

H = carico idraulico a regime

C = coefficiente di forma

### Considerazioni generali:

Diagrammando il tempo rispetto agli abbassamenti, non si devono considerare i valori dell'eventuale tratto asintotico finale, perché dovuti ad un cono di depressione ampio e piatto (basse velocità).

Secondo Beers (1979) i valori più attendibili sono quelli compresi tra  $1/4$  e  $3/4$  dell'abbassamento totale.

Tempo trascorso in sec.	Liv. Dinamico in m	H

(Idrogeologia: prove in sito)

# Metodo del Time lag

Questo metodo permette di ricavare la conducibilità idraulica per un acquifero freatico, tramite un pozzetto superficiale a foro aperto o con un breve tratto filtrante (Hvorslev, 1951). La prova può essere fatta variando velocemente il livello statico togliendo od immettendo acqua e misurando le quote a distanza di tempo.

Quando si toglie l'acqua la prova si chiama *bail test*, quando s'immette *slug test*.

Si può ottenere lo stesso effetto mettendo un corpo solido di volume noto, nel pozzetto.

Cooper (1973) ha messo a punto un metodo simile per gli acquiferi artesiani.

Facendo riferimento alla figura, e supponendo di avere tolto l'acqua nel pozzetto, la portata in ingresso attraverso il filtro è:

$q(t) = \pi r^2 dh/dt = FK (H - h)$  da cui la formula più generale:

$$K = (A \ln dh_1/dh_2) / F (t_2 - t_1)$$

con F un fattore di forma dipendente dalla lunghezza e diametro della parte filtrante.

Se  $q = q_0$  per  $t = 0$ , allora  $q(t)$  diminuisce asintoticamente verso lo zero a mano a mano che passa il tempo.

Hvorslev definì il tempo base  $T_0$  (time lag) come:  $T_0 = \pi r^2 / FK$

Sostituendo il valore nell'espressione precedente si ottiene, per  $h = H_0$  al tempo  $t = 0$ :

$$(H - h) / (H - H_0) = e^{-t/T_0}$$

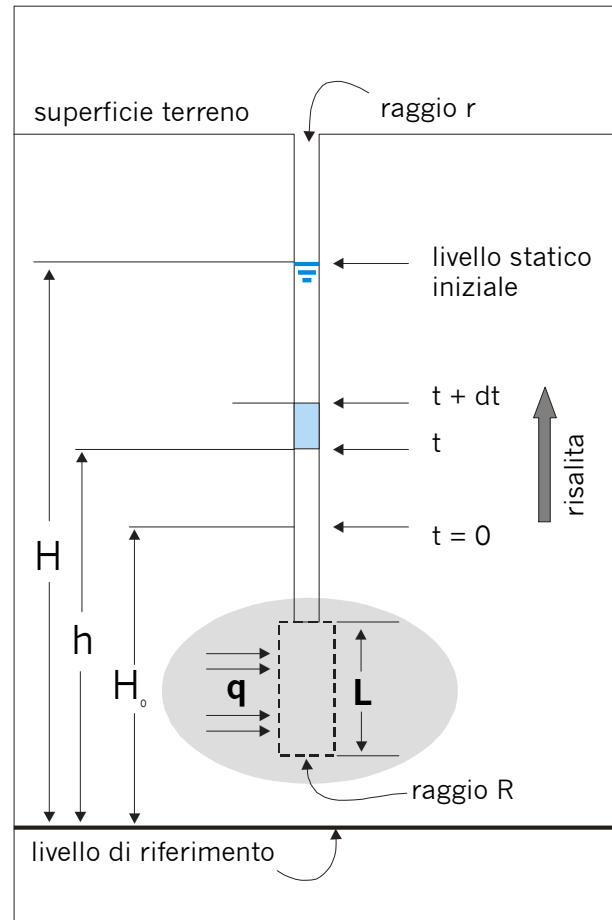
(Idrogeologia: prove in sito)

## Metodo del Time lag

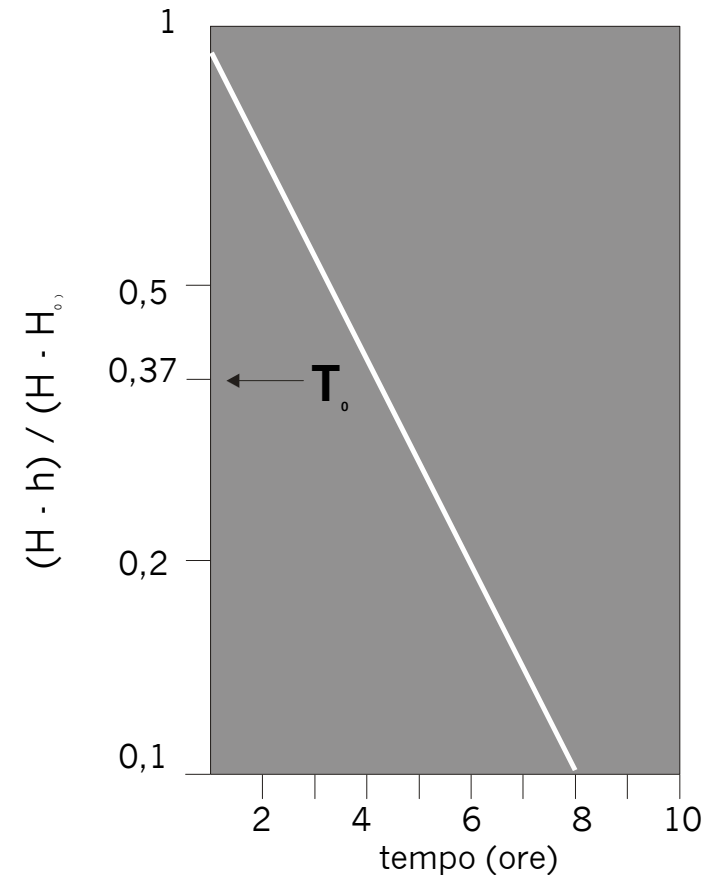
riportando su grafico in ascissa il tempo ed in ordinata la risalita (in scala logaritmica), si ottiene un andamento lineare. Per valori di  $(H - h) / (H - H_0) = 0,37$ , allora  $\ln(H - h) / (H - H_0) = -1$ , quindi  $T_0 = t$ , che è poi la definizione del time lag. Per ricavare K si costruisce il grafico in figura, ricavando il  $T_0 = 0,37$  ed applicando la: (valida per  $L/R > 8$ ; per altri valori si F consultare le tabelle)

$$K = \frac{r^2 \ln(L/R)}{2LT_0}$$

La distanza tra il livello statico iniziale e quello di riferimento è chiamata: purge water level



In ordinata va messo il rapporto tra abbassamento relativo e massimo rispetto al livello statico di inizio prova (il valore è quindi sempre inferiore ad 1, e la disposizione lungo una retta, indica la bontà della prova ed il regime laminare)



(Idrogeologia: prove in sito)

# Slug test

(Metodo Bouwer – Rice 1976)

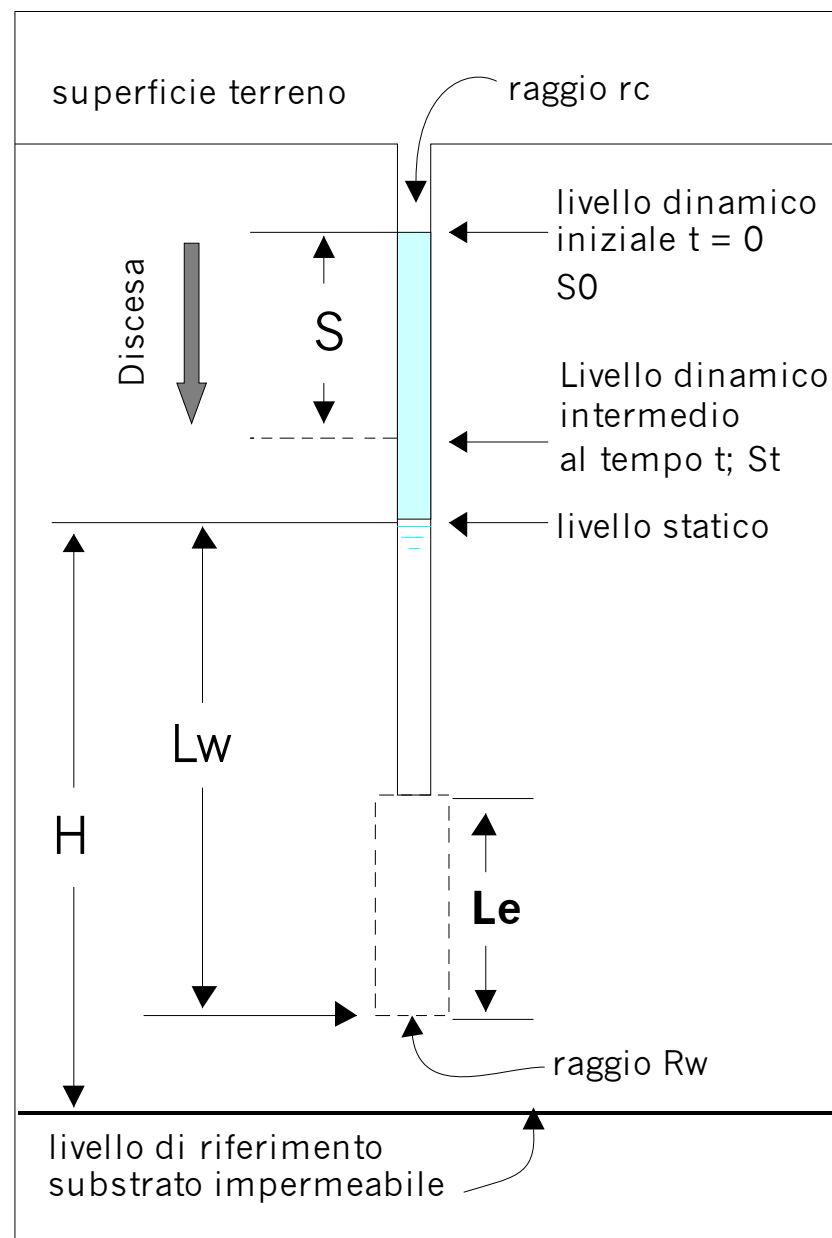
Il metodo può essere usato su pozzetti completi, incompleti, per acquiferi freatici ed artesiani (con la parte filtrante sotto il tetto del livello confinante). La formula deriva da quella di Thiem:

$$T = (0,366 Q/s) \log Re/rw$$

Se attorno al filtro c'è il dreno il raggio del pozzo diventa:

$$rw = \sqrt{(1-n) r_c^2 + nr_w^2}$$

$n$  = porosità;  $r_c$  = raggio rubo cieco

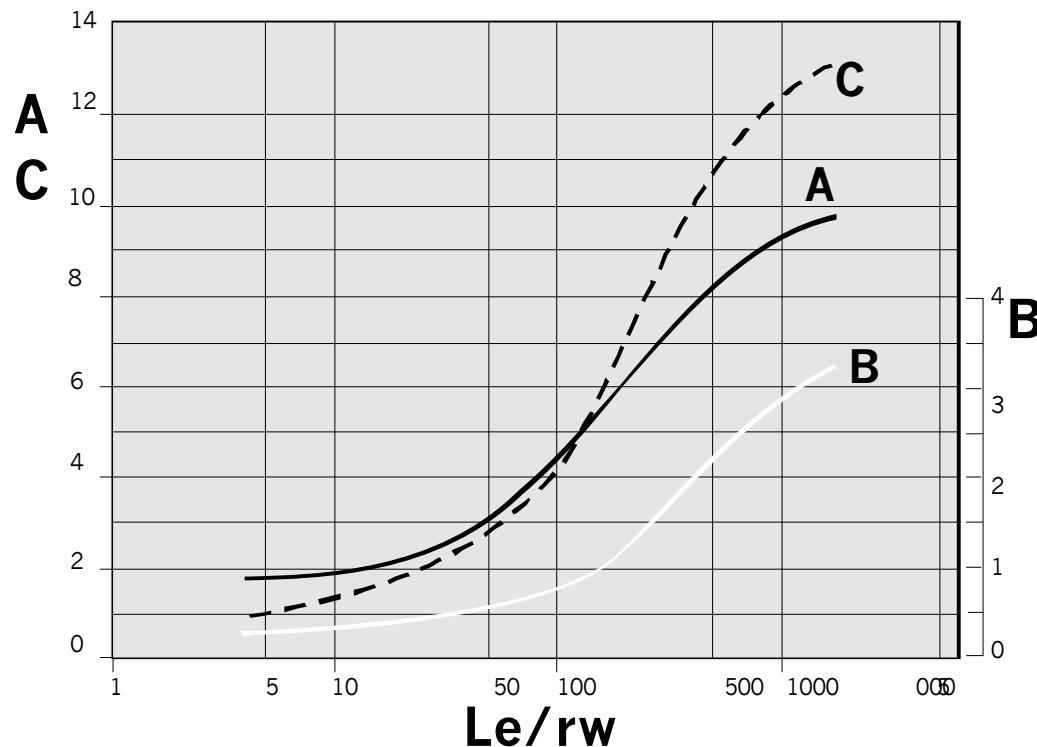


(Idrogeologia: prove in sito)

# Slug test

In sintesi la procedura prevede di:

1. Costruire il grafico bilog tempo abbassamento (in ordinata va la differenza tra liv. statico e dinamico, in scala logaritmica)
2. Calcolare i coefficienti A,B (pozzi incompleti) o C (pozzi completi) delle curve campione
3. Calcolare  $\ln Re/rw$  per pozzi completi od incompleti con una delle due formule
4. Ricavare K (considerare il tratto rettilineo verso la parte finale del grafico)



$$\ln Re/Rw = \frac{1}{\frac{1.1}{\ln(Lw/Rw)} + \frac{A + B \ln[(H - Lw)/Rw]}{Le/Rw}} \quad \text{Pozzo incompleto}$$

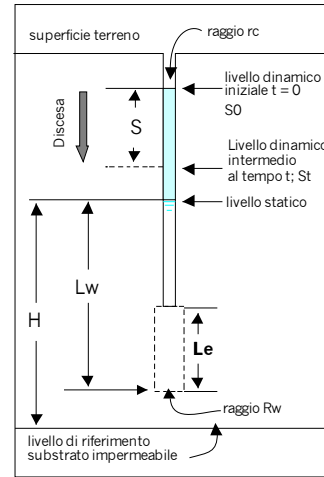
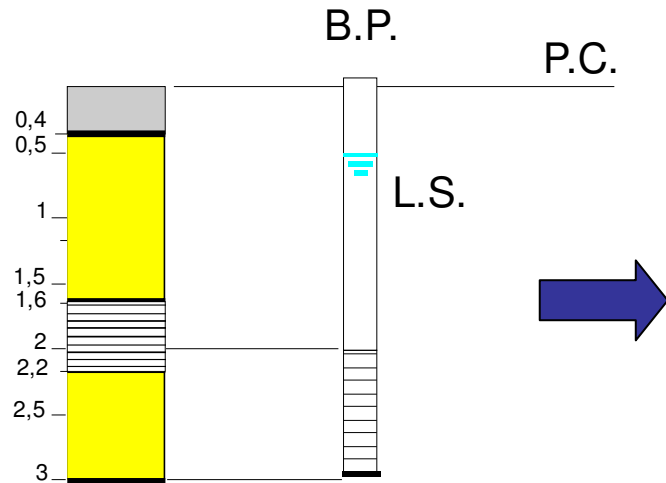
$$\ln Re/Rw = \frac{1}{\frac{1.1}{\ln(Lw/Rw)} + \frac{C}{Le/Rw}}$$

**Pozzo completo**

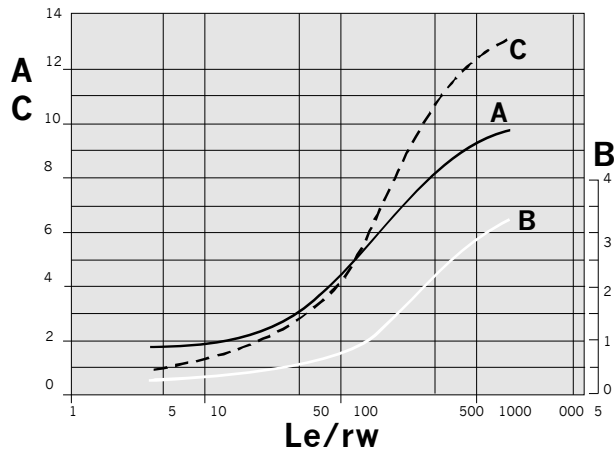
$$K = \frac{rc^2 \ln Re/Rw}{2Le t} \quad \ln S_0/St$$

(Idrogeologia: prove in sito)

# Slug test: Sintesi procedure

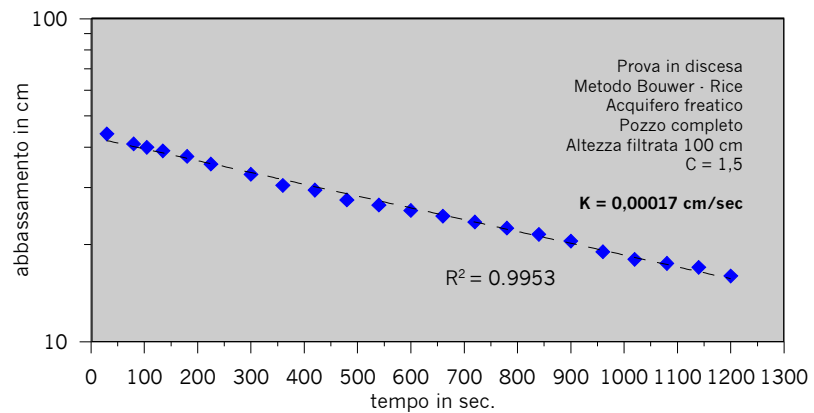


Piezometro M1F	
tempo sec.	Livello dinamico da B.P. in cm
30	6
80	9
105	10
135	11
180	12.5
225	14.5
300	17
360	19.5
420	20.5
480	22.5
540	23.5
600	24.5
660	25.5
720	26.5
780	27.5
840	28.5
900	29.5
960	31
1020	32
1080	32.5
1140	33
1200	34



Metodo Bouwer - Rice

PROVA DI PERMEABILITA'  
Piezometro n. M1F



(Idrogeologia: prove in sito)