

# COSTRUZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE DI UN ACQUIFERO

Estratto dalla Tesi di Enea Giovanni Bonfanti  
[herrdoctor@hotmail.it](mailto:herrdoctor@hotmail.it)

## Indice

1	ACQUISIZIONE DEI DATI .....	2
1.1	I PARAMETRI IDROGEOLOGICI .....	2
1.2	TEORIA DI THEIS .....	4
1.3	TEORIA DI JACOB .....	5
1.4	Alcuni esempi numerici .....	8
1.4.1	Esempio 1.....	8
1.4.2	Esempio 2.....	8
1.4.3	Esempio 3.....	9
1.5	CARATTERISTICHE DEI CONTAMINANTI .....	10
1.6	LA CARATTERIZZAZIONE IN FUNZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE DELL'INQUINAMENTO.....	11
1.7	ACCERTAMENTO DI INTERCONNESSIONE E TRASMISSIVITÀ EQUIVALENTI .....	19

## **1 ACQUISIZIONE DEI DATI**

La prima fase da affrontare per la progettazione di una barriera idraulica è la fase di acquisizione dei dati sui parametri idrogeologici degli acquiferi, sulla struttura idrogeologica e sulle modalità di propagazione dell'inquinamento che si sta affrontando. Questa fase viene denominata: **caratterizzazione dell'acquifero**.

L'identificazione dei parametri idrogeologici permette la costruzione del modello concettuale dell'inquinamento, e rappresenta quindi una fase di fondamentale importanza per la progettazione della barriera.

Tale fase consente di eseguire tutte le indagini necessarie alla corretta caratterizzazione idrogeologica, logistica e dello stato di contaminazione del sito, permettendo il corretto dimensionamento della barriera stessa.

Si è potuto infatti osservare, dal 2000 ad oggi, come molti costi imprevisti e ritardi nella bonifica dei siti contaminati siano derivati infatti dalla imperfetta caratterizzazione iniziale, e dal tardivo manifestarsi di errori compiuti nella fase di stesura del modello concettuale. Ad esempio, è emersa l'opportunità di evitare che significativi settori del sistema non vengano investigati, e quella di valutare importanti parametri (quali l'interconnessione fra gli acquiferi) che determinano le portate circolanti nel sistema. Si è constatata la necessità di individuare gli acquiferi che non ricevono alimentazione e cedono acqua con difficoltà, rendendo difficile il disinquinamento, nonché di stabilire un protocollo per l'esecuzione delle indagini idonee a mettere in luce queste particolarità.

Qui di seguito vengono pertanto descritti i punti essenziali dei quali bisogna tener conto per una corretta analisi e successiva progettazione della barriera idraulica.

### **1.1 I PARAMETRI IDROGEOLOGICI**

Per verificare i parametri idrogeologici utilizzati per il dimensionamento del sistema esistono diversi tipi di prove da poter effettuare sia in sito sia in laboratorio: prove di permeabilità sul terreno, slug tests, test di permeabilità in laboratorio (con permeametri o con edometri) prove di pozzo e prove di pompaggio.

Essi sono brevemente descritti di seguito:

- **Prove in laboratorio** : si tratta di prove svolte con permeametri o con edometri. Sono soggette ad approssimazioni dovute alla significatività del campione sottoposto a misure. Si possono ottenere valori sottodimensionati di oltre un ordine di grandezza. La conoscenza delle caratteristiche granulometriche del terreno è però necessaria per determinare alcuni parametri idrogeologici (quali la porosità) e l'importanza di alcuni fenomeni quali l'adsorbimento degli inquinanti da parte dei materiali più fini.
- **Prove slug test**: si effettuano in mezzi a permeabilità media e danno un valore approssimativo della conducibilità idraulica, che può servire solo a fornire un'idea dell'ordine di grandezza di questo parametro.
- **Prove di pozzo**: sono finalizzate alla definizione delle caratteristiche del pozzo in funzione dell'abbassamento del livello piezometrico della falda. In particolare permettono di verificare l'efficienza del sistema acquifero – opera di captazione al fine di determinare le caratteristiche della pompa per le prove di pompaggio e di posizionare correttamente i piezometri. Viene realizzata un'apposita curva caratteristica del pozzo che mette in relazione portate e abbassamenti. Questo tipo di prove

consentono di misurare portata e abbassamento con un tipo di prova a gradini di portata. Il grafico

sottostante (Figura 1) ne è un esempio.

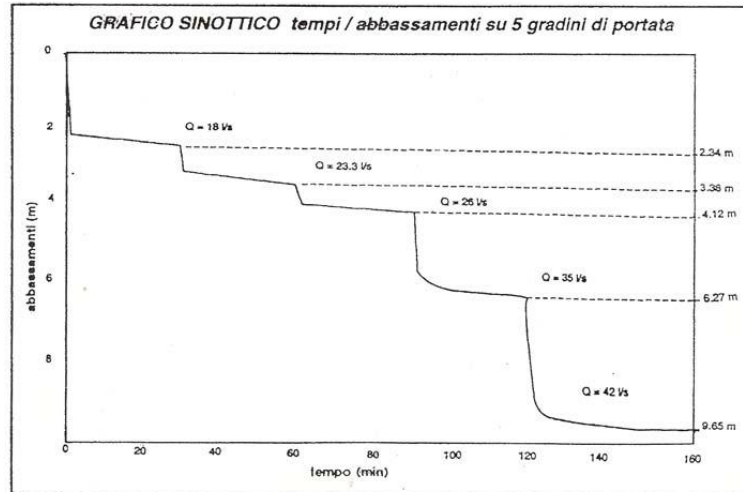
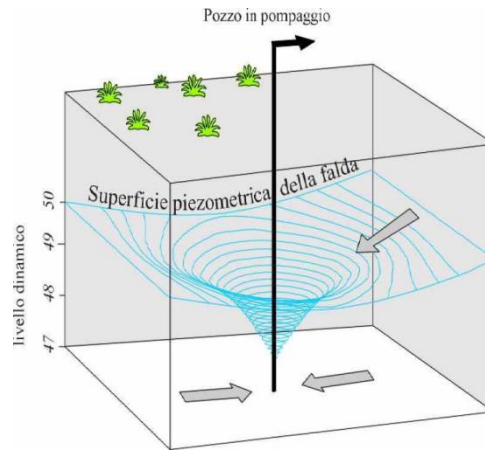


Figura 1 – Esempio di prova a gradini di portata

- **Prove di pompaggio:** finalizzate alla determinazione delle caratteristiche idrauliche dell'acquifero (Figura 2). Queste prove sono molteplici in funzione di economicità e facilità di esecuzione. Le prove consistono nel sottoporre un pozzo ad emungimento, tramite una pompa sommersa od aspirante, e nel misurare gli abbassamenti di falda provocati nello stesso pozzo e/o in piezometri vicini. A seconda del metodo di interpretazione scelto e della tipologia di acquifero, si

costruiscono i grafici che permettono di ricavare i parametri idrogeologici caratteristici dell'acquifero quali conducibilità idraulica (K), trasmissività (T), coefficiente di immagazzinamento (S), raggio di influenza (R).

La determinazione completa di tutti questi parametri necessita che le misure siano eseguite sia sul pozzo in emungimento che su un pozzo di osservazione (piezometro) posto alla distanza massima di 100-300 m (sistema pozzo – piezometro).



**Figura 2 – Prova di pompaggio**

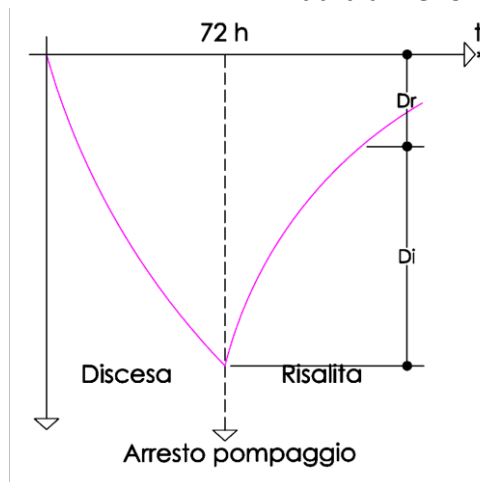
Ci sono diversi metodi di elaborazione per l'acquisizione dei dati idrodinamici; qui di seguito verranno ampiamente illustrati il metodo di Theis e il metodo di Jacob con alcune applicazioni numeriche.

## 1.2 TEORIA DI THEIS

Prelevando da un pozzo una determinata portata si verifica un abbassamento della superficie piezometrica che si propaga a

porzione sempre maggiore di acquifero senza che il cono si stabilizzi.

Quindi, l'effetto del pompaggio si sente in modo radiale e il cono si propaga all'infinito anche se con velocità decrescente. Qui il sistema si trova in condizioni di regime transitorio. Theis ha applicato la sua teoria ad una falda confinata illimitata. Le prove di emungimento che si eseguono seguendo la teoria di Theis sono dette prove di lunga durata. Sono fatte in pozzi di prelievo misurando l'abbassamento dei pozzi vicini e dura almeno 72 ore (Figura 3).



**Figura 3 – Prova di Theis, con  $D_r$  innalzamento residuo,  $D_i$  innalzamento parziale,  $t^*$  ripristino delle condizioni iniziali dopo un periodo di tempo lungo**

La formula di Theis è una funzione integrale esponenziale:

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$$u = \frac{\chi^2 S}{4Tt}$$

(1.1)

Dove  $\Delta$  è l'abbassamento misurato nel pozzo di controllo (m),  $Q$  è la portata di prelievo ( $m^3/s$ ),  $W(u)$  è la funzione del pozzo che ha uno sviluppo in serie,  $T$  è la trasmissione idraulica ( $m^2/s$ ),  $x^2$  indica la distanza tra gli assi dei due pozzi (m),  $S$  è il coefficiente di immagazzinamento,  $t$  indica il tempo trascorso dall'inizio del pompaggio (s).

Per  $x < 150$  m (distanze brevi) e  $t \geq 2$  gg (i tempi più lunghi), i termini dello sviluppo in serie sono trascurabili rispetto ai primi due, quindi la formula di Theis (1) si può scrivere come segue:

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} (-0.577 - \ln u) \quad (1.2)$$

### 1.3 TEORIA DI JACOB

Rappresenta il metodo classico per l'elaborazione dei parametri idrodinamici in regime transitorio da prove di pompaggio. Le soluzioni di calcolo e di visualizzazione grafica dei dati acquisiti sono in funzione della metodologia di rilevamento dei dati ; in particolare si fa riferimento a:

- Metodo curva degli abbassamenti : tale metodo è applicabile quando il sistema pozzo – piezometro è completo e le misure della depressione piezometrica sono effettuate durante il pompaggio della falda, sia nel pozzo in emungimento sia sul piezometro. In un grafico semilogaritmico (Cooper – Jacob) sono state riportate in ascissa logaritmica i tempi di acquisizione ed in ordinata lineare i livelli piezometrici dinamici. La curva che si è ottenuta è stata interpolata e su tale interpolazione sono state eseguite le misure per il calcolo dei parametri idrodinamici;
- Metodo curva della risalita: tale metodo è applicabile al sistema pozzo – piezometro ed al solo pozzo di

pompaggio. Il metodo consiste nel misurare nel tempo i livelli dinamici piezometrici durante la loro fase di risalita conseguente al cessato pompaggio. In un grafico semilogaritmico (Cooper – Jacob) sono state riportate in ascissa logaritmica i tempi  $(t + t')/t'$  dove  $t$  è la durata del pompaggio e  $t'$  è il tempo dall'inizio della risalita, ed in ordinata lineare i livelli piezometrici dinamici. La curva che si è ottenuta è stata interpolata tra i punti e su tale interpolazione sono state eseguite le misure per il calcolo dei parametri idrodinamici.

La teoria di Jacob ha fondamento da quella di Theis (1.1 – 1.2): è infatti una sua semplificazione. Tale teoria è valida con modesta distanza pozzo – piezometro e tempo di pompaggio sufficientemente ampio:

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} (\ln 1.78 + \ln 1/u) \quad (2.1)$$

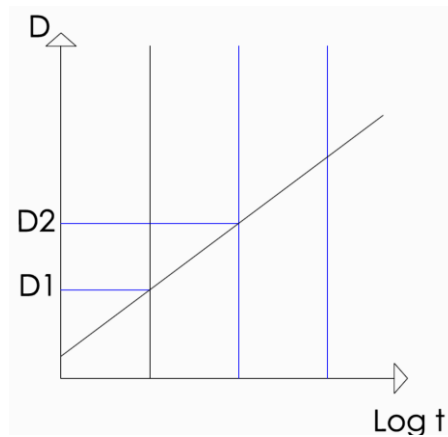
Sostituendo il valore di  $u = \frac{\chi^2 S}{4Tt}$  si ottiene:

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} \left( \ln \frac{4Tt}{1.78\chi^2 S} \right) = \frac{Q}{4\pi T} 2.3 \ln \frac{2.25Tt}{\chi^2 S} = 0.183Q \ln \left( 2.25 \frac{Tt}{\chi^2 S} \right) \quad (2.2)$$

All'aumentare di  $t$  aumentano l'entità dell'abbassamento  $\Delta$  (anche se con velocità decrescente). L'abbassamento che si deve verificare nel pozzo di controllo deve essere inferiore al 20% dello strato dell'acquifero.

La formula di Jacob, appena calcolata, consente di valutare la depressione nel pozzo di controllo a seguito del pompaggio in un pozzo di prelievo in un tempo  $t$ ; siamo in condizioni di **moto transitorio**.

La trasmissività  $T$  si può determinare mediante la curva di discesa (Figura 4), ossia con la pompa in funzione.

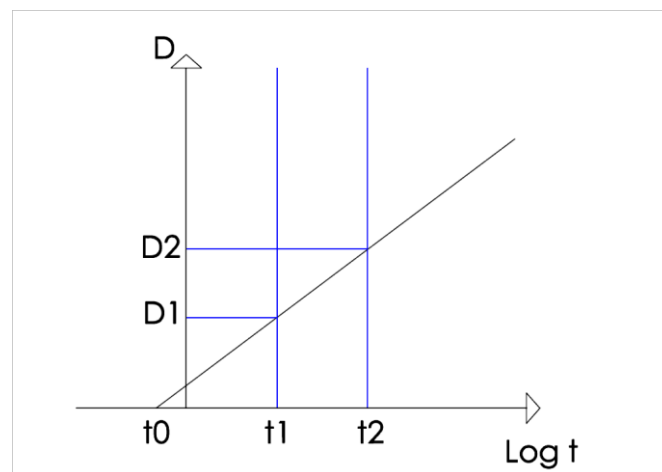


**Figura 4 – Curva di discesa della prova di Jacob**

Dopo pochi minuti si avranno punti che si allineano lungo una retta.

Se  $C = 0.183 Q/T$  prendendo un valore  $t_2 = 10 t_1$ , allora  $C = \Delta_2 - \Delta_1$ . Il coefficiente angolare

della retta è dato e quindi è facile determinare il valore di  $T$ . È possibile anche determinare il valore del coefficiente di immagazzinamento prolungando la retta fino ad incontrare l'asse delle  $x$  (Figura 5).



**Figura 5 – Valutazione del coefficiente di immagazzinamento**

A  $t_0$  corrisponde un abbassamento nullo.

Riepilogando le varie fasi del processo sono quelle presentate in Figura 6:

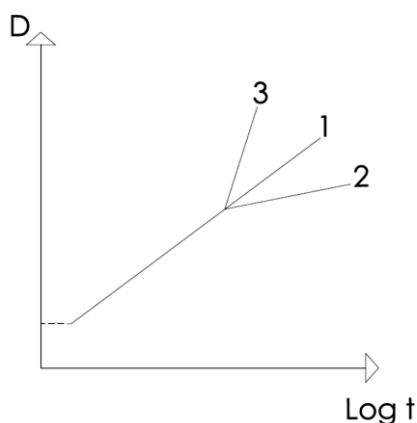


Figura 6 – Fasi della prova di Theis – Jacob

Si emunge l'acqua dal pozzo di prelievo e si effettua il controllo sull'altro, questo procedimento è rappresentato da un andamento parallelo all'asse del  $t$  perché nel pozzo di misura non si ha alcun abbassamento del livello idrico.

Con il procedere del tempo il cono interessa porzioni di acquifero sempre più distanti.

Naturalmente si possono verificare condizioni idrogeologiche diverse:

- Caso 1 : acquifero illimitato; il cono si propaga, le condizioni idrogeologiche non variano. L'acquifero è piuttosto omogeneo come caratteristiche litologiche (permeabilità) e di alimentazione;

- Caso 2 : acquifero con limite di alimentazione; gli abbassamenti si riducono sensibilmente fino ad annullarsi. E' il caso in cui aumenta la permeabilità o c'è un surplus di acqua. Questo tratto non è mai parallelo all'asse delle  $x$ ;
- Caso 3 : acquifero con limite stagno; l'abbassamento si fa sempre più evidente, questo può essere dovuto al contatto con terreni permeabili (faglie o frane).

La trasmissività  $T$  può essere calcolata anche sulla base di due pozzi di controllo allineati con il pozzo di prelievo. I due pozzi sono distanziati rispettivamente di 10 e 100 metri da quello di prelievo (Figura 7):

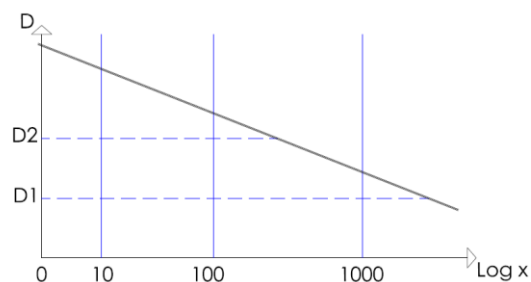
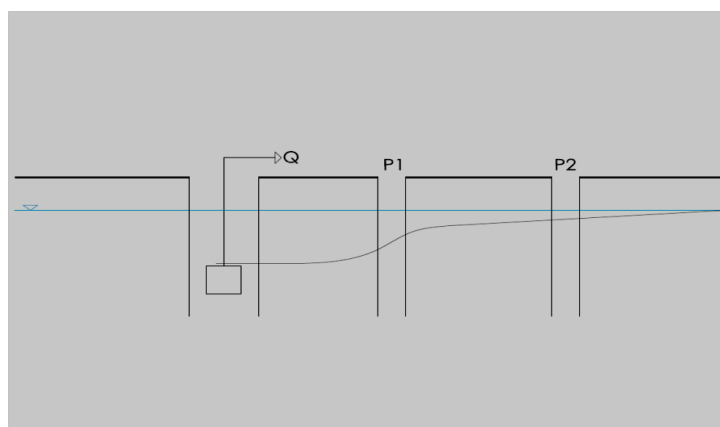


Figura 7 – Determinazione della trasmissività

Questa retta ha come equazione :

$$\Delta_2 - \Delta_1 = 0.183 \frac{Q}{T} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (3)$$

che permette di calcolare il valore della trasmissività (T).

## 1.4 ALCUNI ESEMPI NUMERICI

Gli esempi numerici aiutano a comprendere meglio l'applicazione delle formule.

### 1.4.1 Esempio 1

Le prove di pompaggio in un pozzo installato all'interno di un acquifero vengono condotte in regime transitorio avvalendosi dell'utilizzo di un piezometro posizionato a 10m dal pozzo. La portata di acqua estratta è pari a  $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ , l'abbassamento  $\Delta s$  in un ciclo logaritmico di tempi è pari a 9.15 cm ( 0.0915 m), il raggio di influenza dell'acquifero è pari a 150m.

Calcolare la trasmissività T dell'acquifero.

Calcolare inoltre l'abbassamento d che si otterrebbe nel piezometro dopo 1 ora, 10 ore, 100 ore con un coefficiente di immagazzinamento  $S = 0.0004$ .

#### SOLUZIONE

Attraverso la formula di Jacob è possibile calcolare la trasmissività T:  $s_1 - s_2 = 0.183Q/T \ln(t_2/t_1)$ .

Considerando un ciclo logaritmico, del tipo  $t_2 = 10 t_1 \rightarrow t_2/t_1 = 10$ , si ottiene, per sostituzione:

$$\Delta s = 0.183 Q/T \log (10) = 0.183 Q/T$$

$$\text{E infine: } T = 0.183Q/\Delta S$$

$$T = 0.183 * (0.01 \text{ m}^3/\text{s} / 0.0915 \text{ m}) = 0.02 \text{ m}^2/\text{s}$$

Per calcolare l'abbassamento che si avrebbe nel piezometro si fa sempre riferimento alla relazione di Jacob scritta precedentemente:  $s = 0.183 Q/T \log 2.25Tt/(x^2S)$

In tale relazione è tutto noto, tranne la portata Q che sarà la somma della portata

estratta dal pozzo ( $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e la portata del pozzo stesso ( $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Basta poi sostituire il tempo t in secondi e si ottiene l'abbassamento s che si avrà nel piezometro posto a 10 m di distanza dal pozzo.

$$\text{Per 1 ora} = 3600 \text{ s} \rightarrow s = 0.183 * 0.03/0.02 * \log(2.25 * 0.02 * 3600/100/0.0004) = 0.99 \text{ m}$$

$$\text{Per 10 ore} = 36000 \text{ s} \rightarrow s = 1.26 \text{ m}$$

$$\text{Per 100 ore} = 360000 \text{ s} \rightarrow s = 1,54 \text{ m}$$

### 1.4.2 Esempio 2

Nel corso di una prova di risalita di un pozzo in cui la portata a regime permanente è di  $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ , vengono misurati i seguenti valori di abbassamento (differenza fra il livello misurato e il livello statico):

t	s
s	m
10	5
100	4,94
1000	4,93
10000	4,9
100000	4,86

Calcolare la trasmissività T dell'acquifero.

#### SOLUZIONE

Facendo sempre riferimento alla formula di Jacob, si considera un ciclo logaritmico ( $t_2/t_1$  o  $t_3/t_2...$ ) in modo che  $t_{n+1} / t_n = 10$  e così  $\log 10 = 1$  per semplicità.

I valori di  $\Delta s$  sono diversi, si considera un loro valor medio in modo da ottenere un valor medio di trasmissività per l'acquifero. Pertanto: MEDIA (  $(s_1 - s_2)$ ;  $(s_2 - s_3)$ ;  $(s_3 - s_4)$ ;  $(s_4 - s_5)$ ) = 0.035 m =  $\Delta s$

$$\text{Sostituendo: } T = 0.183 * Q/\Delta s = 0.183 * 0.01 \text{ m}^3/\text{s} / 0.035 \text{ m} = 0.0523 \text{ m}^2/\text{s}$$

Il valore della trasmissività può essere anche valutato con un altro metodo risolutivo.

Se infatti si considera un sistema di assi semilogaritmico, la relazione di Jacob viene rappresentata come una retta con coefficiente angolare :

$$C = \text{tangente } \beta = \Delta \text{ abbassamento} / \Delta \text{ tempo}$$



È possibile, dai dati forniti dal testo, tracciare la retta che rappresenta la relazione di Jacob e calcolarne il coefficiente angolare C dal quale è possibile risalire al valore della trasmissività T.

Se si sceglie un intervallo di tempo adeguato, per esempio da 10 a 100 o da 100 a 1000 in modo che il  $\text{LOG}(10)=1$  e la relazione di Jacob risulta semplificata.

Allora il coefficiente C rappresenta l'accrescimento di depressione (che si verifica in un ciclo logaritmico) e può essere misurato direttamente sul grafico. Pertanto risulta che :

$$C = 0.183 Q/T$$

Quindi noto C dal grafico è possibile risalire tranquillamente al valore di trasmissività.

### 1.4.3 Esempio 3

In un pozzo viene pompata una portata costante pari a  $200 \text{ m}^3/\text{h} = 0.055 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Vengono contemporaneamente misurati gli abbassamenti riportati nella seguente tabella.

TEMPO	ABBASS
s	m
0	8,08
0,017	8,1
0,033	8,13
0,05	8,27
0,07	8,56
0,1	9,33
0,13	9,94
0,17	10,42
0,2	10,8
0,25	11,29
0,3	11,66
0,4	12,21
0,5	12,66
0,67	13,23
0,83	13,77
1	14,17
1,33	14,83
1,84	15,59
2,34	16,17
3	16,8
4	17,7
5	18
6	18,5
7	18,95
9	19,63
11	20,1
15	20,9
19	21,35
25	22,5
31	22,7
37	22,97
45	23,45
53	24,2
61	24,9
69	24,75
71	24,8
71,15	24,85

Calcolare il valore della trasmissività T e del coefficiente di immagazzinamento S dell'acquifero indagato con la formula di Jacob. Il piezometro di monitoraggio è posizionato a 100 m dal pozzo.

Ricavare inoltre l'abbassamento del piezometro ad un anno dall'inizio del pompaggio. ( 1 anno = 31536000 s).

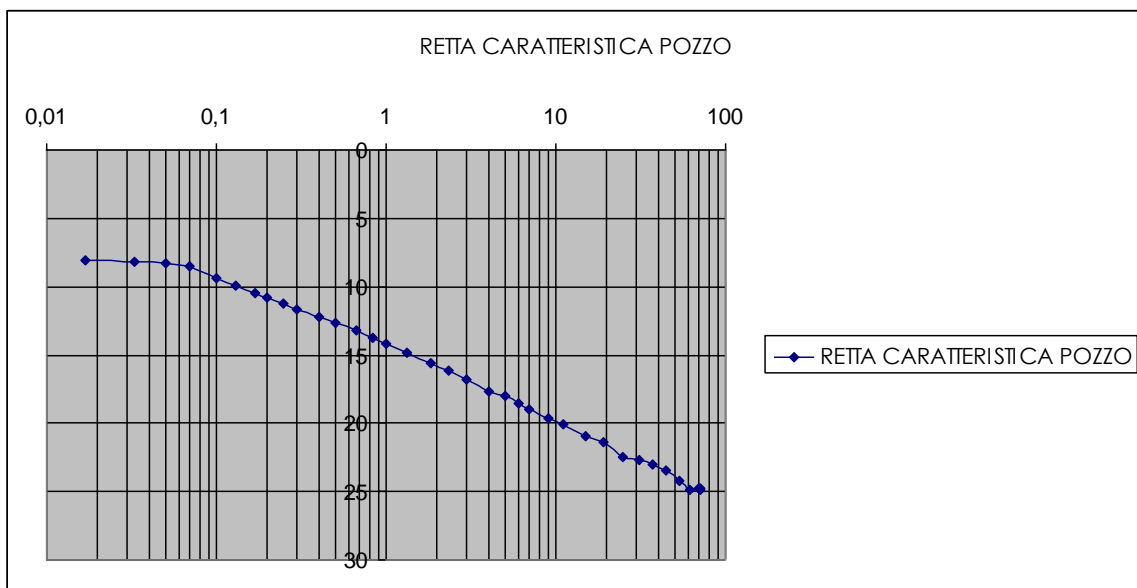
**SOLUZIONE**

I dati sperimentali si riportano su un diagramma semilogaritmico, i valori di tempo t (dall'inizio del pompaggio sull'asse x in scala logaritmica e i valori di Δ abbassamenti nel piezometro sull'asse y. I punti corrispondenti alle coppie si trovano su una retta detta retta caratteristica del pozzo.

Considerando un ciclo logaritmico, per esempio da 0.1 a 1, si avrà che  $t_{n+1} / t_n = 1 / 0.1 = 10$  e così  $\text{Log}(10) = 1$  per semplicità. Quindi la formula di Jacob si semplificherà. A questo punto, il valore di Δs corrisponde al coefficiente angolare della retta caratteristica del pozzo. Quindi :

$$C = \Delta \text{ abbassamento} / \Delta \text{ tempo} = 0.183 Q/T$$

Applicando le formule sopra descritte ai dati sperimentali forniti dal testo, si ottiene un grafico che rappresenta la relazione di Jacob:



Considerando un ciclo logaritmico (tempo da 0.1 a 1 ora) si calcola il coefficiente angolare  $C = 5.03 \text{ m}$

Tramite questo valore è possibile calcolare la trasmissività T :

$$C = 0.183 * Q/T \rightarrow T = 0.183 * Q/C = 0.183 * 0.055 \text{ m}^3/\text{s} / 5.03 \text{ m} = 0.002 \text{ m}^2/\text{s}$$

Il coefficiente di immagazzinamento S si calcola tramite il valore di tempo per cui s=0 (abbassamento nullo), cioè quando la retta caratteristica del pozzo incontra l'asse delle ascisse. Graficamente si ottiene  $t = 0.09 \text{ ore} = 324 \text{ s}$  per abbassamento nullo (s=0).

T è la trasmissività precedentemente calcolata, x è la distanza del piezometro dal pozzo, pari a 110 metri. Nel caso in esame, si

[www.engeology.eu](http://www.engeology.eu)

$$\text{otterrà quindi: } S = 2.25 * 0.002 \text{ m}^2/\text{s} * 324 \text{ s} / (100)^2 \text{ m}^2 = 0.00015$$

Per calcolare l'abbassamento nel piezometro dopo un anno è sufficiente sostituire tutti i dati nella relazione di Jacob e calcolare s:  
 $s = 0.183 * 0.055 \text{ m}^3/\text{s} / 0.002 \text{ m}^2/\text{s} * \text{LOG}(2.25 * 0.002 \text{ m}^2/\text{s} * 31536000 \text{ s} / 0.00015 * (100)^2)$   
 $s = 25.08 \text{ m}$

**1.5 CARATTERISTICHE DEI CONTAMINANTI**

Concentrazione, estensione areale e proprietà chimico-fisiche delle sostanze inquinanti sono dati necessari per un corretto approccio al problema.

È necessario verificare che i risultati delle analisi chimiche su terreni e acque siano conformi ai requisiti normativi, cioè che le analisi siano state effettuate in laboratori accreditati e certificati e che le concentrazioni dei parametri analizzati siano espresse in unità di misura conformi con quelle richieste dalla normativa (D.M. 471/99).

Per la valutazione dell'estensione areale della contaminazione devono essere stati effettuati campionamenti di acque sotterranee e terreni. Esistono diversi tipi di approccio e numerose limitazioni al problema del campionamento, soprattutto per quanto riguarda le acque sotterranee. Si possono infatti scegliere diversi tipi di maglie di campionamento a seconda della complessità del sito e del livello di conoscenza dello stesso:

- nel caso di un sito piccolo, se si conosce la storia pregressa del sito, si può optare per un campionamento mirato, cioè riguardante solo quelle aree ritenute probabile sede di contaminazione. Successivamente si può infittire la maglia per delimitare con maggior precisione l'area contaminata.
- nel caso di un sito esteso, si utilizzano maglie di campionamento regolari, dimensionate a seconda della grandezza dell'area.

Le proprietà delle sostanze (densità, solubilità in acqua, contenuto di carbonio organico nei suoli, parametri di adsorbimento, ecc.) sono rintracciabili in letteratura o tramite test di laboratorio. È fondamentale la conoscenza di tali proprietà per valutare la distribuzione della contaminazione e la sua possibile evoluzione, la mobilità degli inquinanti e per una stima preventiva del tempo necessario per il risanamento del sito.

Tra i composti che si ritrovano frequentemente nelle acque sotterranee si

[www.engeology.eu](http://www.engeology.eu)

individuano due grandi famiglie, in relazione alla densità rispetto all'acqua, costituite da composti poco solubili leggeri (LNAPL densità minore di quella dell'acqua) e densi (DNAPL densità maggiore di quella dell'acqua).

In generale nelle barriere idrauliche e nei sistemi di pump and treat si opera sulla frazione solubile di tali composti, che può comunque arrivare a centinaia di mg/l. Essendo le concentrazioni di interesse di oltre tre ordini di grandezza inferiori ( $\mu\text{g/l}$ ), è evidente l'interesse per l'intervento anche sulla frazione solubile al fine di arrestarne la propagazione a valle, ad esempio verso bersagli costituiti da pozzi di approvvigionamento potabile.

## 1.6 LA CARATTERIZZAZIONE IN FUNZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE DELL'INQUINAMENTO

Il problema principale, nel corso della progettazione delle barriere, consiste nella corretta costruzione del modello concettuale dell'acquifero, che permette di definire l'origine della contaminazione e le modalità con le quali si propaga.

La fonte dell'inquinamento viene stabilita tradizionalmente applicando la classica **metodologia idrogeochimica**: una volta ricostruita la distribuzione dei parametri idrogeologici e idrogeochimici del sottosuolo, si evidenziano le aree in cui le concentrazioni degli inquinanti sono più elevate, e l'andamento della rete di flusso in cui sono inserite. Per lo studio della propagazione degli inquinanti e delle loro modalità di filtrazione, si applicano modelli matematici basati sulla conoscenza di parametri idrodispersivi quali trasmissività, permeabilità, porosità efficace, coefficiente di immagazzinamento, dispersività e diffusività  $i$ .

È quindi necessario introdurre, nelle indagini di caratterizzazione, opportune migliorie e

innovazioni, per una ricostruzione più veritiera della contaminazione.

In particolare, bisogna verificare se l'acquifero interessato dalla contaminazione sia protetto o meno e valutare gli eventuali rapporti di intercomunicazione tra gli acquiferi presenti.

Per questo devono essere presentati dati relativi al tipo, allo spessore e all'estensione dei terreni o rocce costituenti il mezzo saturo e insaturo; i dati devono riguardare la profondità e lo spessore del/degli acquifero/i e la presenza di acquitardo o acquiclude.

Questi dati possono essere presentati come dati di letteratura desunti da carte

- Figura 8), dovuta al marcato sviluppo della contaminazione nella direzione di

flusso.

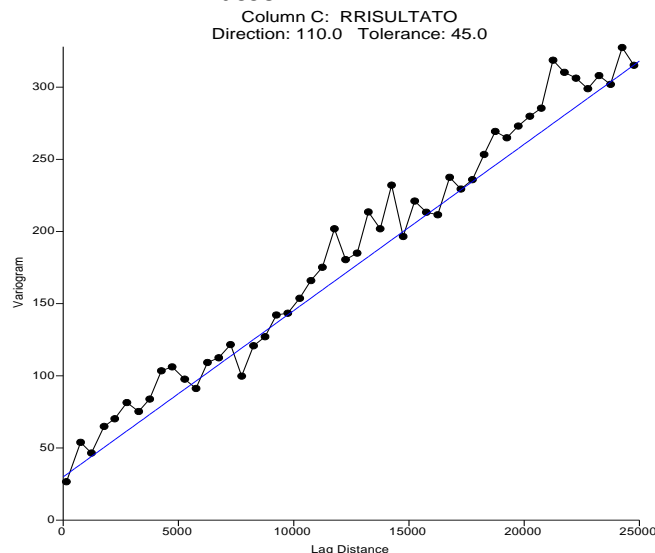


Figura 8 – Variazione della concentrazione di nitrati nelle acque dell'acquifero milanese.

- Metodi geofisici, con i quali si può ricostruire la struttura del sottosuolo; essendo metodi indiretti e soggetti ad interpretazione, devono essere tarati sulla base di almeno una stratigrafia.

Molto importante risulta anche il posizionamento dei punti di indagine e controllo.

idrogeologiche e da carte geologiche. Possono essere integrati con stratigrafie di sondaggi (se sono stati eseguiti durante la fase di caratterizzazione del sito), o di pozzi preesistenti.

Inoltre possono essere effettuate:

**Analisi geostatistiche: qualora sia presente un inquinamento, questo può essere identificato attraverso l'analisi variografica della struttura spaziale delle concentrazioni. Il variogramma della concentrazione degli inquinanti nell'acquifero, orientato nella direzione di deflusso della falda, rivela una buona correlazione spaziale tra i dati (**

Si seguono essenzialmente due procedure che consistono nella realizzazione di una rete di punti di controllo statici o dinamici.

- Per quelli statici si stabilisce una rete di piezometri disposti in modo da garantire omogeneità di distribuzione e distanza reciproca ottimale per l'identificazione di inquinamenti diffusi, concentrati o strutturati in pennacchi;
- Per quelli dinamici, i piezometri possono funzionare anche da pozzi di

prelievo, assorbendo acqua da un largo fronte di richiamo. In tal modo il chimismo risulta rappresentativo di un'area molto più estesa di quella del monitoraggio statico.

Si sono inoltre evidenziate esigenze di un approfondimento dei seguenti aspetti:

- a) Definizione dell'estensione e della profondità degli acquiferi da coinvolgere nelle prospezioni;

- b) Identificazione degli acquiferi, delle fonti di inquinamento e dei bersagli di interesse.

Classico esempio di errore di caratterizzazione è la mancata rilevazione di un paleo alveo (Figura 9) permeabile, per carenza di prospezioni geognostiche; i contaminanti possono dirigersi verso i bersagli tramite il paleolaveo.

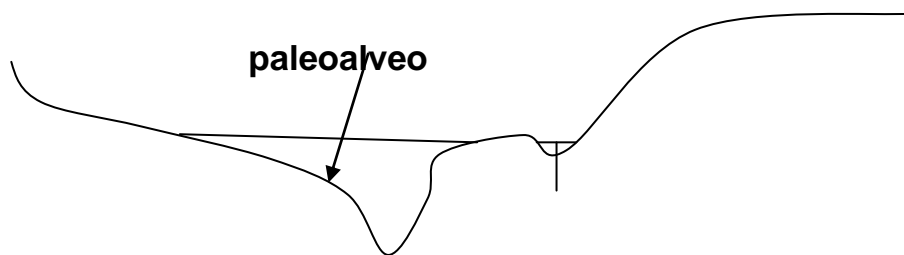


Figura 9 – Raffigurazione di un paleoalveo

Oltre alle indagini elencate in precedenza, che hanno portato a una rilevante riqualificazione delle tecniche di studio, l'efficacia dei progetti può essere ulteriormente migliorata tenendo conto di alcuni fattori ancora poco studiati, quali :

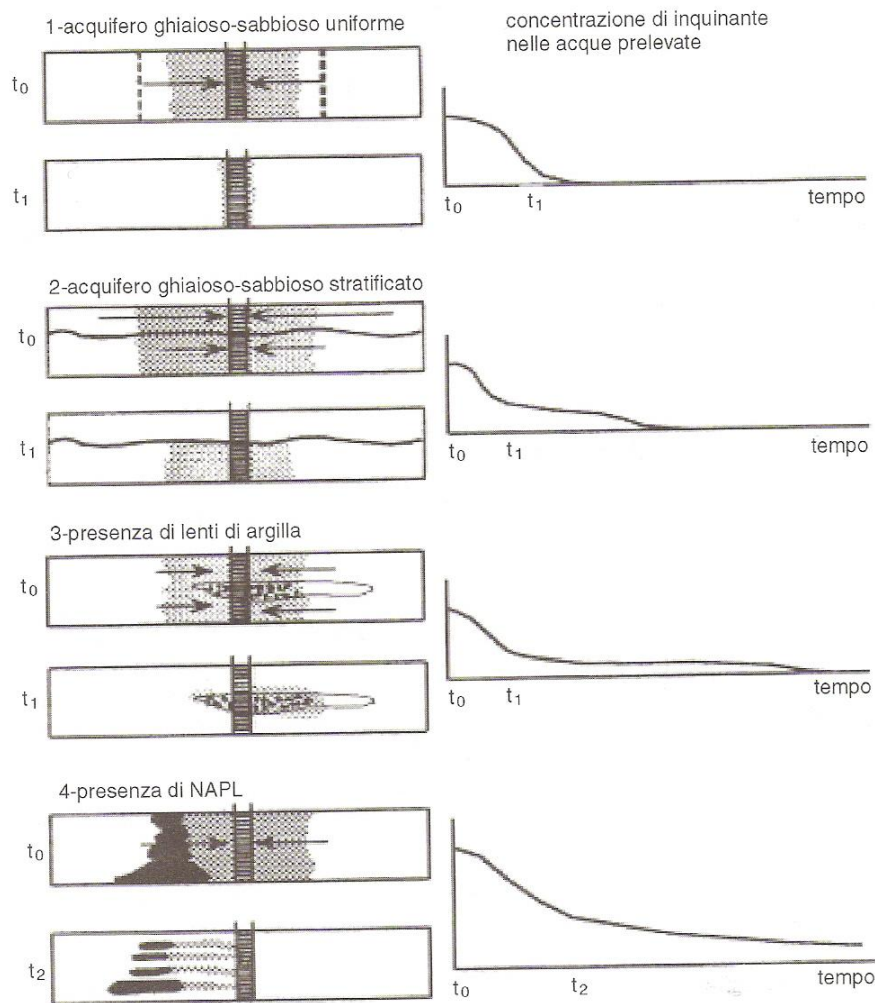
- a) Riconoscimento delle velocità con le quali avviene il trasporto dei contaminanti verso i bersagli e del tempo impiegato a raggiungerli;
- b) Individuazione dei bersagli più esposti alle contaminazioni.

È quindi indispensabile ricostruire con precisione la dinamica dell'inquinamento, evidenziando i percorsi più favorevoli alla sua propagazione e quelli che sviano o ritardano il suo sviluppo.

La conoscenza della struttura idrogeologica dell'acquifero è molto importante soprattutto durante il pompaggio: nel caso di terreni fini, quindi poco permeabili, possono manifestarsi fenomeni di adsorbimento dei contaminanti alla matrice solida pregiudicando così il raggiungimento degli obiettivi finali di risanamento.

Ma anche nel caso di terreni con elevata permeabilità possono manifestarsi problemi legati a condizioni di eterogeneità e anisotropia che possono limitare l'efficacia degli interventi.

Nella seguente Figura 10 si osserva come la diminuzione della concentrazione dell'inquinante nel tempo avviene in modalità diverse a seconda della struttura idrogeologica presente nel sottosuolo.



**Figura 10 – Propagazione della contaminazione nel sottosuolo**

Ma quali sono le principali difficoltà per la ricostruzione corretta della struttura idrogeologica?

1. La **piezometria** non rappresenta spesso in modo sufficiente il fatto che nell'area di studio si realizzano afflussi o deflussi molto influenti per la correttezza dei calcoli. Il fatto che la piezometria non rappresenti un mezzo sempre valido per valutare la portata

delle falde, può essere accertato in base a un semplice esempio.

La portata di una maglia di una falda radiale può essere espressa dalla relazione:

$$Q = \alpha T(H-h)/(l \ln a/b) \quad (4)$$

dove T = trasmissività, H e h livelli piezometrici dei lati b ed a della maglia,  $\alpha$  = angolo di apertura della maglia (Figura 11).

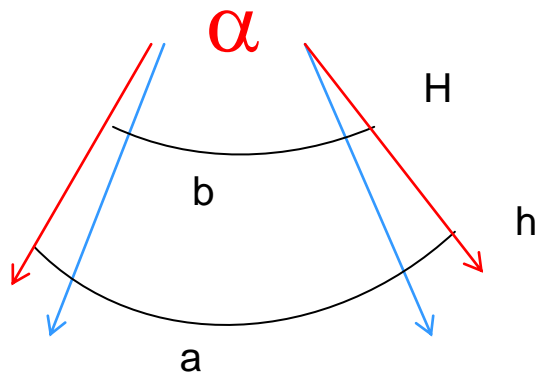


Figura 11 – Reticolo idrografico

Si osserva che la  $Q$  è direttamente proporzionale ad  $\alpha$ ; pertanto l'ingresso di una portata  $Q'$  nella maglia, sommandosi a  $Q$ , determina un modesto aumento del gradiente e un allargamento della maglia (nuova ampiezza  $\alpha'$ ).

I rilievi piezometrici normalmente non permettono di rilevare tali modeste variazioni: infatti i dati che si possono ricavare ordinariamente sui livelli dei pozzi, sia per la distanza fra i punti di misura, sia per l'irregolarità della superficie piezometrica, non hanno precisione sufficiente.

Pertanto la piezometria non sempre costituisce uno strumento valido per individuare i punti in cui avviene la ricarica

della falda o dove si verificano perdite verso altri corpi idrici.

2. Gli **acquiferi** abitualmente presentano importanti variazioni della velocità di flusso sulla verticale. Tali variazioni sono state messe in evidenza da studi operati sulle barriere idrauliche. Nell'esempio riportato nella seguente Figura 12, nonostante la piezometria mostri un'apparente chiusura totale ad opera delle barriere, i pozzi MW7 e MW131 sono contaminati. Tale effetto è determinato dal fatto che una parte dei filetti liquidi inquinati si sposta con velocità superiori alla media, e non è quindi interamente richiamata dal pozzo, dimensionato con il valore della  $k$  media ricavato dalle prove.

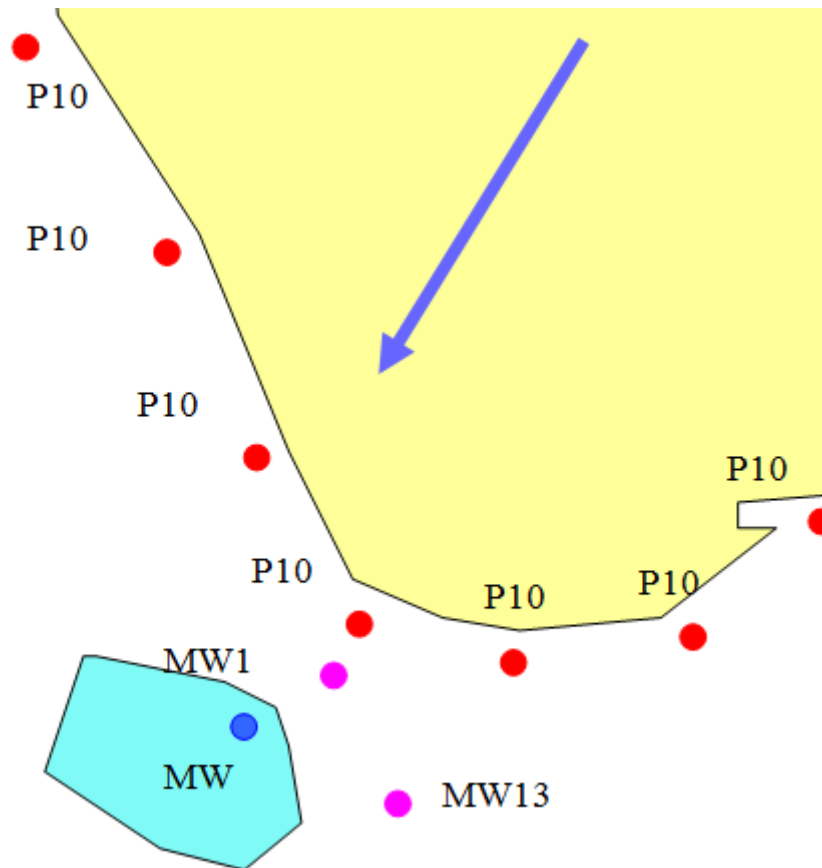


Figura 12 – Esempio di barriera idraulica

3. La **struttura idrogeologica** non è talora ricostruibile con sufficiente precisione, per la presenza di strutture inattese (vie di maggiore permeabilità, livelli poco permeabili) che fanno variare in modo determinante il flusso previsto. Qui di seguito si riportano due diversi casi che si possono realmente incontrare: effetto di lenti con permeabilità inferiore e lenti con permeabilità superiore.

Effetto di lenti con permeabilità inferiore: la presenza di lenti poco permeabili può impedire l'afflusso di acque ai filtri dei pozzi, rallentando quindi la velocità del flusso idrico in alcune parti dell'acquifero: le velocità non risultano identiche sulla verticale, e si avranno filetti liquidi più veloci ed altri più lenti.

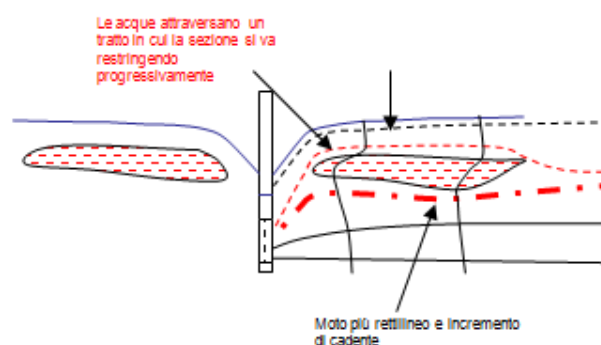


Figura 13 – Effetto di lenti a permeabilità inferiore



I calcoli per la progettazione della barriera devono quindi essere condotti in modo da evidenziare le equipotenziali, le linee di flusso, e le velocità di spostamento delle particelle d'acqua, con opportuni step temporali. Ciò consente di controllare l'effettivo comportamento dell'inquinamento.

Anche se non è possibile definire con relazioni analitiche questo comportamento, si osserva che in questo caso si avrà una portata pari o molto simile a quella

calcolabile utilizzando la relazione di Dupuit per il tratto basale finestrato al disotto del livello poco permeabile, e una velocità delle particelle mediamente simile a quella data da Dupuit, ma tale per cui quelle superficiali si spostano a velocità pari a circa un terzo di quelle immediatamente al disopra del livello poco permeabile.

Effetto di lenti a permeabilità superiore:  
avviene il fenomeno inverso.

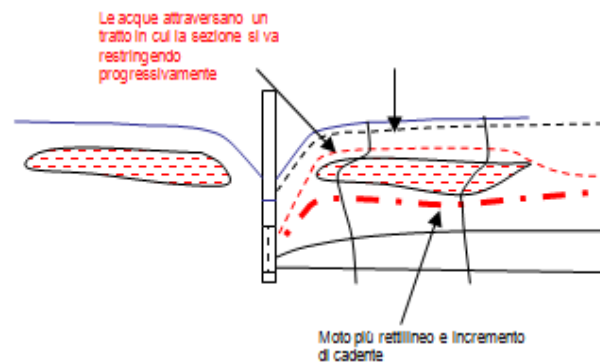


Figura 14 – Effetto di lente a permeabilità superiore

È pertanto importante eseguire una valutazione, ad esempio con slug-test, delle variazioni di permeabilità lungo la verticale, in modo da evidenziare le maggiori variazioni di permeabilità.

Con opportuni programmi di calcolo è inoltre possibile valutare l'anisotropia dal rapporto fra permeabilità verticale e orizzontale.

Questi parametri inseriti in un codice di calcolo affidabile possono restituire bene l'andamento delle velocità sulla verticale.

4. Importanza del **grado di interconnessione dell'acquifero**: le portate di un sistema idrogeologico sono sempre maggiori quanto più alto è il grado di interconnessione che lo caratterizza, cioè quanto più elevato è il valore della k equivalente o di sistema.

Infatti la **k equivalente** è data dal prodotto : (teoria della percolazione)

$$(g\rho/\eta)*4 \pi \phi a r^2/ 15s \quad (5)$$

in cui g è l'acc. di gravità, ρ la densità del fluido, η la sua viscosità dinamica, a l'apertura efficace, s la spaziatura media, φ la frequenza di percolazione, r = rapporto fra il doppio della lunghezza delle discontinuità e π.

Il valore della frequenza di percolazione, compreso fra 0 e 1, è dato dalla relazione:

$$\phi \approx 54(p - p') \quad (6)$$

in cui

$$p = \pi^2 r^3/4s^2, p' = 1/(z-1) \quad (7)$$

dove z = numero delle vie di percolazione che si dipartono da un unico nodo.

Pertanto, ai fini della valutazione della Q di un sistema acquifero, è necessario calcolare le k equivalenti nei diversi sottosistemi interconnessi con quello principale.

In un sistema a rete, il fenomeno è di più difficile identificazione con le normali prospezioni idrogeologiche, data la complessità di queste strutture, ma può assumere rilevanza particolare crescendo l'estensione dei sistemi interconnessi con quello principale.

Nel caso di acquiferi isolati, rispetto a quello principale la risposta dell'acquifero alla contaminazione esistente nel sistema principale e il tempo di propagazione di un incremento di livello piezometrico è ostacolato dalla ridotta trasmissività.

Infatti la distanza  $x$  alla quale si propaga nel tempo  $t$  una variazione di pressione è data da:

$$X = 1,15 (Tt/S)^{0,5} \quad (8)$$

Per esempio, con i seguenti valori :

$T = 0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $t = 10.000 \text{ s}$ ,  $S = 0,0001$ ,  $X$  è pari a  $X = 1,15 * 100 = 115 \text{ m}$ ; invece con  $T = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $X = 1,15 * 1000 = 1150 \text{ m}$ . Pertanto la distanza raggiunta dalla variazione di pressione risulta dieci volte superiore.

Gli acquiferi isolati rispondono quindi meno rapidamente alla variazione di pressione, e

ricevono meno apporti dagli incrementi della stessa.

Negli acquiferi direttamente connessi con l'acquifero principale i tempi di trasferimento sono ridotti, mentre negli acquiferi isolati aumentano grandemente. È quindi necessario evidenziare correttamente queste parti del sistema acquifero per individuare le possibili distribuzioni delle velocità nonché i tempi di propagazione della depressione piezometrica prodotta dalla barriera idraulica.

Con la distanza, l'entità della variazione piezometrica  $s$  imposta dal prelievo in un pozzo, varia con il logaritmo del quadrato dell'inverso della distanza, quindi si riduce progressivamente con l'aumentare di  $x$  e con la diminuzione della  $T$ :

$$s = (0,183Q/T) \log (Tt/x^2S) \quad (9)$$

Negli acquiferi separati da grande distanza e da livelli di bassa trasmissività da quello in cui si manifestano le variazioni piezometriche importanti, se la causa che ha prodotto la variazione piezometrica è di breve durata, essa lascia tracce ridotte su questo tipo di sistemi, e si manifesta solo come un'oscillazione di breve durata e intensità.

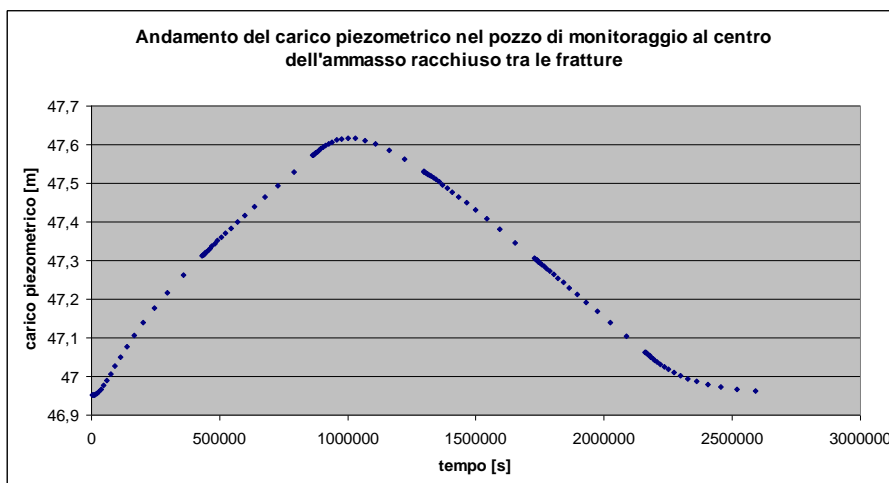


Figura 15 – Andamento del carico piezometrico nel pozzo di monitoraggio al centro dell'ammasso racchiuso tra le fratture

Il grafico in Figura 15 riporta l'andamento del carico nei pozzi di monitoraggio. Nel caso di acquiferi interconnessi il fenomeno è prolungato nel tempo, nel caso di acquiferi isolati risulta meno evidente e ancora più lento.

Nelle aree industriali, non tutte le contaminazioni risultano strutturate in "plumes". Frequentemente, per motivi connessi con la lentezza del moto delle acque sotterranee, o per la scarsa permeabilità dei terreni o per il basso gradiente idraulico o, più spesso, per l'elevato fattore di ritardo dei contaminanti, i pennacchi non si possono formare.

In questi casi, si ha la tendenza degli inquinanti a espandersi verso il basso, e a dar luogo a impregnazioni dell'acquifero inferiore di limitate dimensioni e concentrazione molto alta.

In terreni eterogenei, dove un aquitardo separa due falde, è possibile il passaggio di contaminanti attraverso le vie di maggiore permeabilità dell'aquitardo, in punti localizzati.

L'entità della drenanza è ricavabile dalla relazione:

$$D = kA(\Delta h)/b \quad (10)$$

in cui A superficie della depressione piezometrica della seconda falda,  $\Delta h$  il dislivello piezometrico medio.

Nei punti di contatto con l'acquifero sottostante, hanno origine modesti nuclei di contaminazione tra loro separati, di localizzazione molto difficoltosa.

Nel modello concettuale è opportuno porre in evidenza le aree dalle quali avviene il passaggio di contaminante dalla falda superiore a quella inferiore, per consentire al progettista gli interventi più idonei e per valutare l'esposizione all'inquinamento delle diverse parti dell'acquifero.

## 1.7 ACCERTAMENTO DI INTERCONNESSIONE E TRASMISSIVITÀ EQUIVALENTI

Al fine di determinare con sufficiente chiarezza le portate circolanti nelle diverse parti dell'area coinvolta, si presta bene il metodo delle barriere di pozzi, che permette di calcolare sia le portate  $q$  per metro di larghezza della sezione di flusso (dalla somma di quelle estratte dai pozzi e dalla delimitazione mediante piezometria del fronte di richiamo, si ha  $\sum Q/F = q$ ), sia il valore della massa di contaminante, dato dalla media ponderata delle concentrazioni moltiplicata per il volume di acqua estratto.

Il valore di  $q$  consente di determinare quello della  $T$  dell'area indagata dalla relazione

$$T = q/j \quad (11)$$

La sperimentazione compiuta sulle barriere idrauliche fa ritenere utile un'integrazione delle tecniche usuali mediante:

- a) l'approfondimento degli studi per la delimitazione delle aree coinvolte negli interventi, in modo da evitare che importanti settori del sistema (es. le falde profonde) vengano trascurati;
- b) La verifica del grado di interconnessione degli acquiferi con quello principale, in quanto alcune delle proprietà del sistema (ad esempio la portata) dipendono sensibilmente da tale parametro;
- c) La delimitazione degli acquiferi isolati o scarsamente interconnessi che, per la lunghezza dei tempi di reazione ai prelievi, necessitano di accorgimenti appositamente studiati.

Impiegando un certo numero di pozzi è possibile registrare su grafici la distribuzione nel tempo delle concentrazioni in arrivo a ciascuno di essi (Figura 16).

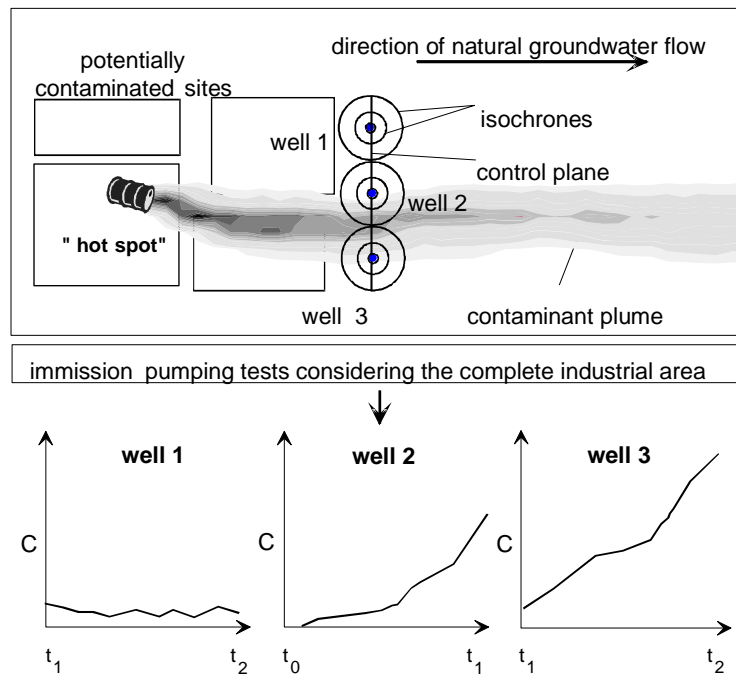


Figura 16 – Utilizzo di pozzi per analizzare la distribuzione delle concentrazioni nel tempo

Molto importanti sono anche le fasi di determinazione dell'inquadramento geologico e di flusso della falda. In questo modo si avranno tutti i dati necessari da

introdurre nella relazione di Schwartz che portano a definire la distanza dalla quale pervengono gli inquinanti ai pozzi:

$$C(r(ndt)) = \frac{\pi M(ndt) - \sum_{i=1}^{n-1} 2M(idt) \left[ \arccos\left(\frac{r((i-1)dt)}{r(ndt)}\right) - \arccos\left(\frac{r(idt)}{r(ndt)}\right) \right]}{2dtQ \arccos\left(\frac{r((n-1)dt)}{r(ndt)}\right)} \quad (12)$$

La determinazione della provenienza delle contaminazioni può essere risolta con tecnologie quali l'idrogeologia isotopica e il fingerprinting.

Quest'ultima tecnica permette di distinguere, in base alla composizione della miscela di idrocarburi presenti in falda, alle loro caratteristiche isotopiche e alle variazioni delle specie chimiche presenti, la distribuzione spaziale dei contaminanti e identificarne il percorso e la provenienza.