

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE E GEOTECNICA DEL POLITECNICO DI TORINO
DIPARTIMENTO DI GEORISORSE E TERRITORIO DEL POLITECNICO DI TORINO**

**CON IL PATROCINIO DI:
INTERNATIONAL SOCIETY OF
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING
ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA**



**CONFERENZE DI GEOTECNICA DI
TORINO
XVIII CICLO
20 – 21 – 22 NOVEMBRE 2001**

POLITECNICO DI TORINO – AULA MAGNA – CORSO DUCA DEGLI ABRUZZI, 24 – 10129 TORINO

**INDAGINI IN SITO PER LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA
ED AMBIENTALE DEL SOTTOSUOLO
SITE INVESTIGATIONS FOR THE MECHANICAL AND
ENVIRONMENTAL CHARACTERIZATION OF SUBSOIL**

CARATTERIZZAZIONE DI ACQUIFERI CONTAMINATI

A. DI MOLFETTA, R. SETHI

Politecnico di Torino

1. PREMESSA

Solo negli ultimi anni è maturata la sensazione che anche nel nostro Paese cominci a svilupparsi una coscienza ambientale che, favorita da un adeguamento normativo derivante in gran parte dal recepimento di direttive comunitarie, rappresenta la speranza maggiore perché si realizzi un'inversione di tendenza nel binomio sviluppo economico - degrado ambientale. Ma se questa è una concreta speranza per ciò che riguarda il presente e il futuro, è indubbio che il passato ci abbia consegnato una moltitudine di siti contaminati, il cui censimento, sicuramente non esaustivo, fotografa parzialmente il contesto ambientale del nostro territorio. Naturalmente, il grado di contaminazione e di pericolosità dei vari siti varia enormemente passando da situazioni caratterizzate da fenomeni estremamente localizzati e facilmente recuperabili, alle grandi criticità rappresentate dai 15 siti di interesse nazionale.

In alcuni casi la contaminazione riguarda solo la matrice suolo - sottosuolo, ma nella maggioranza dei casi i contaminanti, se non altro per l'azione di dilavamento delle precipitazioni meteoriche, hanno raggiunto anche l'acquifero sottostante, interessando la matrice acque sotterranee e innescando processi di propagazione che possono comportare gravi rischi per la salute dei soggetti esposti, talora anche a distanze considerevoli rispetto alla sorgente di contaminazione.

La disciplina delle procedure e delle modalità di intervento per la messa in sicurezza, la bonifica ed il ripristino ambientale dei siti inquinanti è oggetto del D.M. 25 ottobre 1999, n. 471, emesso ai sensi dell'art. 17 del D.Lgsvo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modificazioni. Ogni intervento deve essere effettuato sulla base di una specifica progettazione che si articola nei tre livelli di approfondimenti tecnici progressivi, definiti (art. 10): Piano della caratterizzazione, Progetto preliminare e Progetto definitivo.

E' evidente che la qualità della progettazione e l'efficacia dell'intervento sono legati alla validità ed alla completezza del Piano di caratterizzazione che deve:

- verificare l'esistenza, il grado e l'estensione volumetrica dell'inquinamento nelle varie matrici ambientali;
- individuare le vie di propagazione degli inquinanti, la localizzazione dei soggetti potenzialmente esposti e le vie di esposizione;
- caratterizzare le matrici ambientali interessate dalla presenza delle sorgenti contaminanti e dai fenomeni di migrazione, in maniera da "ottenere i parametri necessari a condurre nel dettaglio l'analisi di rischio".

L'Allegato 2 e l'Allegato 4 al D.M. 471/99 forniscono alcune utili indicazioni sul contenuto del Piano di caratterizzazione, sulla sua articolazione e sugli elaborati che devono essere prodotti. In altri termini, negli Allegati citati vengono precisati gli obiettivi e i contenuti del Piano, demandando alla responsabilità ed alla competenza dei progettisti la individuazione delle metodologie e delle tecnologie da utilizzare per conseguire i risultati attesi. Tenuto conto che le attività conoscitive coinvolte in un Piano di caratterizzazione sono costose e complesse, in particolare quando risulta coinvolta la matrice acque sotterranee, si è ritenuto utile fornire, nel presente lavoro, un contributo metodologico per la caratterizzazione di un acquifero contaminato.

Caratterizzare un acquifero contaminato significa determinare tutti gli elementi e i parametri necessari a:

- a) caratterizzare l'acquifero (determinazione della tipologia idraulica e dei parametri idrodinamici dell'acquifero);
- b) caratterizzare la contaminazione (determinazione della tipologia dell'inquinamento e della sua estensione volumetrica).

Le ipotesi assunte a fondamento dello sviluppo del lavoro sono che la raccolta e l'analisi dei dati esistenti abbia già consentito di definire l'inquadramento geologico e idrogeologico del sito e la tipologia dei contaminanti presenti, oltre agli elementi elencati alla voce "I.1) Raccolta e

sistematizzazione dei dati esistenti” dell’Allegato 4 al D.M. più volte citato.

Partendo da tali assunzioni, il lavoro sviluppa le due fasi fondamentali di caratterizzazione dell’acquifero e di caratterizzazione della contaminazione.

2. CARATTERIZZAZIONE DI UN ACQUIFERO

Caratterizzare un acquifero significa conoscere la tipologia idraulica e determinare le condizioni al contorno e i valori dei parametri idrodinamici.

La metodologia più affidabile per raggiungere con la richiesta affidabilità tale obiettivo è costituita dalle prove di falda, che - d’altra parte - rappresentano l’unico approccio oggettivo per valutare la tipologia idraulica e l’effetto di alcune condizioni al contorno (Di Molfetta, 1995).

Le prove di falda sono prove di pompaggio eseguite in regime transitorio, dal momento che il coefficiente di immagazzinamento e la porosità efficace non giocano alcun ruolo nel rilascio dell’acqua dal mezzo poroso in regime di equilibrio e, conseguentemente, non possono essere determinati mediante una prova eseguita in flusso stazionario, anche se di maggior onere temporale ed economico.

Dal punto di vista operativo, vedasi Fig. 1, le prove di falda possono essere eseguite:

- *a portata costante*, misurando il conseguente declino di livello in funzione del tempo (prova di falda in declino o a carico idraulico decrescente);
- *a portata nulla*, ottenuta arrestando il pompaggio successivamente ad un periodo di erogazione a portata costante e misurando la conseguente risalita del livello in funzione del tempo, fino a recuperare il livello indisturbato (prova di risalita o di recupero);
- *a portata variabile*, ottenuta facendo avvenire una variazione istantanea di livello in pozzo e misurando in funzione del tempo il ripristino del livello indisturbato (*slug test*).

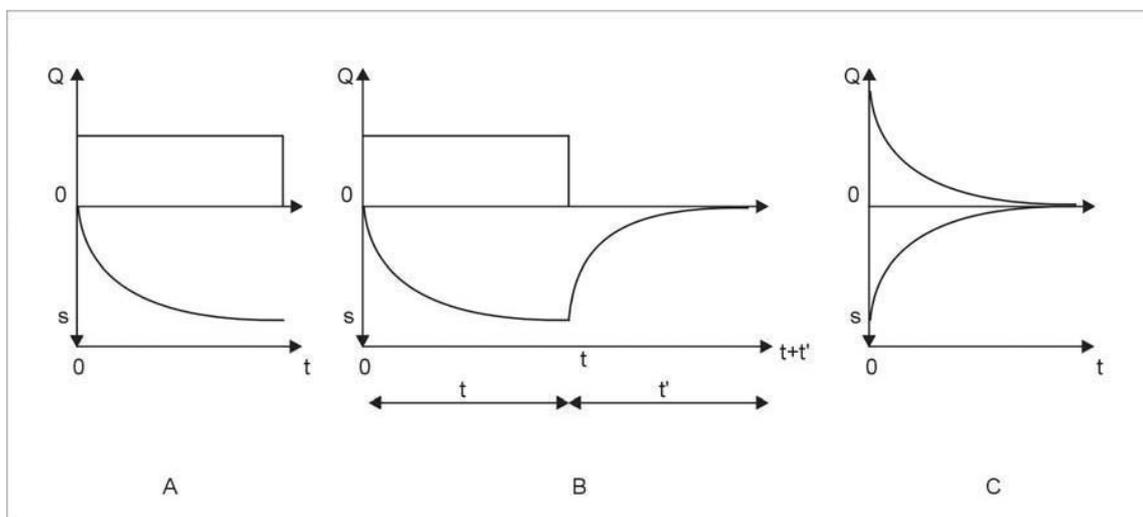


Fig. 1: Modalità di esecuzione delle prove di falda: A) a portata costante, o prova in declino, B) prova di risalita, C) slug test.

Le prove di falda possono coinvolgere un solo pozzo oppure, in aggiunta, uno o più punti di osservazione (prove a pozzo singolo o prove multi-pozzo). Nel primo caso, la variazione di livello indotta dal pompaggio o dall’arresto dell’erogazione o dalla variazione istantanea di livello viene misurata nel pozzo stesso (pozzo attivo); nel secondo caso, invece, la variazione di livello idrico

viene misurata in uno o più punti di osservazione (pozzi o piezometri), diversi e distanti dal pozzo attivo.

Le prove di falda in declino o in risalita sono preferibilmente prove multi-pozzo; è possibile realizzarle a pozzo singolo unicamente se non esiste l'opportunità di utilizzare un punto di osservazione diverso dal pozzo attivo: in questo caso, infatti, l'inosservanza di alcune delle ipotesi che sono alla base delle soluzioni analitiche dell'equazione di diffusività, utilizzate per l'interpretazione della prova, rendono più difficile la stessa. Per contro, maggiore è il numero di punti di osservazione, di cui si può disporre in una prova di falda, maggiori sono l'affidabilità dell'interpretazione e il numero di informazioni ricavabili.

Le prove di falda con variazione istantanea del livello idrico in pozzo (slug test) sono invece prove a pozzo singolo che, pur fornendo un numero limitato di informazioni rispetto alle prove multi-pozzo, consentono di determinare la conducibilità idraulica orizzontale dell'acquifero.

2.1 Pianificazione di una prova di falda

La realizzazione di una prova di falda comporta la pianificazione di una serie di decisioni operative concernenti la scelta del sito, le caratteristiche del pozzo attivo, le caratteristiche dei punti di osservazione, la durata delle prove, le apparecchiature di misura, la frequenza e le modalità di misura.

La sottovalutazione di taluni aspetti operativi, alcuni dei quali possono apparire scontati, può inficiare i risultati dell'intera prova.

2.1.1 La scelta del sito, intesa come individuazione del sito più idoneo per la realizzazione di una prova di pompaggio di cui siano stati fissati gli obiettivi, è limitata a quei casi in cui la realizzazione della prova comporta la preliminare realizzazione delle opere di captazione e/o osservazione. Tale situazione è frequente nei casi di caratterizzazione di un acquifero contaminato, data l'importanza economica dell'intervento da compiere, mentre in altre situazioni il sito è già individuato, essendo legato alla disponibilità di un pozzo esistente, ed in questo caso le considerazioni che seguono vanno intese solo come verifica dell'idoneità del sito.

Il sito ideale è un sito facilmente accessibile, significativo dell'area che si vuole studiare, lontano da disturbi che possono mascherare o alterare i segnali registrati durante la prova (presenza di altri pozzi in esercizio, vicinanza di fonti di vibrazione quali ferrovie o strade di grande comunicazione). Esso deve essere, inoltre, distante da limiti idrogeologici (impermeabili, drenanti o alimentanti), a meno che la loro caratterizzazione costituisca uno degli obiettivi della prova, e soprattutto deve consentire l'allontanamento dell'acqua emunta a distanza superiore al raggio di influenza della prova, per evitare che la stessa, infiltrandosi nel sottosuolo, alimenti la falda influenzando il cono di drenaggio indotto dal pompaggio.

2.1.2 Se il pozzo attivo è già esistente, è indispensabile che si conosca la colonna litostratigrafica dei terreni attraversati e la geometria del completamento (diametro della colonna di rivestimento; profondità; numero, tipologia e posizione degli elementi finestrati), essendo elementi conoscitivi indispensabili per una corretta interpretazione della prova.

Se il pozzo, invece, deve essere appositamente realizzato, sarà opportuno progettarlo con un diametro compreso nel campo 300-500 mm, "finestrando" tutto lo spessore saturo dell'acquifero (pozzo completo), onde realizzare una delle condizioni teoriche che facilitano l'interpretazione della prova. Qualora considerazioni economiche o tecniche impediscano di realizzare un pozzo completo, sarà indispensabile, comunque, conoscere perfettamente la geometria definitiva per tenerne conto in fase di interpretazione.

Ad eccezione del caso in cui ci si limiti ad eseguire uno *slug test*, il pozzo dovrà essere attrezzato con una pompa ed un eventuale gruppo elettrogeno (se non esiste l'allacciamento alla rete elettrica o se la potenza disponibile è insufficiente) perfettamente efficienti, in grado di mantenere costante la portata erogata durante tutto l'intervallo temporale prefissato.

2.1.3 Ad eccezione degli *slug tests* che richiedono la disponibilità del solo pozzo attivo, le altre prove di falda, essendo tipicamente prove multi-pozzo, richiedono l'idoneità delle caratteristiche dei punti di osservazione nei quali l'effetto indotto dal pompaggio (o dal suo arresto) viene misurato, ad una distanza r dal pozzo attivo.

Come punti di osservazione potranno essere utilizzati piezometri o pozzi già esistenti, purché completati nello stesso acquifero del pozzo attivo, con caratteristiche geometriche note, e ubicati ad una distanza dal pozzo attivo tale da consentire la misura di abbassamenti significativi e sufficienti per una interpretazione affidabile. Tale distanza dipende, oltre che dalla portata erogata e dalla durata della prova, dalla tipologia dell'acquifero e dalla sua trasmissività. Fondamentale è l'influenza della tipologia dell'acquifero che condiziona l'ordine di grandezza del coefficiente di immagazzinamento: sarà difficile misurare un numero di dati significativi a distanze maggiori di 100 m per gli acquiferi non confinati o di 400 m per gli acquiferi confinati.

Naturalmente se i punti di osservazione devono essere realizzati appositamente, sarà opportuno ubicarli a distanze più ravvicinate dei limiti precedentemente citati e comprese fra 5 m e $1/3$ del raggio di influenza della prova. Se non si hanno informazioni preliminari sufficienti a valutare tale parametro, si consiglia di ubicare i punti di osservazione a distanza dell'ordine di 10-20 m per gli acquiferi con superficie libera e di 50-70 m per gli acquiferi confinati; valori intermedi potranno essere adottati per gli acquiferi semiconfinati.

E' consigliabile realizzare piezometri del tipo "a tubo aperto" per la loro maggiore affidabilità; il diametro non deve essere troppo grande perché aumenta il ritardo della risposta, né troppo piccolo per evitare fenomeni di pistonaggio da parte del sensore piezometrico. Valori consigliabili sono compresi fra 5 e 10 cm.

Come è già stato ricordato, maggiore è il numero dei punti di osservazione disponibili, maggiori saranno l'affidabilità e il numero di informazioni acquisibili con l'interpretazione della prova. Nel caso, quindi, sia possibile realizzare più di un piezometro, sarà opportuno ubicarli lungo direzioni diverse rispetto al pozzo attivo e a distanze crescenti con legge logaritmica, tali cioè

che: $\ln \frac{r_{i+1}}{r_i} = a = \text{cost.}$

Per $a = 1.1$, l'applicazione del criterio esposto comporta $r_{i+1} = 3r_i$.

Se in una prova di falda sono disponibili almeno 3 piezometri ubicati lungo direzioni distinte, è possibile valutare, oltre ai parametri di base, anche l'anisotropia di conducibilità idraulica, eventualmente presente nel piano orizzontale di flusso.

2.1.4 La durata ottimale di una prova di falda è compresa fra 6 e 72 ore, a seconda del tipo di prova, del regime di flusso e delle caratteristiche dell'acquifero (tipologia, parametri idrodinamici, presenza di limiti). La durata di uno *slug test*, invece, è nettamente inferiore e varia usualmente da 1 a 100 min.

2.1.5 Qualsiasi prova di falda comporta la misura delle variazioni di livello piezometrico in funzione del tempo, indotte dall'erogazione di una certa portata o di una variazione istantanea di livello nel pozzo attivo; per l'esecuzione di una prova di falda vanno predisposti, pertanto, dispositivi per la misura dei tempi, dei livelli idrici e della portata.

Nessun approfondimento particolare merita la misura dei tempi, in quanto i cronometri digitali presenti sul mercato a costi contenuti rispondono perfettamente ai requisiti richiesti.

Per la misura dei livelli idrici, si dovrà operare una scelta fra l'adozione di un sistema manuale (sonda piezometrica, freatimetro) o un sistema di acquisizione automatica con compensazione della pressione atmosferica (sensore di pressione + data logger). Mentre per le prove di falda in declino o risalita, la scelta è soggettiva ed è legata soprattutto alla disponibilità della strumentazione, nel caso di realizzazione di uno *slug test* è spesso indispensabile ricorrere all'acquisizione automatica in quanto le variazioni di livello negli acquiferi dotati di media-buona permeabilità sono troppo rapide per consentire una adeguata misurazione manuale.

Merita, invece, un approfondimento la misura della portata, che spesso nelle condizioni di campo è sottovalutata e che, invece, è un parametro determinante ai fini dell'interpretazione della prova.

I sistemi più usati nella pratica delle prove di pompaggio sono:

- a) il serbatoio tarato, mediante il quale si misura il tempo impiegato dal pozzo a riempire un volume noto (normalmente 200 o 500 l); è il sistema più semplice ed è adatto a piccole portate, in quanto è necessario un tempo di riempimento dell'ordine di almeno 30-60 s per limitare l'errore di misura;
- b) il contatore volumetrico, usualmente di tipo Woltman, con il quale si legge direttamente il valore del volume d'acqua erogato; il suo diametro va scelto in funzione del range di portata erogato e va montato su un tratto di tubazione orizzontale, rettilineo a monte e a valle del contatore stesso per una lunghezza pari ad almeno 20 volte il diametro della tubazione, al fine di evitare l'innescio di fenomeni di turbolenza. Si ricorda che la saracinesca di manovra va posizionata a valle del contatore, per avere comunque un flusso a sezione piena;
- c) la vasca a stramazzo, a parete sottile, con la quale il valore di portata viene ottenuto correlando l'altezza della lama d'acqua sullo sfioratore con le caratteristiche costruttive della vasca;
- d) il tubo con diaframma, mediante il quale la portata viene valutata sulla base del teorema di Bernoulli, una volta letto il valore del carico idraulico a monte del diaframma, che deve essere montato all'estremità di un tratto di tubazione liscia, orizzontale e rettilinea per una lunghezza pari a circa 20 volte il diametro della stessa.

In Tab. 1 sono riportati i valori degli errori relativi connessi alla misura della portata istantanea con i diversi dispositivi descritti, nell'ipotesi - ovviamente - che gli stessi siano impiegati in maniera corretta.

Tab. 1 Valori degli errori relativi connessi alla misura della portata istantanea durante una prova di pompaggio (Genetier, 1993).

Dispositivo	errore relativo, %
serbatoio tarato	1 - 2
contatore volumetrico	2
vasca a stramazzo	1.5 - 2.5
tubo con diaframma	5

2.1.6 La frequenza e le modalità di misura di una prova di pompaggio devono essere tali da registrare in funzione del tempo gli abbassamenti indotti nel pozzo attivo e/o in uno o più punti di osservazione per effetto dell'erogazione di una portata costante dal pozzo attivo. Le modalità di

misura possono prevedere o la misura degli abbassamenti in corrispondenza di determinati valori di tempo o la determinazione dei tempi in corrispondenza di valori di abbassamento prefissati.

Nel primo caso bisogna ricordare che, fatta eccezione per la fase iniziale della prova e per quella finale corrispondente alla comparsa dell'effetto di eventuali limiti (sia interni che esterni), gli abbassamenti evolvono nel tempo con una legge di tipo logaritmico; conseguentemente non ha senso misurare gli abbassamenti ad intervalli di tempo costanti, ma bisognerebbe seguire una legge del tipo $t_{i+1} = e^a \cdot t_i$, essendo a una costante.

Poiché, però, la durata della fase iniziale di scostamento dalla legge logaritmica e la comparsa di eventuali limiti non possono essere noti a priori, nella letteratura specialistica sono consigliate modalità di misura che adottano un criterio empirico tendente, ovviamente, a ridurre la frequenza di lettura con il procedere del tempo di prova. Le Tabb. 2 e 3 ne possono rappresentare un esempio. Questo approccio misuristico è consigliabile, in particolare, quando si dispone di un sistema di acquisizione automatico che può essere impostato secondo le frequenze sopra esemplificate.

Tab. 2: Frequenza di misura del livello piezometrico consigliata nel pozzo attivo.

Tempo di prova	Intervallo di misura
min	min
0-2	0,5
2-5	1
5-60	5
60-120	15
120-240	30
>240	60

Tab. 3: Frequenza di misura del livello piezometrico consigliata nei punti di osservazione.

Tempo di prova	Intervallo di misura
min	min
0-2	0,25
2-5	0,50
5-15	1
15-60	5
60-120	10
120-360	30
360-720	60
720-2880	180
>2880	480

Quando, invece, si fa' ricorso alla procedura manuale, si può ottenere una migliore precisione nei punti di osservazione, adottando il criterio di leggere i tempi in corrispondenza dei quali si

raggiungono dei valori di abbassamento predeterminati. In questo caso, infatti, si evitano le imprecisioni di lettura dovute alla valutazione delle frazioni di centimetro, essendo le sonde piezometriche manuali quotate con scansione centimetrica; inoltre, si evita il rischio di perdere tratti significativi della curva abbassamenti-tempo solo perché non previsti nella frequenza temporale di misura.

Nel caso si adotti questo criterio, è consigliabile seguire una scansione di misura quale quella suggerita in Tab. 4, nella quale si evidenzia che la scansione aumenta con il progredire della prova, in quanto valori di abbassamento troppo ravvicinati diventano difficilmente (e inutilmente) rappresentabili in scala logaritmica.

Per quanto riguarda l'esecuzione degli *slug tests*, infine, data la brevità della prova e la necessità di ricorrere ad un'acquisizione automatica delle variazioni di livello, è opportuno utilizzare frequenze di acquisizione dell'ordine di $1 \div 3$ s.

Tab. 4: Scansione di misura consigliata nei punti di osservazione in funzione dell'entità dell'abbassamento cumulativo del livello piezometrico.

Abbassamento cumulati	Scansione di misura
cm	cm
0-30	1
30-50	2
50-100	5
>100	10

2.2 Prova di falda in declino

Lo sforzo di divulgazione scientifica iniziato molti anni orsono (Di Molfetta, 1995) comincia a dare i risultati sperati e, anche in Italia, inizia a radicarsi la convinzione che la corretta interpretazione di una prova di falda eseguita con declino di livello richieda l'adozione di una rigorosa sequenza procedurale secondo lo schema di Fig. 2.

2.2.1 Identificazione della tipologia idraulica

Obiettivo principale di una prova di falda in declino è la caratterizzazione idraulica del sistema acquifero allo scopo di poter calcolare, e quindi prevedere, gli effetti indotti da un determinato programma di pompaggio. D'altra parte, la relazione portata-abbassamento piezometrico-tempo non è univoca nei sistemi acquiferi, in quanto l'equazione differenziale di diffusività che governa la distribuzione del campo di moto è diversa in relazione alla specificità delle condizioni idrauliche di contorno. Poiché, qualunque metodo di interpretazione si applichi, si utilizza necessariamente una soluzione analitica dell'equazione di diffusività pertinente, ne consegue che la scelta del metodo di interpretazione deve essere preceduta dall'individuazione della tipologia idraulica del sistema acquifero.

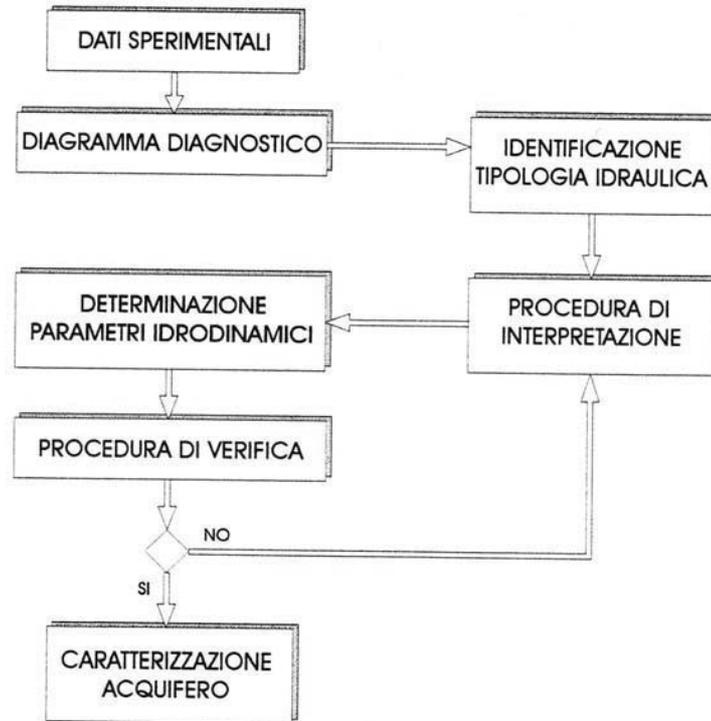


Fig. 2: Sequenza procedurale per la caratterizzazione di un acquifero sulla base della interpretazione di una prova di falda a portata costante.

Questo risultato può essere ottenuto molto semplicemente, utilizzando i dati sperimentali raccolti durante la prova di falda per costruire una curva diagnostica, ottenuta diagrammando in scale logaritmiche gli abbassamenti del livello piezometrico s , misurati nel punto di osservazione, in funzione del tempo t di pompaggio, vedasi Fig. 3.

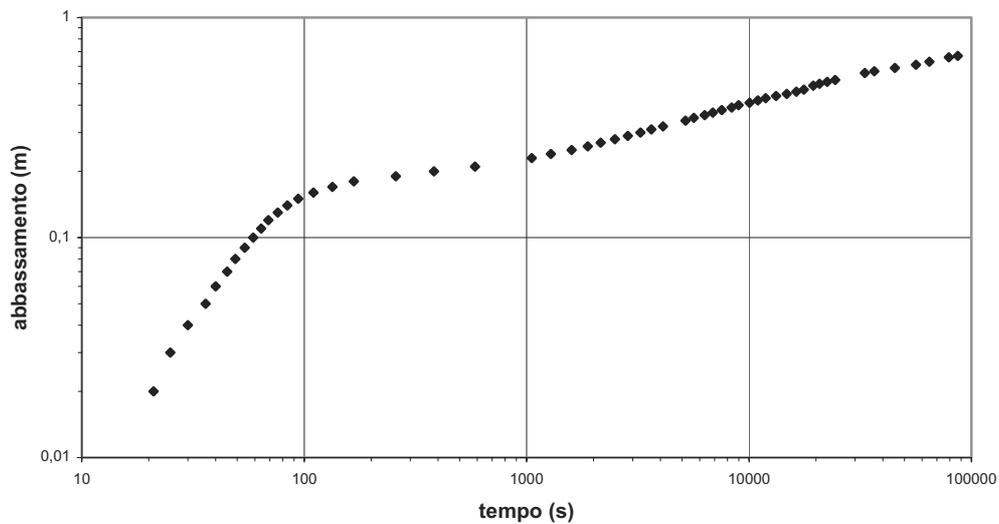


Fig. 3: Esempio di diagramma diagnostico.

La configurazione della curva diagnostica ottenuta consente di individuare la tipologia idraulica del sistema acquifero, vedasi Fig. 4, vale a dire il modello fisico che meglio riproduce il comportamento idrodinamico della falda idrica, sollecitata mediante il test eseguito.

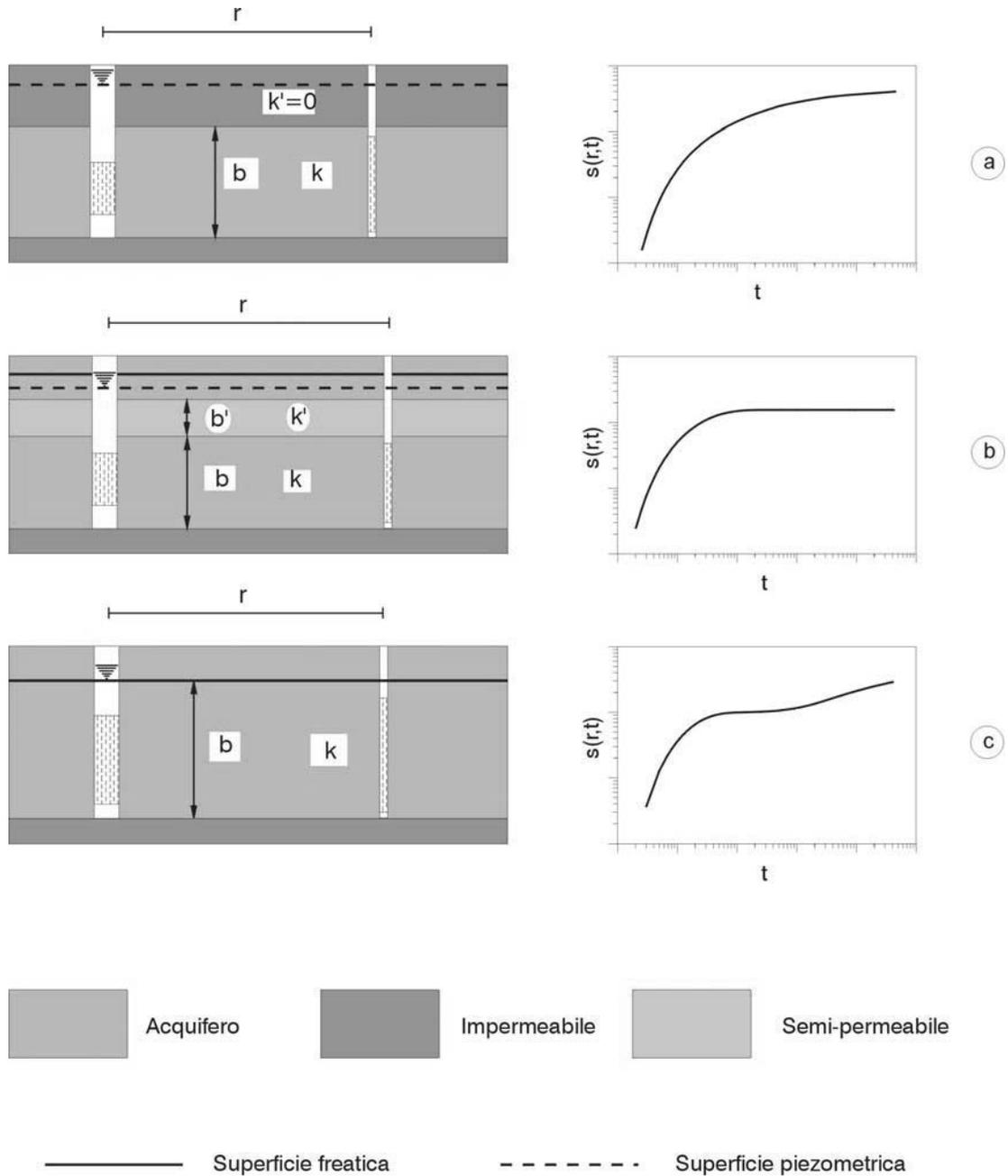


Fig. 4: Identificazione della tipologia idraulica di un acquifero sulla base della configurazione della curva abbassamenti-tempo, registrata in un piezometro distante r dal pozzo attivo, durante una prova di falda a portata costante:
a) acquifero confinato;
b) acquifero semiconfinato;
c) acquifero non confinato

L'identificazione sperimentale, e quindi oggettiva in quanto riproducibile, del modello fisico, a cui corrisponde un conseguente modello analitico, è il fondamento dell'interpretazione di una prova di falda; la scelta di tale modello non può derivare dalla ricostruzione dell'assetto litostratigrafico e idrogeologico del sottosuolo: il modello geologico è valido ed utile ad una scala molto più ampia di quella interessata da una prova di falda, mentre la ricostruzione della colonna litostratigrafica delle formazioni interessate dalle opere di captazione fornisce - prescindendo dalla correttezza delle informazioni - solo un'indicazione puntuale, che può non avere rilevanza sul comportamento idrodinamico dell'acquifero.

L'assunzione a priori di un modello fisico, non basato sulle risposte sperimentale del sistema, rappresenta una delle cause più frequenti di errore nella caratterizzazione dei sistemi acquiferi.

2.2.2 Procedura di interpretazione

Una volta individuata la tipologia idraulica del sistema acquifero, la sequenza procedurale prevede la scelta di uno o più metodi per la interpretazione della prova di falda, allo scopo di determinare il valore più probabile dei parametri idrodinamici, il cui numero dipende dal modello fisico adottato.

I metodi di interpretazione sono molteplici, ma possono schematicamente essere suddivisi in due categorie con riferimento al rispetto delle ipotesi di base e delle condizioni al contorno, necessarie alla risoluzione analitica delle rispettive equazioni differenziali di diffusività.

2.2.2.1 Metodi base

Rientrano in questa categoria tutti i metodi più frequentemente impiegati, fondati sul rispetto delle seguenti ipotesi di base:

- mezzo omogeneo e isotropo, di spessore costante;
- condizioni di validità della legge di Darcy;
- fluido di densità e viscosità costanti;
- superficie piezometrica in equilibrio e con pendenza trascurabile rispetto agli effetti indotti dal pompaggio del pozzo attivo;
- flusso con geometria radialpiana;
- acquifero illimitatamente esteso;
- pozzo attivo di raggio e volume infinitesimo, aperto al flusso lungo tutto lo spessore saturo dell'acquifero (pozzo completo) e con efficienza idraulica pari al 100%;
- portata costante durante tutta la prova;
- pozzo o piezometro di osservazione completato con le stesse caratteristiche del pozzo attivo.

Alle precedenti condizioni, va aggiunto per gli acquiferi semiconfinati il rispetto delle seguenti ulteriori ipotesi:

- l'acquifero semiconfinato è delimitato da un acquitrando, attraverso il quale il flusso di alimentazione è verticale;
- la variazione di immagazzinamento nell'acquitrando è trascurabile;
- la superficie piezometrica dell'acquifero che alimenta, attraverso l'acquitrando, l'acquifero semiconfinato è orizzontale e non subisce variazioni per effetto dell'alimentazione esercitata.

I principali metodi di base utilizzati nell'interpretazione delle prove di falda sono riassunti in Tab. 5, con riferimento unicamente alle prove condotte in regime di non equilibrio, dal momento che - come è già stato ricordato nel paragrafo 2.2 - le prove in regime stazionario consentono di ricavare un minor numero di parametri, a fronte di un costo maggiore.

Come si vede in Tab. 5, il procedimento più comunemente impiegato è il metodo di sovrapposizione con una o più curve campione (Type curve matching), che può essere impiegato

Tab. 5: Metodi base più frequentemente utilizzati per l'interpretazione di prove di falda eseguite a portata costante, in regime di non equilibrio. Sono evidenziati il procedimento usato per l'interpretazione della prova, l'equazione che rappresenta la soluzione della corrispondente equazione di diffusività, i parametri determinabili e il tipo di diagramma da utilizzare per la rappresentazione dei risultati sperimentali ottenuti con la prova.

N. B.: L'applicazione del metodo di Jacob agli acquiferi non confinati richiede, per la validità dell'approssimazione logaritmica, che sia stata eseguita una prova di lunga durata.

Tipologia Acquifero	Metodo	Procedimento d'interpretazione	Equazione	Parametri determinabili	Diagramma s vs t
CONFINATO	Theis	curva campione	$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$	T, S, K_r	log-log
	Jacob	linearizzazione	$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln 2.25 \frac{tT}{Sr^2}$	T, S, K_r	semilog
SEMICONFINATO	Walton	curva campione	$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \frac{r}{B})$	T, S, B, K_r	log-log
	Hantush	punto di flesso	$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \frac{r}{B})$	T, S, B, K_r	semilog
NON CONFINATO	Neuman	curva campione	$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \mu, \beta)$	T, S, n_e, K_r, K_v	log-log
	Jacob	linearizzazione	$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln 2.25 \frac{tT}{n_e r^2}$	T, n_e, K_r	semilog

per tutte le tipologie di acquifero, ovviamente facendo riferimento a famiglie specifiche di curve.

La metodologia è molto semplice e può essere giustificata in termini generali, partendo dalla generica soluzione dell'equazione di diffusività:

$$(1) \quad s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} s_D(u) \quad \text{essendo}$$

$$(2) \quad u = \frac{Sr^2}{4Tt}$$

ed s_D la generica funzione adimensionale, soluzione dell'equazione di diffusività, che riproduce il comportamento idrodinamico della tipologia di acquifero considerato; per gli acquiferi confinati $s_D = W(u)$, per i semiconfinati $s_D = W(u, r/B)$, per i non confinati $s_D = W(u_A, u_B, \beta)$.

Se delle equazioni (1) e (2) si prendono i logaritmi di entrambi i membri, si ottiene:

$$(1 \text{ bis}) \quad \log s = \log \frac{Q}{4\pi T} + \log s_D$$

$$(2 \text{ bis}) \quad \log t = \log \frac{Sr^2}{4T} + \log 1/u$$

Poiché i due gruppi $\frac{Q}{4\pi T}$ e $\frac{Sr^2}{4T}$ rappresentano due costanti, le equazioni (1bis) e (2bis)

indicano che, in un diagramma logaritmico avente lo stesso modulo (uguale ampiezza di un ciclo logaritmico), la curva sperimentale s vs t , registrata durante la prova di falda, avrà la stessa configurazione della curva adimensionale s_D vs $1/u$, caratteristica della tipologia di acquifero che meglio riproduce il comportamento reale del sistema in esame.

L'applicazione del metodo è esemplificata nelle sue varie fasi in Fig. 5, con riferimento ad un acquifero semiconfinato:

- i dati della prova vengono diagrammati in scala logaritmica (diagramma diagnostico), onde individuare la tipologia idraulica;
- si sceglie il set di curve teoriche adimensionali relative alla tipologia individuata, facendo in modo che i due diagrammi abbiano lo stesso modulo;
- si sovrappongono i due diagrammi (è opportuno che uno dei due sia realizzato su carta lucida);
- si trasla un diagramma sull'altro, mantenendo rigorosamente paralleli gli assi, fino ad ottenere la sovrapposizione della curva sperimentale su una delle curve adimensionali, identificando in tal modo il modello teorico di riferimento;
- si calcolano i valori dei parametri idrodinamici per applicazione delle equazioni (1) e (2) alle coordinate di un punto di riferimento (match point).

Molto applicata, anche se spesso in maniera impropria, è la linearizzazione dei dati sperimentali in diagramma semilogaritmico; questa procedura, nota come metodo di Jacob, è applicabile solo agli acquiferi confinati e non confinati, vedasi Tab. 5, ed è basata sull'approssimazione logaritmica della funzione di Theis:

$$(3) \quad s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln 2.25 \frac{tT}{Sr^2}, \quad \text{valida per}$$

$$(4) \quad t \geq 12.5 \frac{Sr^2}{T}$$

Se la durata della prova è stata sufficientemente lunga da avere un numero di punti adeguato per individuare il tratto rettilineo della curva di declino, l'interpretazione della prova consente di determinare la trasmissività attraverso la pendenza del tratto rettilineo e il coefficiente di

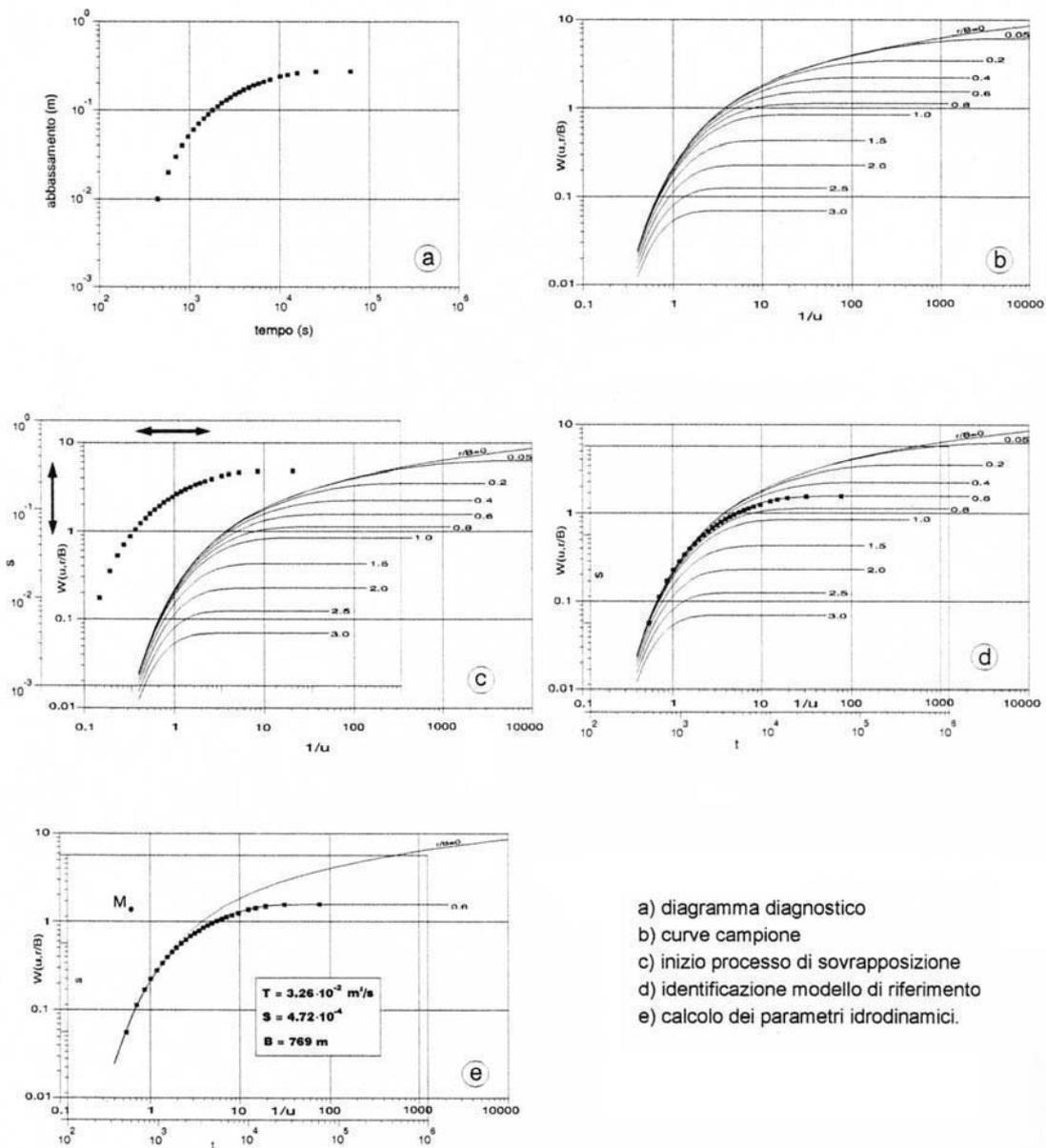


Fig. 5: Esempificazione del procedimento di interpretazione di una prova di falda mediante sovrapposizione con la curva campione, applicato ad un acquifero semiconfinato.

immagazzinamento attraverso la valutazione del tempo t_0 ottenuto come intersezione, sull'asse delle ascisse, del tratto rettilineo, Fig. 6.

La disuguaglianza (4) indica che il limite inferiore di validità dell'approssimazione di Jacob è fortemente condizionato dalla distanza dei punti di osservazione, oltre che dal valore dei parametri idrodinamici. Tuttavia, nel campo delle distanze consigliate nel paragrafo 3.3, mentre non esistono problemi per gli acquiferi confinati, l'estensione del metodo di Jacob agli acquiferi freatici richiede una durata della prova molto grande (maggiore di 12 h) per il ruolo giocato dalla porosità efficace (da 2 a 3 ordini di grandezza maggiore del coefficiente di immagazzinamento degli acquiferi confinati).

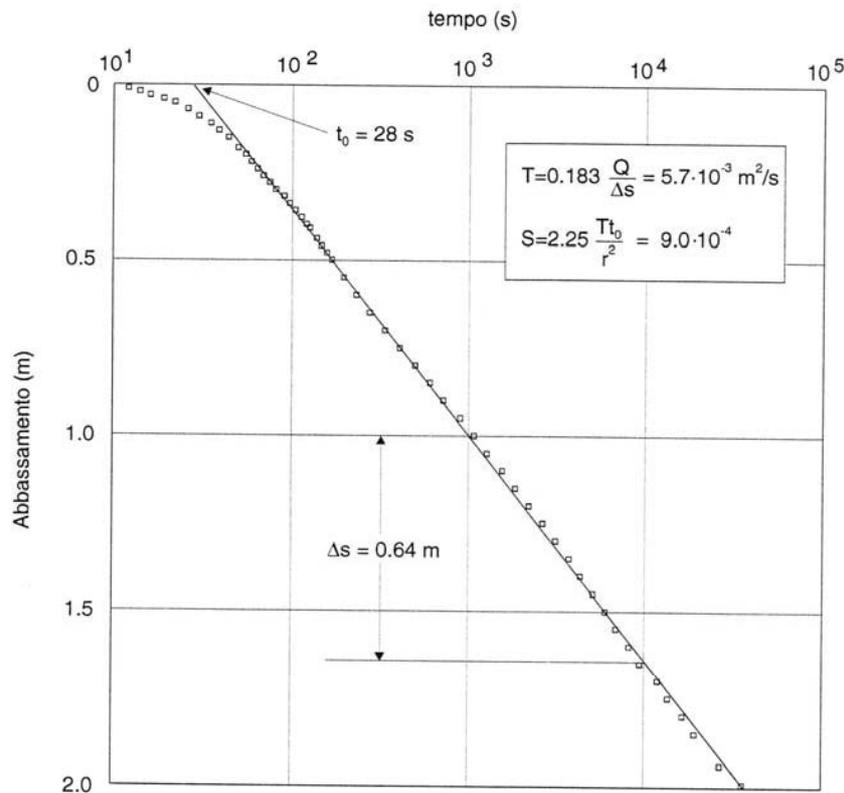


Fig. 6: Applicazione del metodo del Jacob per l'interpretazione di una prova di falda a portata costante, eseguita in un acquifero confinato.

2.2.2.2 Deviazione dal comportamento ideale

Alcune delle ipotesi assunte come base di validità delle soluzioni analitiche delle equazioni di diffusività e, conseguentemente, dei metodi di interpretazione delle prove di falda descritti nel precedente paragrafo, sono difficilmente verificabili nella realtà (pozzo di raggio infinitesimo, volume di pozzo infinitesimo); altre non corrispondono alla situazione fisica che si può talora incontrare (portata variabile, presenza di limiti all'interno dall'area influenzata dalla prova, pozzo attivo non completo, acquifero danneggiato nell'intorno del pozzo).

Ne deriva che nella pratica delle prove di pompaggio esiste tutta una serie di fattori di deviazione dal comportamento ideale, la cui sottovalutazione porta inevitabilmente ad una interpretazione errata.

La Tab. 6 riassume alcuni dei principali fattori di deviazione, la loro influenza e la procedura da utilizzare per tenerne conto.

E' evidente che qualsiasi pozzo, per poter esercitare la propria funzionalità, dovrà avere un raggio di dimensioni finite r_w , diverso dal valore infinitesimo ("line source") ipotizzato nella risoluzione dell'equazione di diffusività; ciò comporta che le funzioni adimensionali riportate in Tab. 5 non possano essere applicate, al di sotto di un certo valore limite di tempo, per $r < 20 r_w$. Questa limitazione non ha alcuna rilevanza ai fini pratici, in quanto impone esclusivamente di non realizzare piezometri a distanza inferiore a $20 r_w$ dal pozzo attivo (5-6 m come valore massimo).

Più importante è la diretta conseguenza per cui ad un raggio finito corrisponde un volume di pozzo finito, situazione che determina il ben noto "effetto di immagazzinamento". In effetti, tutte le

Tab. 6: Fattori di deviazione dal comportamento ideale di un pozzo e loro influenza sull'interpretazione di una prova di falda.

CONDIZIONE TEORICA	CONDIZIONE REALE	INFLUENZA NULLA PER	ACCORGIMENTI DA UTILIZZARE
Raggio di pozzo infinitesimo	Raggio finito	$r > 20 r_w$	Ubicazione piezometri o pozzi di osservazioni a distanza $r > 20 r_w$
Volume di pozzo infinitesimo	Volume finito (effetto di immagazzinamento)	$t > \frac{25 C_w}{\pi T}$	Trascurare i punti relativi ai primi 60-100 s
Penetrazione e completamente totali	Spesso diversa	$r > 1.5 b$	Per $r < 1.5 b$ interpretare le prove con metodi specifici: ad esempio, il metodo di Neuman per gli acquiferi non confinati e il metodo di Hantush per gli acquiferi confinati e semi-confinati
Formazione illimitatamente estesa	Talora, limiti di permeabilità o di ricarica	-	Ricorrere alla teoria dei pozzi immagine: metodo di Stallman
Permeabilità costante	Talora, danneggiamento di permeabilità nell'intorno del pozzo	pozzo di osservazione	Realizzare prove pozzo-piezometro o, nelle prove a pozzo singolo, conteggiare il danneggiamento
Portata costante	Talvolta diversa	-	Applicare il principio di sovrapposizione degli effetti
Immagazzinamento trascurabile nell'acquitardo	Talvolta diversa	$\frac{r}{4B} \left(\frac{S'}{S} \right)^{0.5} < 0.01$	Applicare il metodo di Hantush basato sulla funzione $H(u, \beta)$

volte che si mette in pompaggio un pozzo partendo da condizioni indisturbate, viene dapprima utilizzato il volume di acqua immagazzinato all'interno della colonna di produzione e poi, solo quando il livello idrico all'interno del pozzo è diminuito, inizia il flusso nella formazione acquifera.

Il valore dell'effetto di immagazzinamento è misurato dal coefficiente di immagazzinamento del pozzo:

$$(5) \quad C_w = -\frac{dV_w}{ds_w} = \pi(r_w^2 - r_p^2).$$

essendo r_p il raggio della tubazione di mandata della pompa.

La presenza dell'effetto di immagazzinamento del pozzo fa sì che vi sia uno scostamento fra il tempo 0 di inizio della prova e il tempo a cui effettivamente la portata Q_a fornita dall'acquifero uguaglia la portata Q erogata dalla pompa; questo scostamento è tanto maggiore, quanto maggiori sono le dimensioni dell'opera di captazione, vedasi Fig. 7.

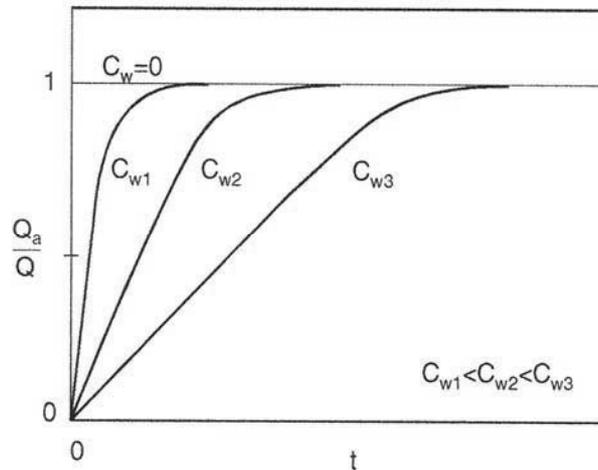


Fig. 7: Influenza dell'effetto di immagazzinamento di un pozzo.

L'influenza dell'effetto di immagazzinamento, che è segnalata sul diagramma diagnostico da un tratto a pendenza unitaria, diventa trascurabile per

$$(6) \quad t > \frac{25 C_w}{\pi T}.$$

Un'altra delle ipotesi di base che solo raramente risulta verificata nella realtà è quella che impone che il tratto finestrato dell'opera di captazione coincida con lo spessore saturo dell'acquifero (pozzo completo). L'effetto del parziale completamento è quello di modificare la geometria di flusso radialpiana nell'intorno del pozzo, determinando un addensamento delle linee di flusso in corrispondenza del tratto finestrato, che si estrinseca in un aumento delle perdite di carico. Tale effetto diventa trascurabile ad una distanza di $1.5 b$, essendo b lo spessore saturo dell'acquifero.

Pertanto, se i punti di osservazione sono disposti ad una distanza maggiore di $1.5 b$ dal pozzo attivo, l'effetto del parziale completamento potrà essere trascurato, mentre se la distanza è inferiore se ne dovrà tenere conto applicando metodologie specifiche di interpretazione delle prove: ad esempio, il metodo di Neuman (Neuman, 1975) o di Moench (Moench, 1993) per gli acquiferi non confinati e il metodo di Hantush (Kruseman, De Ridder, 1983) per gli acquiferi confinati e semi-confinati.

In talune circostanze l'andamento della prova di falda può essere modificato dalla presenza di uno o più limiti presenti nell'area di influenza della prova. Tali limiti, che possono essere di tipo alimentante (fiumi, canali, laghi) o impermeabile (barriera di permeabilità), fanno decadere l'ipotesi del sistema illimitatamente esteso, che è alla base della risoluzione analitica delle equazioni di diffusività.

Il problema può essere risolto mediante la teoria dei pozzi immagine, costruendo preliminarmente la funzione analitica che riproduce una situazione idraulicamente equivalente a quella del sistema fisico esistente, vedasi Fig. 8: il metodo di Stallman (Kruseman - De Ridder, 1983) è esemplificativo di tale approccio.

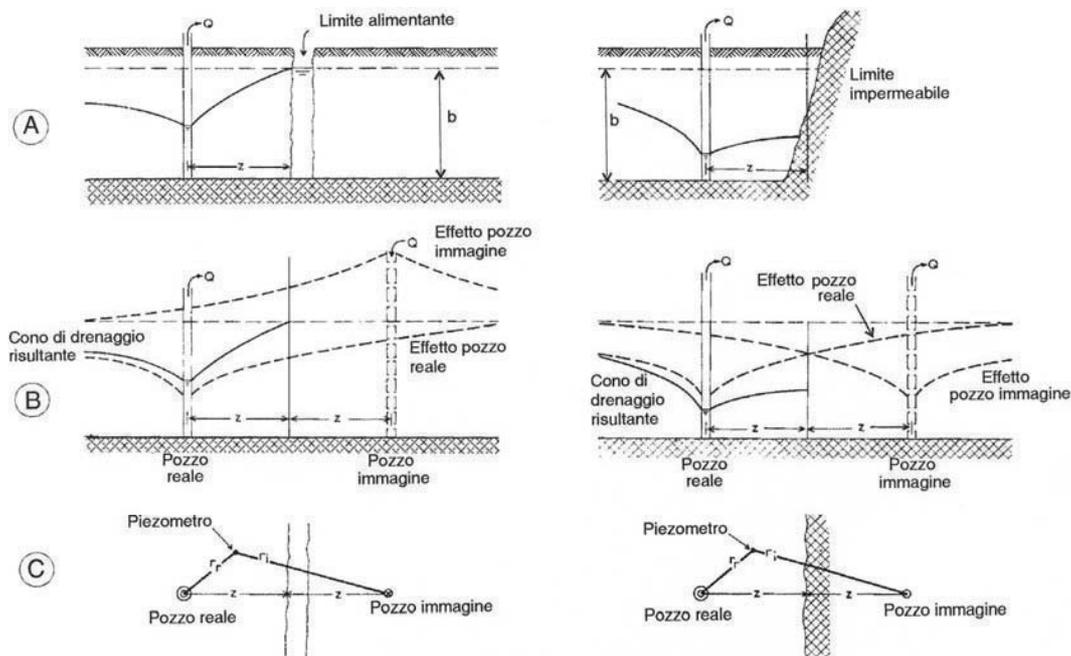


Fig. 8: Influenza di un limite alimentante o impermeabile: A) situazione fisica, B) modello idraulico equivalente (sezione), C) modello idraulico equivalente (pianta).
Da Kruseman, De Ridder (1983).

Una delle ipotesi base di qualsiasi soluzione analitica fa riferimento alla omogeneità della formazione. Senza voler entrare, in questa sede, nel merito della rispondenza generale di tale ipotesi alla realtà dei sistemi acquiferi, bisogna ricordare che talvolta nell'intorno di un pozzo si può avere un'area a permeabilità ridotta, per effetto di un possibile danneggiamento causato da un uso non corretto dei fluidi di perforazione e non eliminato con un'adeguata fase di sviluppo del pozzo. Anche in questo caso, si determina una perdita di carico aggiuntiva in corrispondenza del pozzo attivo, mentre - ovviamente - il suo effetto è praticamente nullo in corrispondenza dei punti di osservazione. Questa è una delle motivazioni che suggerisce di realizzare le prove di falda con una geometria pluri-pozzo e non a pozzo singolo, nel qual caso sarebbe indispensabile tener conto dell'effetto di danneggiamento.

Infine, se particolari esigenze operative impediscono di avere una portata costante durante la prova, l'applicazione del principio di sovrapposizione degli effetti alle soluzioni elementari finora discusse consente ugualmente di interpretare i dati delle prova, anche se si introduce un ulteriore

grado di difficoltà nella individuazione di eventuali anomalie.

Le considerazioni fin qui svolte sui fattori di deviazione dal comportamento ideale sono generali e indipendenti dalla tipologia del sistema acquifero. Focalizzando, invece, l'attenzione sui soli acquiferi semiconfinati, bisogna riconoscere che non sempre risulta verificata nella realtà la condizione di non avere alcun contributo all'alimentazione dall'immagazzinamento nell'acquifero. Tale condizione ($S' = 0$), che è alla base del metodo di Walton, può ritenersi verificata solo per:

$$(7) \quad \beta = \frac{r}{4B} \left(\frac{S'}{S} \right)^{0.5} < 0.01$$

Negli altri casi è necessario sostituire la funzione di Walton $W\left(u, \frac{r}{B}\right)$ con quella di Hantush $H(u, \beta)$.

2.3 Prova di risalita

La prova di risalita o di recupero è una particolare prova di falda, durante la quale si misura la risalita del livello idrico in pozzo (o l'abbassamento di livello residuo) per effetto della cessazione del pompaggio dopo un periodo di erogazione t a portata costante, vedasi schema B di Fig. 1.

L'interpretazione della prova, usualmente basata sulla linearizzazione in diagramma semilogaritmico (vedasi Fig. 9) dei dati misurati durante la fase di risalita, richiede l'applicazione dell'approssimazione logaritmica della funzione di Theis, data da Jacob (eq. 3).

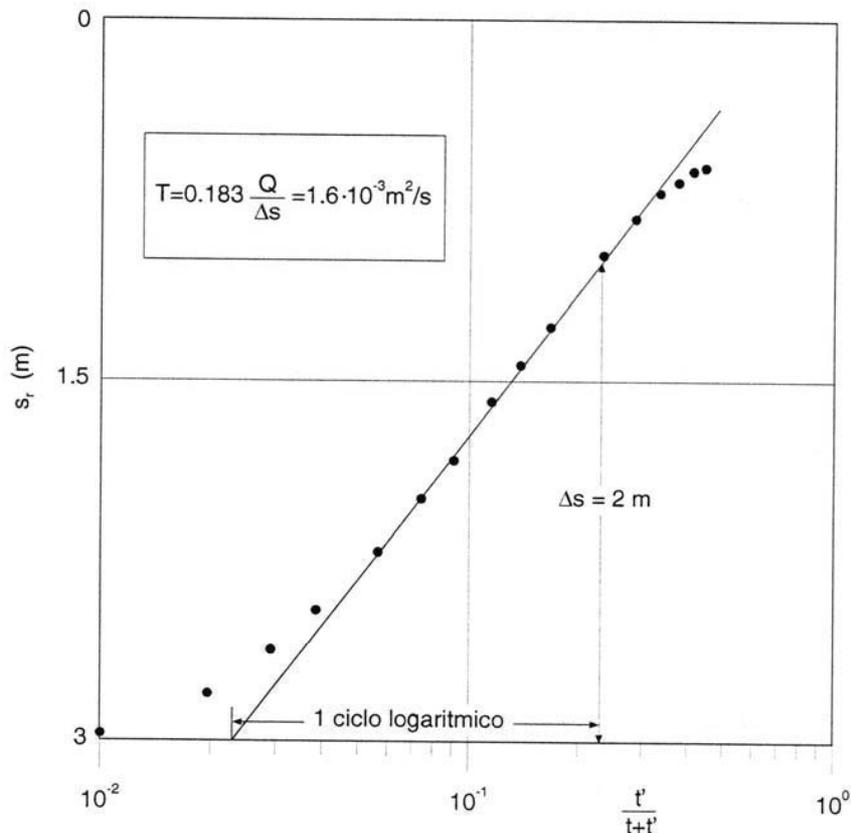


Fig. 9: Interpretazione di una prova di risalita.

Ne deriva che in questi casi la possibilità di interpretare una prova di risalita è limitata a pozzi completati in acquiferi confinati o non confinati, con esclusione degli acquiferi semiconfinati. Se a ciò si aggiunge con questa metodologia è ricavabile solo il valore della trasmissività, e non il coefficiente di immagazzinamento, si comprende come questa prova sia poco utilizzata per ricavare i parametri idrodinamici.

La realizzazione di una prova di risalita con la registrazione dei livelli nello stesso pozzo attivo rappresenta, invece, uno strumento metodologico per quantificare l'eventuale danneggiamento di permeabilità nell'intorno del pozzo, secondo una procedura consolidata e abituale in campo petrolifero. Anche in questo caso, però, resta valida l'esclusione degli acquiferi semiconfinati. La determinazione dei parametri relativi all'eventuale danneggiamento di permeabilità nell'intorno del pozzo può anche essere effettuata mediante l'interpretazione di uno slug test con il metodo KGS, vedasi par. 2.4.4.

2.4 *Slug Test*

Si definisce *slug test* una prova di falda eseguita in maniera da produrre una istantanea variazione del livello statico in un pozzo o piezometro e misurare, in funzione del tempo, il conseguente recupero del livello originario nello stesso pozzo attivo.

Si tratta, perciò, di una prova di falda a pozzo singolo, eseguita in regime transitorio, la cui finalità consiste nella determinazione della conducibilità idraulica e dell'acquifero nelle immediate vicinanze del pozzo attivo.

La prova può essere eseguita aumentando bruscamente il livello statico misurato nel pozzo attivo e monitorando il conseguente declino di livello che si crea per il flusso dal pozzo verso l'acquifero (test in declino o con carico decrescente) o, viceversa, producendo una brusca diminuzione di livello e monitorando la conseguente risalita che si crea per il flusso dall'acquifero verso il pozzo (test in risalita o con carico crescente). La seconda modalità è la più utilizzata in relazione alla sua maggiore semplicità operativa, vedasi schema C di Fig. 1.

Uno *slug test* presenta dei vantaggi innegabili rispetto alla classica prova di falda che sono da ricondursi innanzitutto alla semplicità e rapidità di esecuzione e che si traducono in un conseguente minor costo: in particolare, l'esecuzione di uno *slug test* non richiede la disponibilità di pompe o attrezzature complesse, né di un pozzo di osservazione diverso dal pozzo attivo. Per la sua semplicità operativa può essere ripetuto nel tempo e in tal modo fornire utili indicazioni sull'eventuale cambiamento delle condizioni idrauliche nell'intorno del pozzo.

Per contro, il flusso indotto da uno *slug test* è molto limitato. Ne consegue che la risposta alla brusca variazione di livello indotta, e il conseguente valore di conducibilità idraulica ottenuto, sono fortemente condizionati dalle condizioni idrauliche esistenti nell'intorno del pozzo (modalità di perforazione, geometria di completamento, eventuale danneggiamento di permeabilità).

In altri termini, l'affidabilità di uno *slug test* non è paragonabile minimamente a quella di una classica prova di falda multipozzo, che resta la modalità fondamentale per caratterizzare un acquifero e, in ogni caso, l'unica in grado di definire la tipologia idraulica del sistema acquifero.

Ciò nondimeno, la sua semplicità operativa e il ridotto costo ne rendono sempre consigliabile l'esecuzione, ogni qualvolta sia stato completato un pozzo o un piezometro.

2.4.1 *Modelli di interpretazione*

Per l'interpretazione degli *slug test*, a partire dagli anni 50 sono stati sviluppati diversi modelli matematici bidimensionali di tipo analitico e semianalitico: i più utilizzati sono quelli di Hvorslev (Hvorslev, 1951), Cooper, Bredehoeft e Papadopoulos (Cooper et al., 1967) e Bouwer e Rice

(Bouwer and Rice, 1976).

La principale limitazione di questi metodi è, ovviamente, quella di non poter tener conto della parziale penetrazione o del parziale completamento di pozzi e di ipotizzare il flusso come assolutamente orizzontale, compreso tra due limiti impermeabili costituiti dai piani orizzontali virtuali passanti per gli estremi del tratto finestrato.

Recentemente (Hyder et al., 1994) è stato presentato da un gruppo di ricercatori del Kansas Geological Survey un modello semianalitico tridimensionale per l'interpretazione degli slug test eseguiti su pozzi a parziale penetrazione e/o completamento in acquiferi non confinati e confinati.

Tale modello, che incorpora anche il concetto dell'immagazzinamento dell'acquifero, è noto sinteticamente come modello KGS e rappresenta la metodologia di interpretazione più avanzata oggi disponibile.

Tenuto conto che il metodo di Bouwer e Rice è a tutt'oggi ancora il procedimento di interpretazione più utilizzato, è opportuno partire da questo, in maniera da conoscerne l'impostazione teorica, per comprenderne meglio le limitazioni.

2.4.2 Il metodo di Bouwer e Rice

Si consideri un pozzo o un piezometro completato in un acquifero non confinato, secondo la geometria rappresentata in Fig. 10.

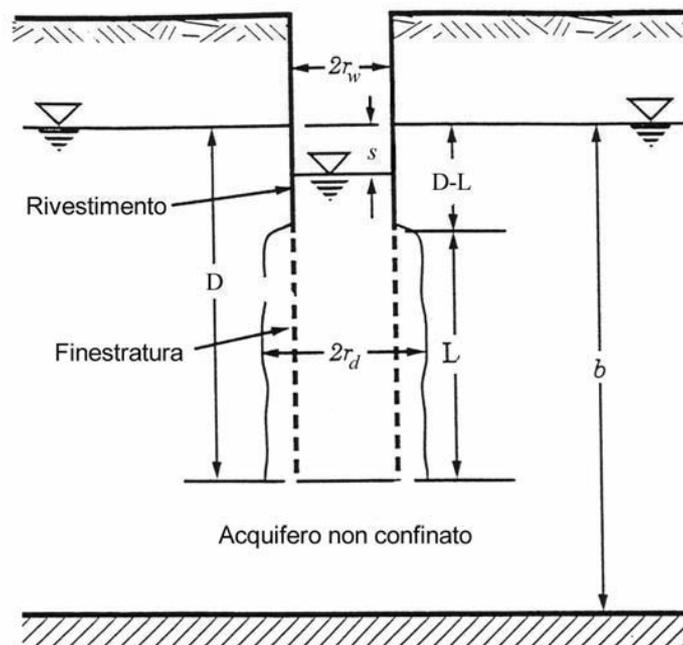


Fig. 10: Definizione dei parametri geometrici di un pozzo o piezometro completato in un acquifero non confinato.

La teoria di Bouwer e Rice poggia sulle seguenti assunzioni:

- l'acquifero è omogeneo e isotropo e pertanto non esiste danneggiamento di permeabilità nell'intorno del pozzo;
- è valida la legge di Darcy;

- l'acquifero è illimitatamente esteso in tutte le direzioni;
- l'immagazzinamento della formazione acquifera è trascurabile;
- le perdite di carico per il flusso attraverso le finestrate sono trascurabili;
- la posizione della tavola d'acqua non cambia con il tempo;
- il flusso creato dalla variazione di carico idraulico è esclusivamente orizzontale (i piani orizzontali virtuali passanti per il top e il bottom del tratto finestrato si comportano da limiti impermeabili).

Con tali ipotesi, la portata che ad un certo istante fluisce attraverso il tratto finestrato, per una generica variazione s di livello rispetto alla condizione indisturbata, è esprimibile mediante l'equazione di Thiem:

$$(8) \quad Q = 2\pi K_r L \frac{s}{\ln\left(\frac{R_e}{r_d}\right)}$$

nella quale R_e rappresenta l'effettiva distanza radiale oltre la quale la variazione di carico idraulico s è dissipata, L è la lunghezza del tratto finestrato, mentre r_d è la distanza radiale a partire dalla quale l'acquifero è indisturbato, vale a dire presenta le caratteristiche petrofisiche originarie, non perturbate dalla perforazione e dal completamento dell'opera.

Per il principio di conservazione della massa, la portata Q può anche essere espressa in funzione della velocità di variazione del livello all'interno del pozzo o piezometro di raggio r_w :

$$(9) \quad Q = -\pi r_w^2 \frac{ds}{dt}$$

Eguagliando le due espressioni si ottiene l'equazione differenziale di governo:

$$(10) \quad \frac{ds}{s} = -\frac{2K_r L}{r_w^2 \ln\left(\frac{R_e}{r_d}\right)} dt$$

che, integrata tenendo conto dei limiti, fornisce la seguente soluzione

$$(11) \quad \ln \frac{s_0}{s} = \frac{2K_r L}{r_w^2} \cdot \frac{t}{\ln\left(\frac{R_e}{r_d}\right)}$$

La soluzione di Bouwer e Rice indica che la variazione di livello in pozzo s varia rispetto al tempo con una legge di tipo semilogaritmico, vedasi Fig. 11, pertanto, in un caso ideale i punti $\ln(s)$ vs t dovrebbero allinearsi lungo una retta il cui coefficiente angolare m è proporzionale alla conducibilità idraulica della formazione.

Per la determinazione di m è sufficiente scegliere un punto su tale retta e poi calcolare:

$$m = \frac{\ln \frac{s_0}{s}}{t}$$

e quindi:

$$(12) \quad K_r = \frac{r_w^2 \ln(R_e / r_d)}{2 \cdot L} m$$

L'unico problema che sorge nell'applicazione della soluzione precedente è quello legato alla determinazione del raggio effettivo R_e , che è funzione dei seguenti parametri geometrici:

$$R_e = f(L, D, b, r_d)$$

Bouwer e Rice risolsero il problema lavorando con un modello analogico di tipo elettrico, che consentì loro di trovare le espressioni di R_e in funzione delle costanti A, B e C di seguito riportate.

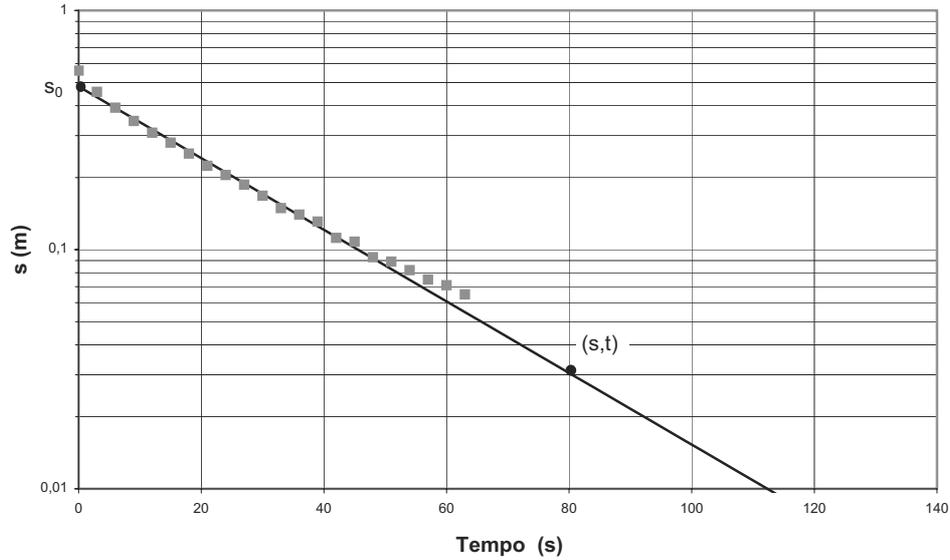


Fig. 11: Interpretazione di uno slug test secondo il metodo di Bouwer e Rice.

Pozzi a parziale penetrazione ($D < b$)

$$(13) \quad \ln \frac{R_e}{r_d} = \left\{ \frac{1.1}{\ln \left(\frac{D}{r_d} \right)} + \frac{A + B \ln \left[\frac{b-D}{r_d} \right]}{\frac{L}{r_d}} \right\}^{-1}$$

Pozzi a penetrazione totale ($D = b$)

$$(14) \quad \ln \frac{R_e}{r_d} = \left\{ \frac{1.1}{\ln \left(\frac{b}{r_d} \right)} + \frac{C}{\frac{L}{r_d}} \right\}^{-1}$$

I valori dei parametri A, B e C sono diagrammati in funzione del rapporto $\frac{L}{r_d}$ (Fig. 12).

2.4.2.1 Durata dello slug test

Nelle formazioni dotate di buona permeabilità il tempo impiegato dalla risalita o dal declino di livello per ritornare al valore indisturbato può essere molto breve e tale da richiedere l'impiego di apparecchiature automatiche di misura e registrazione del livello in pozzo.

Nella fase di pianificazione della prova è perciò importante aver un ordine di grandezza della sua durata; ciò può essere ottenuto calcolando dalla (11) il tempo necessario a realizzare il 90% della variazione di livello iniziale:

$$(15) \quad t_{90\%} = 1.15 \frac{r_w^2}{K_r \cdot L} \ln \left(\frac{R_e}{r_d} \right)$$

nella quale, naturalmente, va introdotto un ordine di grandezza della conducibilità attesa o ipotizzata.

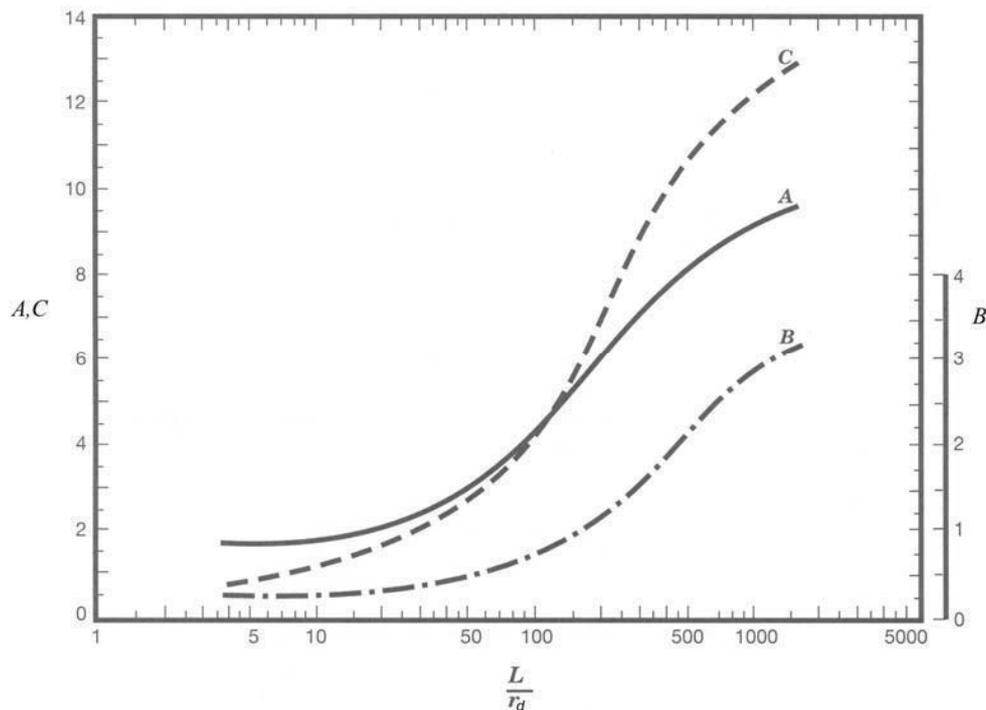


Fig. 12: Determinazione dei parametri adimensionali A, B e C per il calcolo del raggio effettivo R_e .
Da Bouwer e Rice (1976).

2.4.2.2 Scostamento del comportamento ideale

Influenza dell'immagazzinamento

Poiché nella realtà tutti gli acquiferi sono caratterizzati da un certo valore di immagazzinamento (condizione esclusa dalle ipotesi di validità della teoria di Bouwer e Rice, così come da quella di Hvorslev), anche in uno slug test perfettamente eseguito i valori sperimentali $\ln(s)$ vs t non sono perfettamente allineati lungo una retta, ma mostrano una curvatura che denota l'effetto dell'immagazzinamento esercitato dall'acquifero, vedasi Fig. 13.

Nasce pertanto il problema di individuare la retta che meglio approssima il modello teorico semilogaritmico. Butler (Butler, 1998) raccomanda che il comportamento rettilineo venga individuato, in particolare, nel campo $s/s_0 = 0.15 \div 0.25$.

Influenza del dreno

Indipendentemente dalla curvatura legata all'effetto dell'immagazzinamento, spesso nella rappresentazione dei dati sperimentali è possibile riconoscere due distinti andamenti rettilinei, vedasi Fig. 14, di cui il primo AB a pendenza molto maggiore del secondo BC. Ciò può essere dovuto all'effetto del dreno e/o dello sviluppo nell'intorno del pozzo che, avendo creato una zona ad elevata permeabilità, determina una risposta molto più veloce ed immediata al disturbo creato dalla variazione istantanea di livello (tratto AB). Successivamente, quando il transiente si estende alla zona di acquifero indisturbato, si ottiene una seconda linearizzazione (tratto BC) che è quella significativa ai fini della determinazione della conducibilità idraulica.

L'effetto della doppia linearizzazione si verifica, in particolare, quando il livello statico e la variazione di livello in pozzo ricadono all'interno del tratto finestrato, mentre non dovrebbe prodursi nei casi in cui la variazione di livello ricade nel tratto non finestrato del pozzo o piezometro.

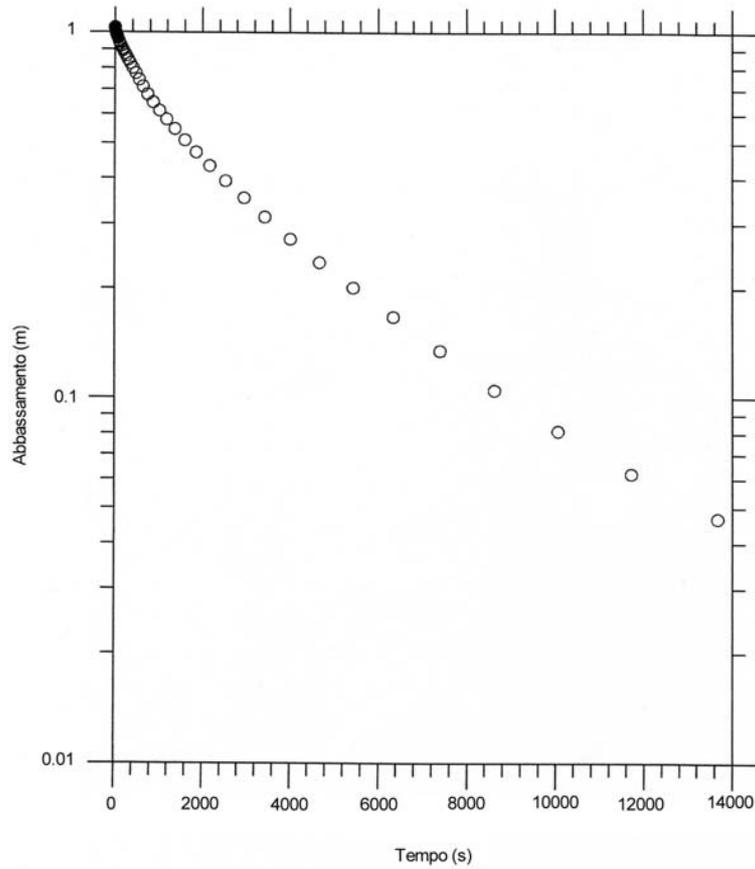


Fig. 13: Influenza dell'immagazzinamento dell'acquifero sulla linearizzazione dei dati sperimentali in diagramma semilogaritmico.

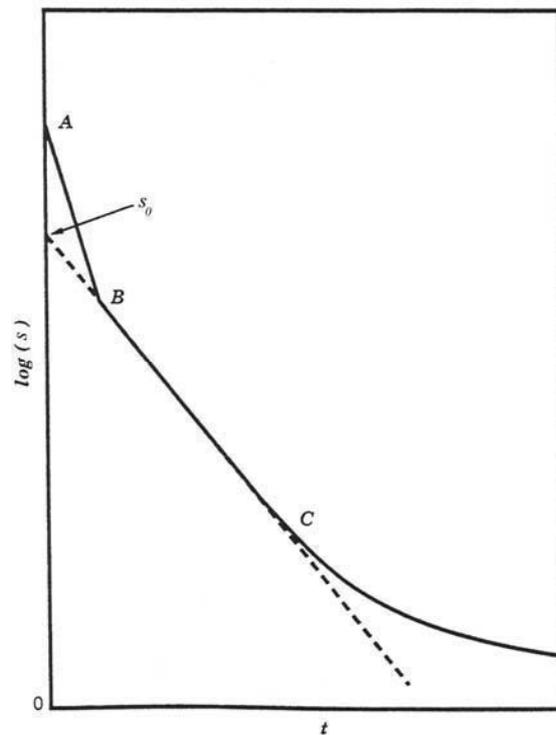


Fig. 14: Rappresentazione schematica dell'effetto di doppia linearizzazione. Da Bouwer (1989).

Influenza delle dimensioni del pozzo e della lunghezza del tratto finestrato

Da un punto di vista teorico, il diametro del pozzo o del piezometro e la lunghezza del tratto finestrato non giocano alcun ruolo nella interpretazione di uno slug test.

Dal punto di vista pratico, invece, si possono fare alcune considerazioni utili nell'impostazione e nell'interpretazione della prova:

- i valori di r_d e L devono comunque essere tali che il rapporto L/r_d ricada nel campo 5÷1500, per il quale sono disponibili i valori dei parametri A, B e C;
- maggiori sono i valori di r_d e L , più significativo è il valore di conducibilità idraulica ottenuto, in quanto corrispondente ad un volume di acquifero maggiore;
- nel caso di piezometri di piccolo diametro (ad esempio, 5 cm), il valore di conducibilità idraulica ottenibile è significativo di una porzione limitata di acquifero e perciò più esposto alle variazioni spaziali di tale parametro. Inoltre, in tal caso le incertezze sulle dimensioni del dreno e/o della zona sviluppata hanno un'influenza numerica maggiore sulla determinazione della conducibilità idraulica.

Influenza delle condizioni operative

L'analisi di Bouwer e Rice è riferita fondamentalmente a un test in risalita, realizzato cioè creando una diminuzione istantanea del livello idraulico in pozzo e misurando la sua conseguente risalita nel tempo. La prova può anche essere eseguita in declino, cioè immettendo un volume noto di acqua in pozzo e misurando il conseguente declino di livello fino al riequilibrio. Questa condizione operativa fornisce un risultato corretto solo nel caso in cui il livello indisturbato si trovi al di sopra del tratto finestrato del pozzo: in tal caso, infatti, il flusso dal pozzo verso l'acquifero interesserà - correttamente - solo la porzione satura dell'acquifero.

Per contro, nel caso in cui il livello indisturbato si trovi all'interno del tratto finestrato, l'esecuzione di uno slug test in declino determinerebbe un flusso diretto dal pozzo non solo verso la porzione satura dell'acquifero, ma anche verso il tratto insaturo, comportando una maggior velocità di declino e, in ultima analisi, una sovrastima della conducibilità idraulica.

Influenza della tipologia dell'acquifero

Pur essendo l'analisi di Bouwer e Rice riferita agli acquiferi non confinati, Bouwer (Bouwer, 1989) ne ha esteso l'applicabilità anche alle altre tipologie idrauliche (acquiferi confinati e semiconfinati). Da un punto di vista teorico, maggiore è la distanza tra il top del tratto finestrato e il livello impermeabile o semipermeabile che confina in alto l'acquifero, maggiore è l'affidabilità del risultato ottenibile.

2.4.3 Il metodo di Cooper, Bredehoeft e Papadopoulos

Pur essendo antecedente (1967), il metodo di Cooper Bredehoeft e Papadopoulos presenta il vantaggio di prendere in esame l'immagazzinamento della formazione; per contro, esso è riferito solo a formazioni confinate, oltre che omogenee, isotrope e di estensione illimitata.

Il pozzo è assunto come completo, vale a dire finestrato lungo tutto lo spessore saturo dell'acquifero; è valida la legge di Darcy.

Con tali ipotesi, l'equazione differenziale di governo è la classica equazione bidimensionale di diffusività scritta in coordinate radiali:

$$(16) \quad \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

con le seguenti condizioni al contorno:

$$\begin{aligned}
 (17) \quad & h(r_w, t) = s(t) && \text{per } t > 0 \\
 (18) \quad & h(\infty, t) = 0 && \text{per } t > 0 \\
 (19) \quad & h(r, 0) = 0 && \text{per } r > r_w \\
 (20) \quad & 2\pi r_w T \frac{\partial h}{\partial r}(r_w, t) = \pi r_c^2 \frac{s_s(t)}{st} && \text{per } t > 0 \text{ (bilancio di massa)} \\
 (21) \quad & s(0) = s_o = \frac{V}{\pi r_c^2}
 \end{aligned}$$

nelle quali h esprime il carico idraulico riferito al valore nullo posto a $r = \infty$ (oppure la generica variazione di carico idraulico nell'acquifero), r_w è il raggio della colonna finestrata, r_c il raggio della colonna cieca in cui è avvenuta la variazione di livello istantanea creata dall'immissione e dall'estrazione di un volume V di acqua, vedasi Fig. 15.

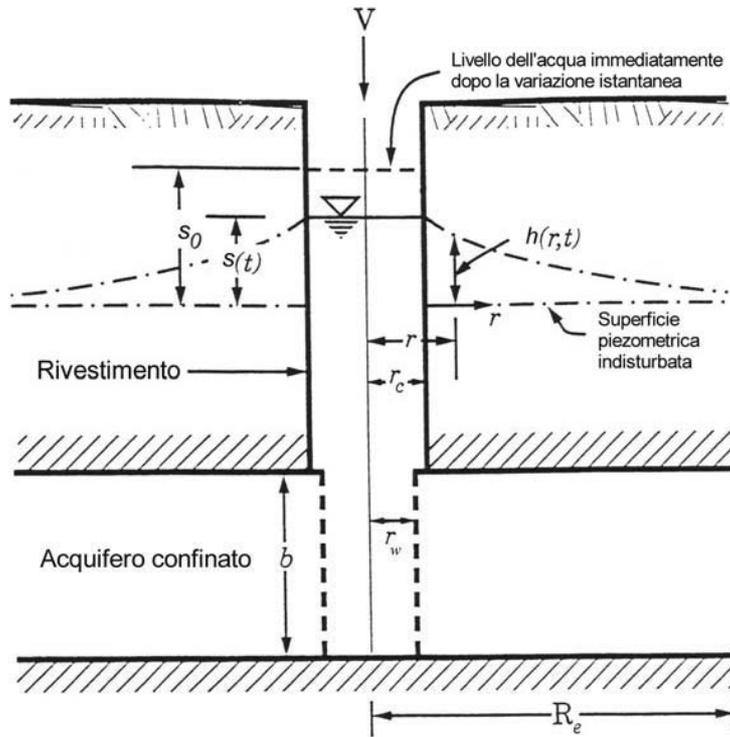


Fig. 15: Definizione dei parametri geometrici di un pozzo o piezometro completato in un acquifero confinato.

Con tali ipotesi, applicando la trasformata di Laplace, Cooper, Bredehoeft e Papadopoulos ottennero la seguente soluzione:

$$(22) \quad \frac{s}{s_0} = F(\alpha, \beta)$$

essendo: $\alpha = \frac{r_w^2}{r_c^2} \cdot S, \quad \beta = \frac{T \cdot t}{r_c^2}$

e $F(\alpha, \beta)$ un integrale complesso:

$$(23) \quad F(\alpha, \beta) = \frac{8\alpha}{T_i^2} \int_0^\infty \exp\left(-\beta \frac{u^2}{a}\right) \frac{i}{u\Delta(u)} du$$

in cui $\Delta(u)$ sono le radici dell'equazione

$$(24) \quad \Delta(u) = [u J_0(u) - 2\alpha J_1(u)]^2 + [u Y_0(u) - 2\alpha Y_1(u)]^2$$

nella quale J_0 e Y_0 , J_1 e Y_1 sono le funzioni di Bessel di 1^a e 2^a specie, rispettivamente di ordine zero e uno.

I valori numerici di s/s_0 per diversi valori di α e β sono stati tabulati e diagrammati (Batu, 1998), vedasi Fig. 16. L'interpretazione di uno slug test con il metodo di Cooper Bredehoeft Papadopulos può essere effettuata applicando una procedura di sovrapposizione con la curva campione, del tutto simile a quella applicata nell'interpretazione delle prove di falda:

- diagrammare i valori delle variazioni di livello normalizzate s/s_0 in funzione del tempo su un diagramma simillogaritmico (scala lineare per gli abbassamenti normalizzati e logaritmica per i tempi), avente gli stessi moduli di scala delle curve tipo di Cooper Bredehoeft Papadopulos disponibili;
- sovrapporre le curve tipo al diagramma sperimentale;
- traslando solo secondo la direzione degli assi, ottenere la migliore sovrapposizione possibile fra la curva sperimentale e una delle curve teoriche disponibili;
- individuare il valore di α della curva su cui è avvenuta la sovrapposizione;
- avendo bloccato la sovrapposizione, scegliere un qualsiasi match point, che sarà caratterizzato in ascissa (scala logaritmica) dalle coordinate t^* (sulla curva sperimentale) e β^* sulla curva campione;
- calcolare le due incognite:

$$(25) \quad T = \beta * \frac{r_c^2}{t^*}$$

$$(26) \quad S = \alpha * \frac{r_c^2}{r_w^2}$$

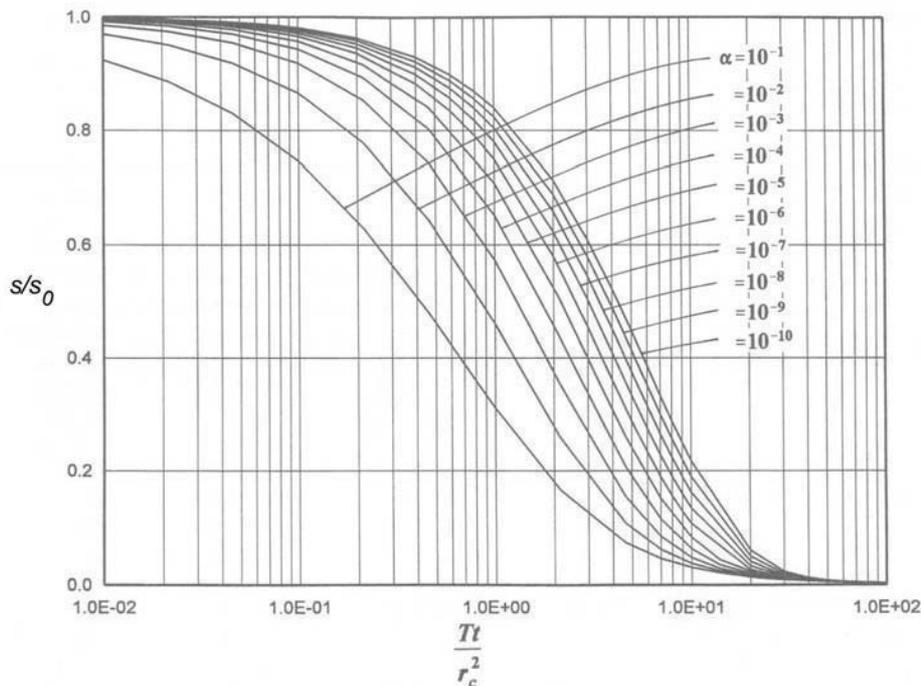


Fig. 16: Curve campione di Cooper, Bredehoeft e Papadopulos per l'interpretazione di uno slug test.

Nell'applicazione del metodo Cooper Bredehoeft Papadopulos si evidenziano alcuni limiti.

- la geometria delle curve campione differisce molto poco da una all'altra, per cui spesso non è univoca la sovrapposizione con la curva sperimentale. Se ciò non influisce molto nella determinazione della trasmissività T , influisce invece sensibilmente nella determinazione del coefficiente di immagazzinamento S . Variando α (e quindi S) di un ordine di grandezza, la geometria della curva campione varia limitatamente;
- la soluzione di Cooper Bredehoeft Papadopulos presuppone che il flusso sia perfettamente radiale, condizione che si verifica solo nell'ipotesi di pozzo o piezometro completo, che è difficilmente riscontrabile in un acquifero confinato.

L'errore introdotto è comunque trascurabile quando il tratto finestrato supera di almeno venti volte il raggio di pozzo, condizione questa generalmente verificata.

2.4.4 Il metodo KGS

Nel 1994 un gruppo di ricercatori del Kansas Geological Survey (Hyder, Butler, Mc Elwee e Liu, 1994) hanno presentato una soluzione semianalitica rigorosa per l'interpretazione di uno slug test eseguito in pozzi a parziale penetrazione e/o completamente, utilizzando un modello tridimensionale che incorpora l'effetto dell'immagazzinamento della formazione acquifera. Il loro modello prende in esame due distinte condizioni al contorno per il top della formazione: flusso nullo (come il modello CBP) e carico idraulico costante (come il modello Bouwer e Rice); le loro soluzioni possono pertanto essere applicate all'interpretazione di slug test eseguiti sia in acquiferi confinati, che non confinati.

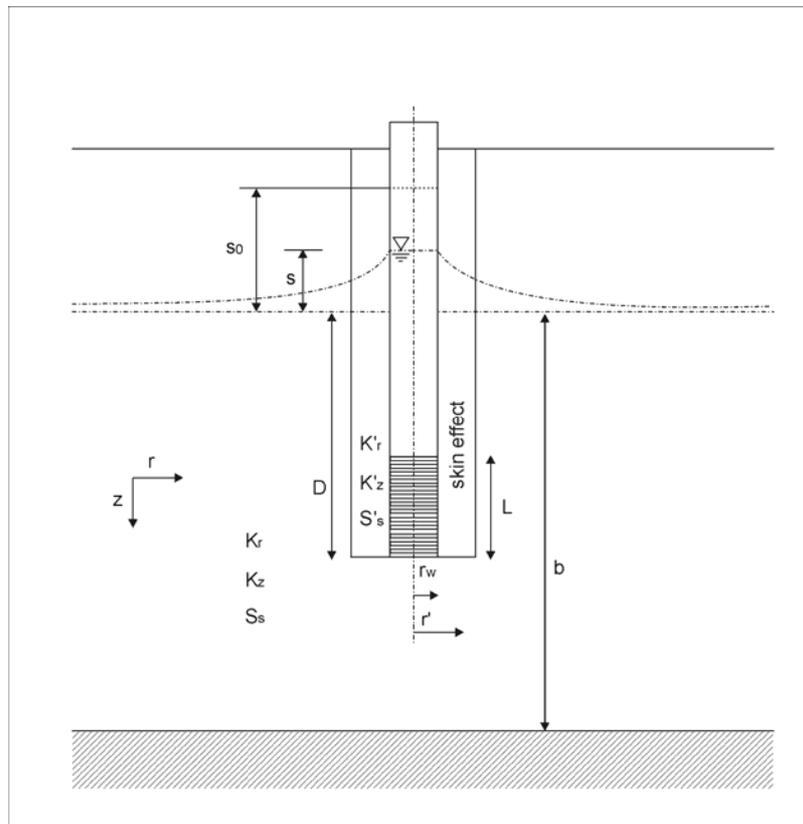


Fig. 17: Definizione dei parametri geometrici di un pozzo o piezometro relativi al metodo KGS.

In sintesi, pertanto, il modello KGS prende in esame:

- l'immagazzinamento della formazione;
- il bilancio di massa pozzo-acquifero;
- la parziale penetrazione del pozzo o piezometro;
- l'eventuale anisotropia della formazione;
- il danneggiamento di permeabilità nell'intorno del pozzo;
- le tipologie di acquifero confinato e non confinato.

La generalità delle soluzioni offerte viene naturalmente "pagata" da una maggiore complessità rispetto ai metodi finora esaminati; l'applicazione del metodo KGS è stata recentemente facilitata dallo sviluppo del software AQTESOLV (Duffield, 2000).

In termini generali, vedasi Fig. 17, la variazione di livello adimensionale s/s_0 può essere espressa come:

$$\frac{s}{s_0} = f(K_r, K_z, S_s, K'_r, K'_z, S'_s, L, D, b)$$

nella quale i parametri con apice si riferiscono alla corona circolare nell'intorno del pozzo, ove - per effetto dei fluidi di perforazione e di un non adeguato sviluppo si può verificare un danneggiamento di permeabilità (skin effect).

In Fig. 18 è presentata una famiglia di curve campione per una assegnata geometria di completamento.

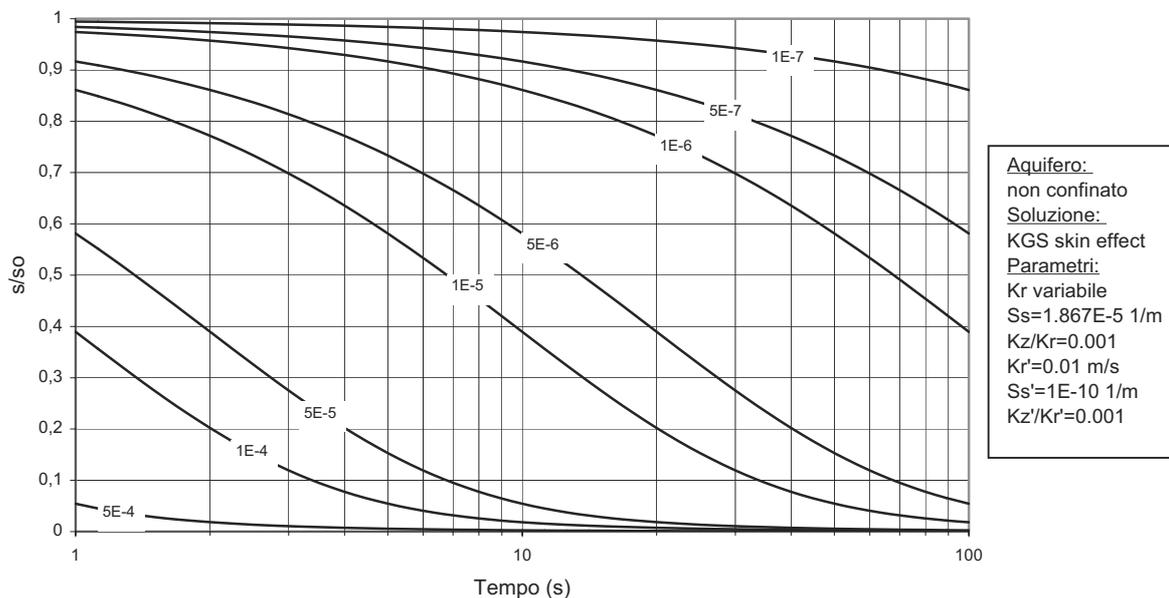


Fig. 18: Famiglia di curve campione per una assegnata geometria di completamento, metodo KGS.

L'interpretazione di uno slug test con il metodo KGS segue il principio della sovrapposizione della curva sperimentale con una delle curve campione, vedasi Fig. 19, che vengono generate dal software citato.

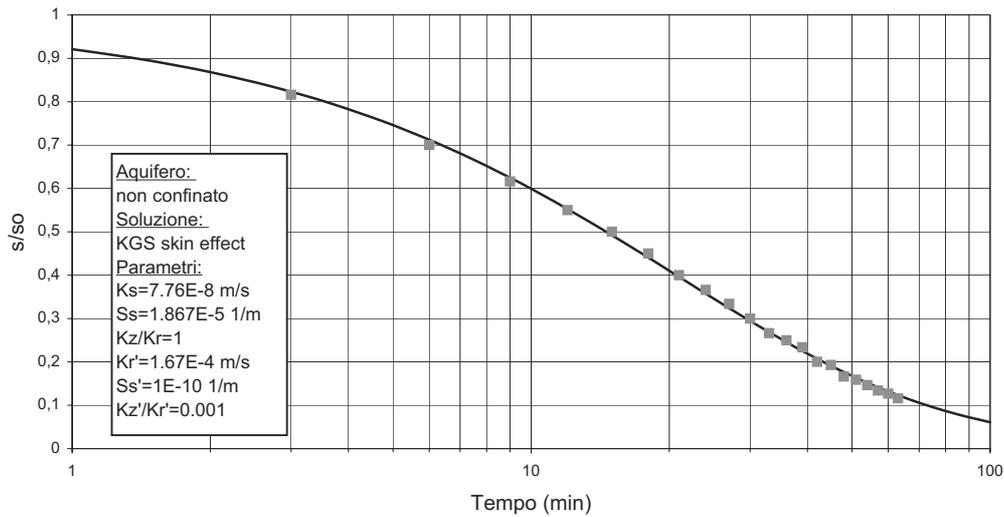


Fig. 19: Esempio di interpretazione di uno slug test con il metodo KGS.

3. CARATTERIZZAZIONE DELLA CONTAMINAZIONE

La caratterizzazione della contaminazione a carico di un sistema acquifero consiste nel definire qualitativamente e quantitativamente l'entità del fenomeno di inquinamento in atto, in termini di tipologia, estensione e concentrazione dei contaminanti presenti, e degli eventuali fenomeni di attenuazione in corso.

La comprensione dei processi di trasporto e propagazione di uno o più inquinanti in un sistema acquifero è obiettivo di una certa complessità, essendo il risultato dell'azione concomitante di una serie di processi che possono essere raggruppati, schematicamente, in tre categorie:

- *fenomeni idrologici*, legati cioè alla presenza e al movimento dell'acqua di falda; sono i fenomeni quantitativamente più importanti e comprendono l'advezione (o convezione), la diffusione molecolare e la dispersione cinematica;
- *fenomeni chimico-fisici*, comprendenti sia le possibili interazioni fra le molecole dell'inquinante e le particelle solide dell'acquifero o fra molecole di inquinanti diversi, che le variazioni di concentrazione dovute all'evoluzione chimico-fisica di alcuni contaminanti; in questa categoria rientrano pertanto fenomeni come l'adsorbimento superficiale, la volatilizzazione, la precipitazione, le trasformazioni chimiche, il decadimento radioattivo, etc.;
- *fenomeni biologici*, comprendenti tutti quei fenomeni di degradazione e trasformazione degli inquinanti, provocati da agenti biotici e che vanno sotto il nome di fenomeni di biodegradazione.

Ne consegue che la distribuzione di un contaminante in falda dipende da una serie di fattori, i più importanti dei quali sono legati alla natura del contaminante (densità, miscibilità con l'acqua di falda, viscosità), alle caratteristiche dell'acquifero (conducibilità idraulica, porosità, grado di eterogeneità), alla natura del rilascio (geometria della sorgente o delle sorgenti inquinanti, immissione impulsiva oppure continua), all'instaurarsi di fenomeni di biodegradazione.

Non potendo affrontare i fondamenti della propagazione dei contaminanti in falda, argomento che esula dalla presente trattazione, nel presente capitolo ci si limita a descrivere le tecniche e le modalità di campionamento più idonee per la determinazione della tipologia e dell'estensione spaziale di una contaminazione in un sistema acquifero.

3.1 Concentrazioni limite accettabili nelle acque di falda

I valori di concentrazione limite accettabili nelle acque di falda sono state definite nell'Allegato 1 al D.M. 471/99 e riportate in Tab. 7. Tali limiti, a differenza di quelli del suolo, risultano essere indipendenti dalla destinazione d'uso del sito.

Tab. 7: Valori di concentrazione limite accettabili nelle acque sotterranee

N. ord.	SOSTANZE	Valore limite (µ/l)
METALLI		
1	Alluminio	200
2	Antimonio	5
3	Argento	10
4	Arsenico	10
5	Berillio	4
6	Cadmio	5
7	Cobalto	50
8	Cromo totale	50
9	Cromo (VI)	5
10	Ferro	200
11	Mercurio	1
12	Nichel	20
13	Piombo	10
14	Rame	1000
15	Selenio	10
16	Manganese	50
17	Tallio	2
18	Zinco	3000
INQUINANTI INORGANICI		
19	Boro	1000
20	Cianuri liberi	50
21	Fluoruri	1500
22	Nitriti	500
23	Solfati (mg/l)	250
COMPOSTI ORGANICI AROMATICI		
24	Benzene	1
25	Etilbenzene	50
26	Stirene	25
27	Toluene	15
28	para-Xilene	10
POLICICLICI AROMATICI		
29	Benzo(a)antracene	0.1
30	Benzo(a)pirene	0.01
31	Benzo(b)fluorantene	0.1
32	Benzo(k,)fluorantene	0.05
33	Benzo(g, h, i),perilene	0.01
34	Crisene	5
35	Dibenzo(a, h)antracene	0.01
36	Indeno(1,2,3 - c,d)pirene	0.1
37	Pirene	50
38	Sommatoria (31, 32, 33, 36)	0.1
ALIFATICI CLORURATI CANCEROGENI		
39	Clorometano	1.5
40	Triclorometano	0.15
41	Cloruro di vinile	0.5
42	1,2-Dicloroetano	3
43	1,1 Dicloroetilene	0.05
44	1,2 Dicloropropano	0.15
45	1,1,2-Tricloroetano	0.2
46	Tricloroetilene	1.5
47	1,2,3-Tricloropropano	0.001
48	1,1,2,2-Tetracloroetano	0.05
49	Tetracloroetilene	1.1
50	Esaclorobutadiene	0.15
51	Sommatorio organoalogenati	10
ALIFATICI CLORURATI NON CANCEROGENI		
52	1,1-Dicloroetano	810

53	1,2-Dicloroetilene	60
ALIFATICI ALOGENATI CANCEROGENI		
54	Tribromometano	0.3
55	1,2-Dibromoetano	0.001
56	Dibromoclorometano	0.13
57	Bromodiclorometano	0.17
NITROBENZENI		
58	Nitrobenzene	3.5
59	1,2-Dinitrobenzene	15
60	1,3-Dinitrobenzene	3.7
61	Cloronitrobenzeni (ognuno)	0.5
CLOROBENZENI		
62	Monoclorobenzene	40
63	1,2-Diclorobenzene	270
64	1,4-Diclorobenzene	0.5
65	1,2,4-Triclorobenzene	190
66	1,2,4,5-Tetraclorobenzene	1.8
67	Pentaclorobenzene	5
68	Esaclorobenzene	0.01
FENOLI E CLOROFENOLI		
69	2-Clorofenolo	180
70	2,4-Diclorofenolo	110
71	2,4,6-Triclorofenolo	5
72	Pentaclorofenolo	0.5
AMMINE AROMATICHE		
73	Anilina	10
74	Difenilamina	910
75	p-Toluidina	0.35
FITOFARMACI		
76	Alaclor	0.1
77	Aldrin	0.03
78	Atrazina	0.3
79	α -esacloroetano	0.1
80	β -esacloroetano	0.1
81	γ -esacloroetano (Lindano)	0.1
82	Clordano	0.1
83	DDD, DDT, DDE	0.1
84	Dieldrin	0.03
85	Endrin	0.1
86	Sommatoria fitofarmaci	0.5
DIOSSINE E FURANI		
87	Sommatoria PCDD, PCDF (conversione TEF)	4×10^{-6}
ALTRE SOSTANZE		
88	PCB	0.01
89	Acrilammide	0.1
90	n-esano	350
91	Acido para-ftalico	37000
92	Amianto (fibre A>10 mm)*	da definire

* Non sono disponibili dati di letteratura tranne il valore di 7 milioni fibre/l comunicato da ISS, ma giudicato da ANPA e dallo stesso ISS troppo elevato. Per la definizione del limite si propone un confronto con ARPA e Regioni.

Per le sostanze non indicate in Tabella si adottano i valori di concentrazione limite accettabili riferiti alla sostanza più affine tossicologicamente.

3.2 Ubicazione dei punti di campionamento

Il numero e l'ubicazione dei punti di campionamento devono essere individuati in maniera da corrispondere agli obiettivi generali del D.M. 471/99, primi fra tutti la definizione del grado e dell'estensione volumetrica dell'inquinamento nel sistema acquifero e la presenza di eventuali sorgenti di contaminazione nel mezzo non saturo.

In accordo con l'Allegato 2 al Decreto citato, due sono le principali strategie da seguire per l'ubicazione delle verticali di sondaggio e di campionamento:

- una strategia basata sulle indicazioni derivanti dai dati generali raccolti sul sito e dal modello concettuale preliminare, formulato sulla presenza e propagazione dei contaminanti; questo criterio tende a privilegiare l'ubicazione in alcuni settori rispetto alla generalità dell'area;
- una strategia di tipo statistico, che affida ad una griglia predefinita la ricostruzione della contaminazione e che è preferibile nelle situazioni in cui le informazioni disponibili all'atto della formulazione del piano di caratterizzazione siano insufficienti a prevedere la localizzazione delle più probabili sorgenti di contaminazione

Per quanto concerne il prelievo di campioni di suolo, sottosuolo e materiali di riporto, il D.M. 471/99 suggerisce, nel caso in cui si proceda con una disposizione a griglia, che il lato di ogni maglia sia compreso tra 25 e 100 m a seconda del tipologia e delle dimensioni del sito oggetto di indagine. I punti di indagine possono essere localizzati in corrispondenza dei nodi della griglia (ubicazione sistematica) oppure all'interno di ogni maglia in posizione opportuna (ubicazione sistematica casuale), oppure posizionati casualmente all'interno delle maglie della griglia a seconda dei dati conoscitivi ottenuti dalla fase di indagine preliminare o della situazione logistica (presenza di infrastrutture, ecc.). Sulla base delle dimensioni del sito da investigare, il D.M. 471 fornisce le indicazioni riportate in Tab. 8.

Tab. 8: Numero minimo di punti di campionamento di suolo, sottosuolo, materiali di riporto suggeriti dall'Allegato 2 al D.M. 471/99.

Superficie del sito m ²	Punti di campionamento
< 10.000	almeno 5 punti
10.000-50.000	da 5 a 15 punti
50.000-250.000	da 15 a 60 punti
250.000-500.000	da 60 a 120 punti
> 500.000	almeno 2 punti ogni 10.000 m ²

Per quanto riguarda il prelievo di campioni di acque sotterranee, l'Allegato 2, prescrive che venga realizzato un numero minimo di piezometri che consentano sia il campionamento dell'acqua di falda, sia il monitoraggio delle caratteristiche piezometriche, vedasi Tab. 9. I piezometri devono essere realizzati a carotaggio continuo ed essere completati con materiali compatibili con i contaminanti potenzialmente presenti, vedasi par. 3.10.

Tab. 9: Numero minimo di piezometri suggeriti dall'Allegato 2 al D.M. 471/99.

Superficie del sito m ²	Piezometri n°
≤ 50.000	almeno 4
50.000-100.000	almeno 6
100.000-250.000	almeno 8
>250.000	almeno 1 punto ogni 25.000 m ²

Si precisa inoltre che almeno uno dei piezometri per ciascun acquifero considerato, debba essere installato immediatamente a monte del sito (in senso idrogeologico) in modo da permettere il prelievo del campione di fondo naturale (si veda par. 3.9.2) ed almeno uno a valle del sito. Risulta evidente come un numero così ridotto di punti di campionamento delle acque sotterranee sia insufficiente per la caratterizzazione di una contaminazione del sistema acquifero. Tali linee guida

sono pertanto da ritenersi adeguate solo alla fase preliminare delle indagini. Sarà pertanto necessario integrare il numero e l'ubicazione dei punti di campionamento sulla base dei risultati della analisi chimico-fisiche e della definizione dei focolai di contaminazione; a questo proposito, per integrare la rete di campionamento delle acque sotterranee, si suggerisce di utilizzare lo stesso criterio fornito per il campionamento di suolo e sottosuolo (Tab. 8). In ogni caso, gli ulteriori sondaggi e relativi campionamenti devono permettere di circoscrivere completamente l'area contaminata.

3.3 Frequenza verticale di campionamento

La necessità di ricostruire tridimensionalmente il grado di contaminazione è di grande importanza, ma lo è particolarmente in tutti quei casi in cui la natura dei contaminanti e l'interazione di questi con il sistema acquifero determini stratificazioni verticali di concentrazione.

E' il caso di contaminazione imputabile a composti non miscibili con l'acqua quali i NAPL (*Non Aqueous Phase Liquids*), che, secondo una comune classificazione in base alla densità relativa all'acqua, possono essere suddivisi in:

- LNAPL (*Light NAPL*), che sono caratterizzati da una densità minore dell'acqua e, quindi, tendono a galleggiare sulla tavola d'acqua (Fig. 20);

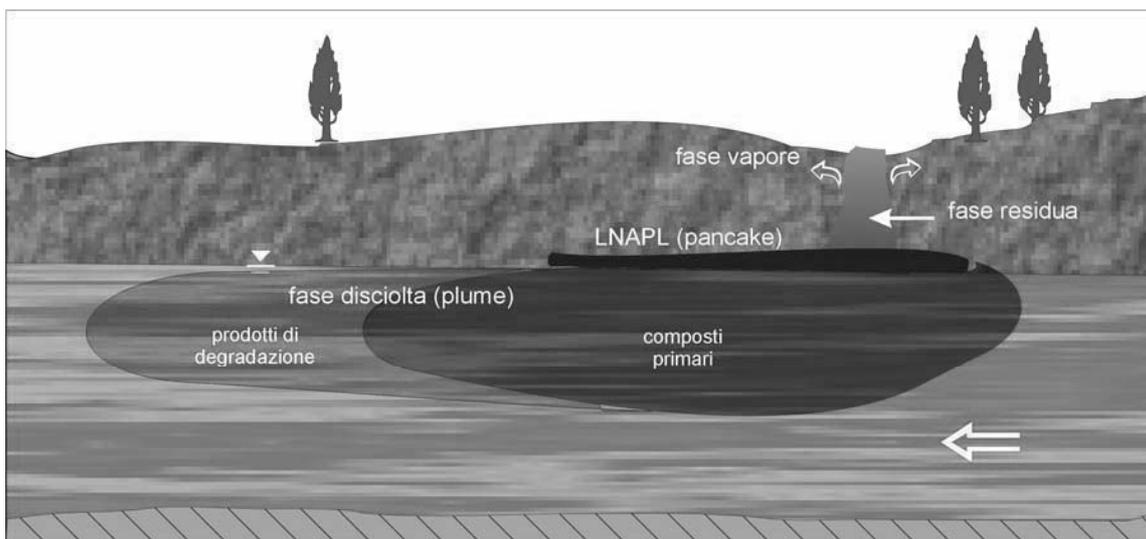


Fig. 20: Comportamento di un LNAPL nel sottosuolo.

- DNAPL (*Dense NAPL*), che presentano densità maggiore dell'acqua e tendono in alcuni casi a penetrare in profondità nel sistema acquifero (Fig. 21).

Non si vuole entrare nel merito trattazione della complessa dinamica di un NAPL nel sottosuolo, basti dire che l'interpretazione di questo fenomeno in un sistema acquifero deve essere condotta tramite una efficace campagna di campionamento che permetta l'individuazione dei contaminanti e della distribuzione volumetrica delle concentrazioni, sia in fase acquosa, sia in fase segregata, senza trascurare la possibile presenza di prodotti di degradazione. In tale contesto è evidente che può essere considerato corretto e rappresentativo solamente un approccio che consenta il prelievo di campioni a diverse profondità stabilite.

Un campionamento discreto può essere eseguito mediante due approcci distinti:

- piezometri multilivello;
- tecniche puntuali direct push.

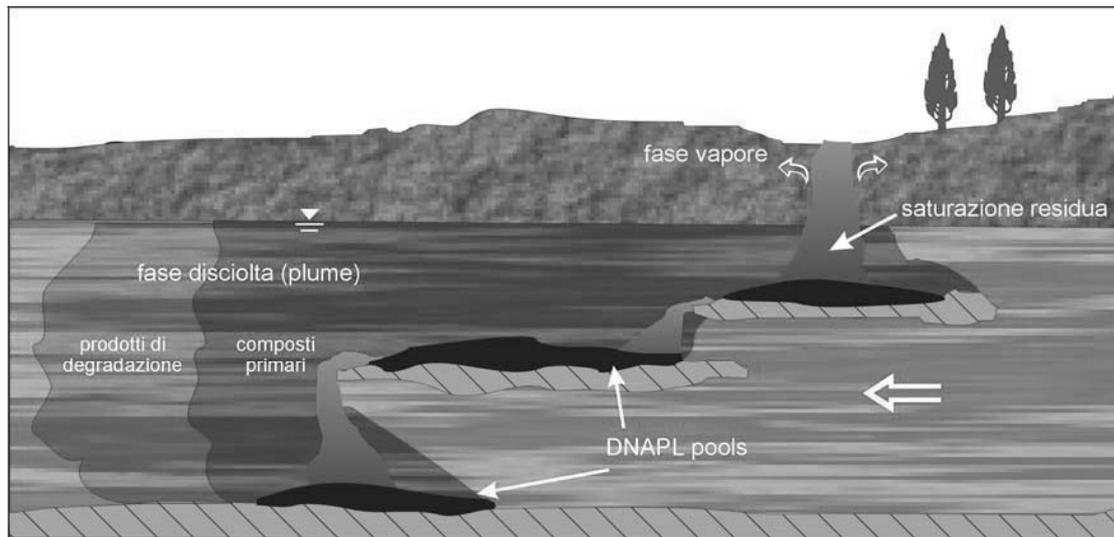


Fig. 21: Comportamento di un DNAPL nel sottosuolo.

Per quanto riguarda la massima profondità da raggiungere, l'Allegato 2 al D.M. 471/99 prescrive che la caratterizzazione interessi *“almeno la base del primo acquifero individuato e comunque profondità non inferiori a due terzi dell'acquifero stesso”*.

3.3.1 Piezometri multilivello

I vantaggi derivanti dal disporre di un sistema di monitoraggio multilivello, rispetto ai sistemi tradizionali, sono notevoli. E' possibile, infatti, ricostruire tridimensionalmente il grado di contaminazione di un sito conoscendo le concentrazioni degli inquinanti, in ciascun punto di osservazione, lungo la verticale. Questi sistemi permettono, inoltre, una migliore comprensione delle condizioni locali di flusso, permettendo la misura dei carichi idraulici a differenti profondità. Un monitoraggio multilivello all'interno di piezometri può essere condotto secondo le seguenti modalità (Fig. 22):

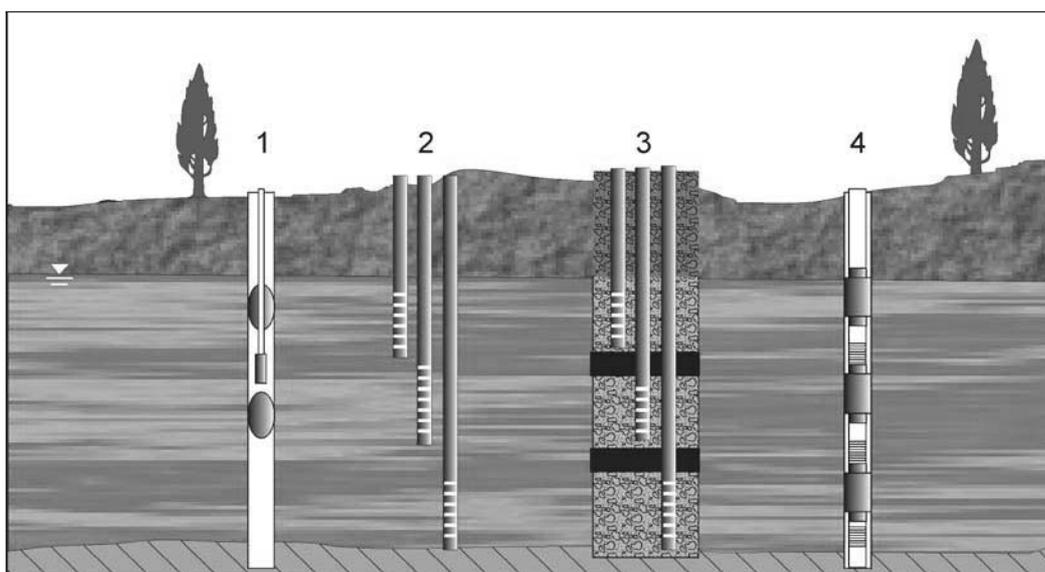


Fig. 22: Sistemi di misura multilivello in piezometri: 1) packer doppio, 2) cluster in perfori separati, 3) cluster in un singolo perforo 4) sistemi multilivello.

- *Doppio packer a fine completamento*: dopo aver eseguito il completamento del piezometro viene introdotta una coppia di packer per isolare una porzione di acquifero. Questo sistema è sconsigliato in quanto non è possibile evitare fenomeni di cross-contaminazione e di circolazione all'interno del dreno. Le operazioni risultano, inoltre, lente e laboriose.
- *Cluster di piezometri in perfori separati*: consiste nella disposizione ravvicinata di una serie di piezometri di piccolo diametro finestrati a profondità differenti. Risulta costoso perché moltiplica i costi di perforazione.
- *Cluster di piezometri in un singolo perforo (nested wells)*: consiste nella disposizione di una serie di colonne piezometriche all'interno di uno stesso perforo, tra di loro isolate mediante anelli bentonitici e cementazione. Il maggior problema legato a questi sistemi consiste nella difficoltà di installazione dei sigilli bentonitici che possono non garantire un perfetto isolamento idraulico; inoltre, l'operazione di spurgo risulta essere generalmente lunga a causa del grosso diametro del dreno circostante la colonna piezometrica.
- *Sistemi multilivello*: sono generalmente costituiti da una colonna equipaggiata di packer ed in alcuni casi di pompe sommerse in grado di vettoriare l'acqua in superficie. Possono essere rimossi con relativa facilità dal piezometro in cui vengono calati ed hanno il vantaggio di richiedere volumi di spurgo minimi. Tali sistemi, generalmente costosi, sono commercializzati sul mercato con i nomi: Waterloo Groundwater Monitoring System e CMT Multilevel System della Solinst, Westbay MP System, FLUTE System, Multilevel Packer System.

3.3.2 Tecniche direct-push

I sistemi direct push (Geoprobe, Enviroprobe, ecc) sono strumentazioni a percussione che permettono il campionamento discreto – oltre che del terreno e dei gas interstiziali nel mezzo non saturo – dell'acqua di falda, mediante l'utilizzo di un dispositivo di campionamento (generalmente un tubo finestrato in acciaio inossidabile) infisso direttamente nella formazione acquifera (Fig. 23).

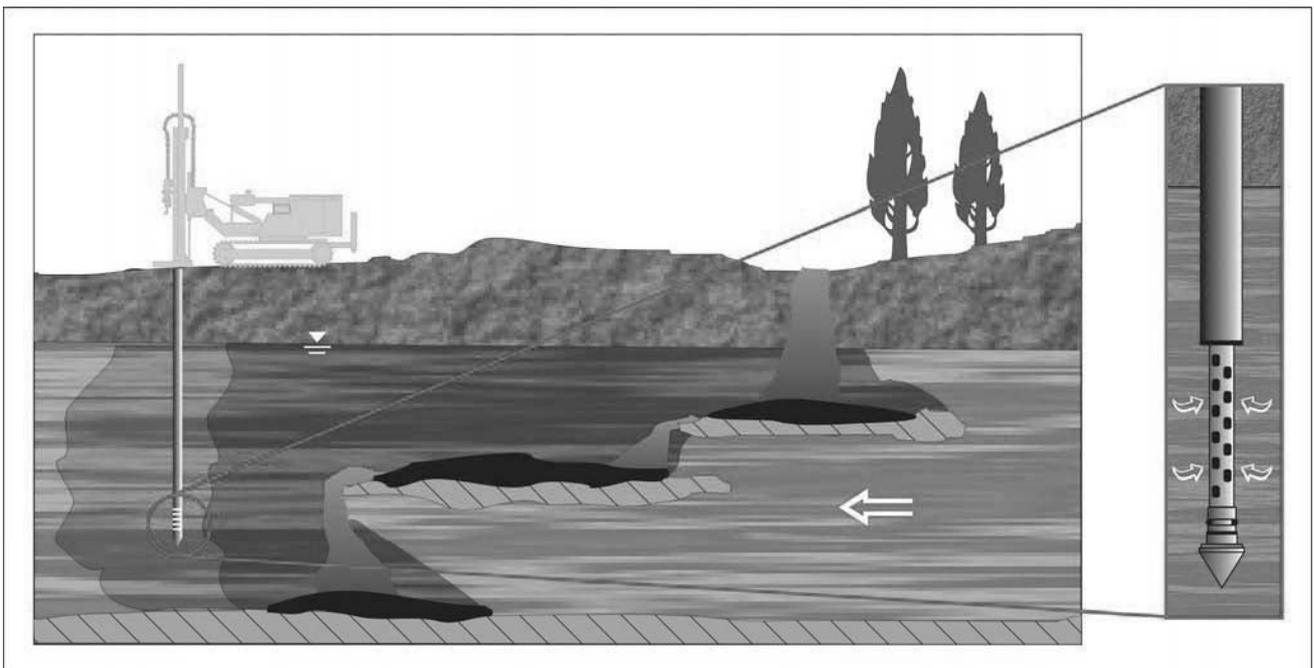


Fig. 23: Tecnica direct-push (a percussione) per la caratterizzazione verticale di una contaminazione in un sistema acquifero.

Tali sistemi permettono di effettuare campionamenti istantanei di acqua nei punti di indagine e presentano i seguenti vantaggi:

- velocità di campionamento;
- costi di campionamento estremamente limitati;
- assenza di fluidi e di residui di perforazione;
- possibilità di campionamento diretto con spurgo minimo;
- campionamento stratificato lungo la verticale;
- possibilità di installare cluster di piezometri in perfori separati.

La versatilità e l'efficienza di queste strumentazioni le ha rese, negli ultimi anni, estremamente utili nella fase di caratterizzazione dei siti contaminati.

L'unica limitazione è legata alla profondità di prelievo, che in genere non può superare i 30-40 m e al diametro della tubazione di campionamento che è di 1.5'' per il prelievo di acque sotterranee.

Il campionamento dell'acqua viene generalmente eseguito per mezzo di pompe inerziali o minuscole bladder pump sommerse.

3.4 *Spurgo*

Lo scopo dello spurgo è quello di permettere il prelievo di un campione rappresentativo di acqua di falda creando il minor disturbo possibile alle condizioni naturali di deflusso.

Per raggiungere tale obiettivo, il volume di acqua che staziona all'interno di un piezometro deve essere eliminato in quanto sottoposto ad equilibri chimici e fisici differenti da quelli presenti nell'acqua di falda. L'interazione con i materiali di rivestimento del pozzo e con l'aria atmosferica rende l'acqua accumulata nel piezometro non rappresentativa delle condizioni chimico-fisiche della falda. Solo a seguito dell'operazione di spurgo è possibile procedere con il campionamento propriamente detto.

La scelta del sistema di spurgo deve essere effettuato in base ai seguenti fattori:

- volume da spurgare;
- possibilità di utilizzo della strumentazione di spurgo anche per il campionamento;
- diametro del punto di campionamento (piezometro o pozzo);
- soggiacenza della falda;
- semplicità delle operazioni di disassemblaggio e decontaminazione;
- facilità di trasporto;
- necessità di fonti esterne di energia;
- costo.

Una rassegna dei sistemi di spurgo e campionamento è riportata al paragrafo 3.6.

Nell'impostazione di un'operazione di spurgo gioca un ruolo critico la portata di emungimento: uno spurgo effettuato a portate troppo elevate può essere fonte di problemi quali incremento della torbidità del campione, prosciugamento del piezometro, richiamo di prodotto surnatante o diluizione del campione. Al fine di minimizzare tali problemi e per ottenere la massima qualità dei campioni, si ritiene che la tecnica più efficace sia quella del *low-flow purging*, ovvero di uno spurgo a bassa portata (< 1 l/min), in grado di minimizzare il disturbo al sistema acquifero, lo stripping di contaminati e la mobilizzazione di solidi sospesi. Questa tecnica è possibile solo con pompe che permettano di regolare la portata fino a valori estremamente bassi.

Per quanto riguarda la scelta dei volumi e dei tempi di spurgo, generalmente si fa riferimento ai tre criteri di seguito illustrati.

3.4.1 Criterio basato sul volume del pozzo

Questo criterio suggerisce di spurgare una quantità di liquido compresa tra 1 e 20 volte il volume del punto di monitoraggio, inteso come la quantità di acqua presente in condizione statiche all'interno della colonna di completamento del pozzo o piezometro, sia al di sopra che al di sotto delle finestrate, ma non all'interno del dreno.

Anche se non è possibile stabilire un criterio univoco, si ritiene generalmente che sia sufficiente spurgare da 3 a 5 volumi di pozzo per garantire la significatività del campione.

Il vantaggio di questo metodo è legato alla semplicità di esecuzione, anche se, nel caso di piezometri di grandi dimensioni, i tempi ed i volumi di spurgo possono essere elevati.

3.4.2 Criterio legato alla stabilizzazione di parametri chimico-fisici

Questo approccio consiste nello spurgo del pozzo a portate estremamente basse, monitorando nel contempo parametri quali conduttanza specifica, pH, temperatura, Eh fino alla loro stabilizzazione.

Raggiunta la stabilizzazione dei parametri indicatori, la portata di spurgo viene ridotta ulteriormente per permettere il campionamento.

La maggior difficoltà consiste nel determinare quale sia il parametro più adatto per indicare l'avvenuta eliminazione dell'acqua stagnante. Alcuni autori hanno messo in evidenza come i parametri più significativi siano l'ossigeno disciolto e la conduttanza specifica, mentre pH e temperatura siano meno attendibili, raggiungendo quasi immediatamente la stabilizzazione. Per la determinazione di tali parametri si raccomanda l'utilizzo di celle multiparametriche, sommerse o accoppiate a celle di flusso, vedasi par. 3.7.

3.4.3 Criterio basato sull'immagazzinamento del pozzo e sui parametri idrodinamici dell'acquifero

Questo criterio si basa sul fatto che la percentuale di acqua che proviene dal sistema acquifero aumenta con il tempo di pompaggio e dipende dal coefficiente di immagazzinamento del pozzo e dalle caratteristiche idrodinamiche del sistema acquifero.

Nota la trasmissività della formazione, il diametro del pozzo e la portata di spurgo, è quindi possibile calcolare il tempo di spurgo richiesto per l'ottenimento di campioni significativi (Fig. 24).

3.5 Campionamento

L'obiettivo primario dell'operazione di campionamento consiste nel prelievo di un campione di acqua che sia il più rappresentativo possibile della composizione chimico-fisica della falda.

Dal momento che l'acqua prelevata dalla falda si trova quasi sempre sottoposta a condizioni di temperatura, pressione, contenuto in gas e stato di ossidoriduzione differenti da quelle che si verificano in corrispondenza del piano campagna, deve essere presa tutta una serie di precauzioni per assicurare che nella fase di prelievo vengano minimizzate le alterazioni del campione. Senza trascurare il fatto che il sistema di campionamento stesso può essere fonte di alterazioni del campione, a causa delle modalità di funzionamento e dei materiali con cui è costruito.

Gli strumenti che introducono aria o gas inerti per il sollevamento del campione, che inducono variazioni di pressioni significative o elevata turbolenza sono da evitare. Inoltre, sono da preferirsi sistemi che applicano una pressione positiva alla tubazione di mandata rispetto a quelli che aspirano il campione, nell'ottica di minimizzare i fenomeni di volatilizzazione.

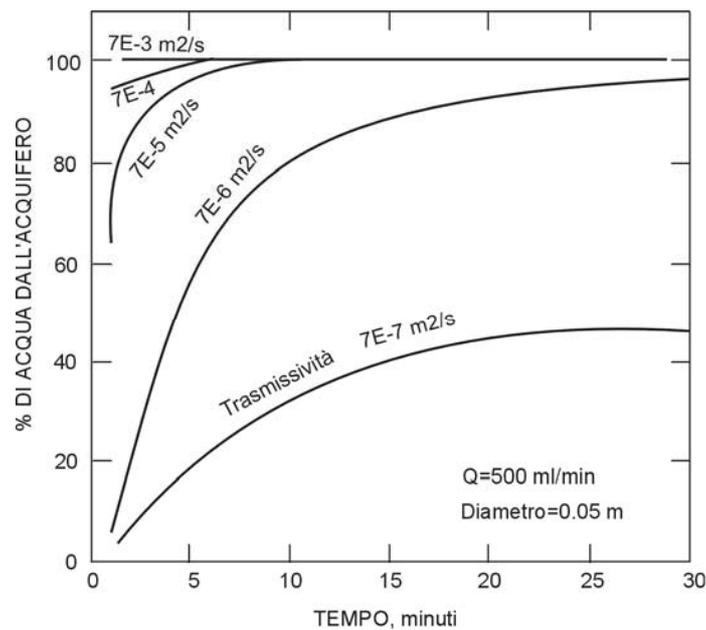


Fig. 24: Percentuale di acqua proveniente dal sistema acquifero in funzione del tempo ed al variare della trasmissività (Gibb et al., 1981)

Per quanto concerne i materiali, questi devono essere scelti in modo da minimizzare i fenomeni di trasferimento di sostanze da e verso il campione quali liberazione di additivi, fenomeni di adsorbimento, ecc. Si deve, inoltre, porre particolare attenzione ai seguenti fattori:

- tipologia dei contaminanti da campionare;
- possibilità di regolare la portata;
- possibilità di eseguire la filtrazione del campione in linea;
- diametro del punto di campionamento;
- soggiacenza della falda;
- semplicità delle operazioni di disassemblaggio e decontaminazione;
- facilità di trasporto;
- necessità di fonti esterne di energia;
- costo.

Una rassegna dei sistemi di campionamento è riportata al paragrafo 3.6.

3.5.1 Portata di campionamento

Nel caso in cui si faccia uso di un sistema di pompaggio per l'estrazione del campione, è necessario porre particolare attenzione alla scelta della portata di emungimento.

Una buona regola da utilizzare è quella di effettuare il campionamento dell'acqua di falda ad una portata inferiore a quella di spurgo del piezometro. Una bassa portata di campionamento è fondamentale per generare il minimo disturbo nella formazione acquifera e per garantire la rappresentatività del campione. Onde evitare di dover utilizzare due sistemi separati per le operazioni di spurgo e campionamento, sarebbe auspicabile disporre di una pompa che permetta la regolazione della portata emunta.

Al fine di ottenere una elevata qualità dei campioni, si ritiene che la tecnica più efficace sia quella del *low-flow sampling*, ovvero di un campionamento a bassissima portata (<300 ml/min), in grado di minimizzare il disturbo al sistema acquifero, lo stripping di contaminati e la

mobilitazione di solidi sospesi. Per raggiungere una tale portata, si consiglia di evitare l'utilizzo di valvole che creerebbero una repentina variazione di pressione (orifice effect) alterando la qualità del campione.

3.5.2 Raccolta del campione

La fase di raccolta del campione all'interno del contenitore, in cui verrà in seguito trasportato al laboratorio, è molto delicata al fine di ottenere risultati analitici significativi.

E' opportuno al riguardo:

- controllare l'assenza di potenziali sorgenti di contaminazione nell'area (motori in funzione, presenza di scarichi) prima di aprire il contenitore;
- aprire il contenitore solo subito prima del campionamento;
- minimizzare turbolenza, agitazione, volatilizzazione, esposizione all'atmosfera, riscaldamento dell'acqua;
- riempire completamente il contenitore minimizzando lo spazio di testa;
- filtrare ed aggiungere conservanti subito dopo la raccolta;
- appare ermeticamente il contenitore;
- identificare in maniera univoca il campione mediante etichettatura.

Una tecnica particolarmente efficace per la raccolta dei campioni, che consente di minimizzare il contatto con l'atmosfera e quindi evitarne le conseguenze, consiste nell'effettuazione del *campionamento in linea*. Questa soluzione, rappresentata in Fig. 25, consiste nel riempimento del recipiente di campionamento mediante una tubazione immersa direttamente nel liquido. Una seconda tubazione permette di eliminare il liquido in eccedenza. Nel caso in cui il recipiente sia trasparente, è possibile constatare visivamente il grado di torbidità del campione e quindi decidere se proseguire o interrompere lo spurgo.

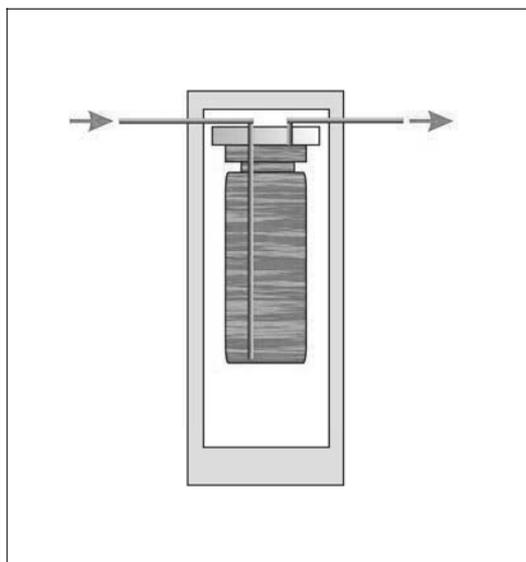


Fig. 25: Campionamento in linea.

Come già indicato precedentemente, è importante minimizzare la presenza dello spazio di testa o di bolle d'aria all'interno del contenitore. Questa precauzione deve essere attuata, in particolare, in quei casi in cui si voglia analizzare la presenza di composti volatili: in tale eventualità, si consiglia di riempire il contenitore fino al limite mantenendo un menisco positivo.

A questo proposito, il diagramma di Pankow (Pankow, 1986), vedasi Fig. 26, fornisce l'errore percentuale nella determinazione analitica di un composto volatile, caratterizzato dal valore della costante di Henry H , in funzione del rapporto tra il volume dello spazio di testa e quello della soluzione acquosa.

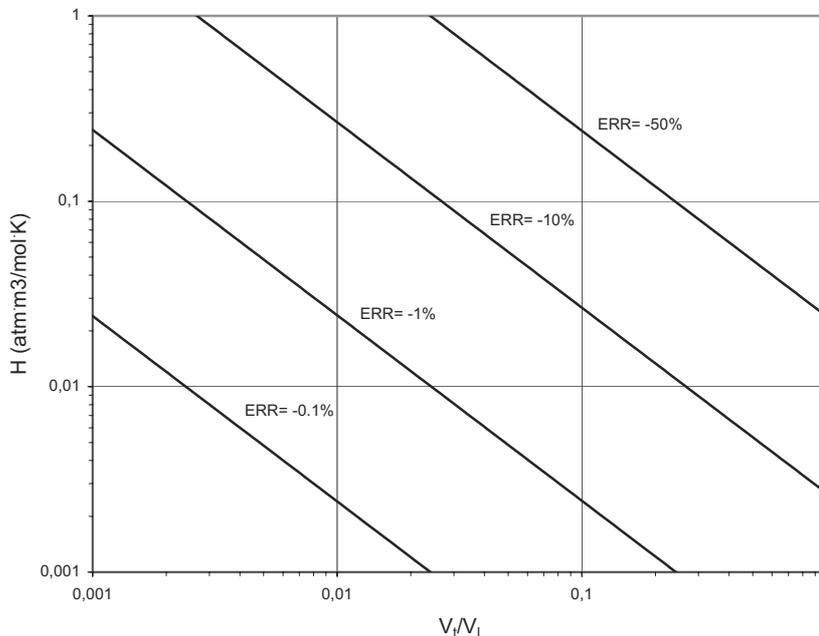


Fig. 26: Diagramma di Pankow (Pankow, 1986) dove H indica la costante di Henry e V_t/V_1 il rapporto tra il volume dello spazio di testa e quello della soluzione.

3.6 Sistemi di campionamento e di spurgo

I sistemi di campionamento e di spurgo possono essere classificati in:

- Campionatori puntuali (*grab samplers*).
- Pompe a pressione positiva (*positive displacement pumps*).
- Pompe aspiranti (*suction lift pumps*).
- Pompe inerziali (*inertial lift pumps*).

I campionatori puntuali (*grab samplers*) permettono di prelevare campioni di acqua ad una profondità discreta senza l'utilizzo di sistemi di pompaggio. Esempi tipici di questi sistemi includono i bailer o i campionatori a siringa.

Con la denominazione *positive displacement* si indicano quei sistemi di pompaggio sommersi che agiscono con una pressione positiva sulla tubazione di mandata e quindi sul fluido, evitando fenomeni di stripping dei componenti volatili. Tali sistemi si suddividono in pompe centrifughe e pompe volumetriche.

Le pompe centrifughe trasferiscono il fluido mediante l'azione dinamica di una palettatura rotante. Sono le più diffuse per la continuità del flusso, privo di caratteristiche pulsanti, per l'adattabilità ad ogni valore di portata, per la facilità di regolazione e il costo contenuto.

Le pompe volumetriche esplicano la loro azione mediante il riempimento e lo svuotamento alternativo di un volume chiuso. Rientrano in questa categoria le *bladder pumps*, le pompe a gas o aria, le pompe a pistone (o a stantuffo), le pompe a ingranaggio.

Le pompe aspiranti (*suction lift pumps*) identificano i sistemi di pompaggio esterni al punto di campionamento, che agiscono con una pressione negativa sulla tubazione di aspirazione. Il limite di

questi sistemi deriva dalla limitata capacità di sollevamento (<10 m) e dalla possibilità di stripping di composti volatili. Anche le pompe aspiranti si possono suddividere in: centrifughe (pompe centrifughe esterne) e volumetriche (pompe peristaltiche).

Le pompe inerziali, infine, sono sistemi semplici che utilizzano la forza di inerzia per richiamare acqua all'interno di una tubazione collegata con la superficie.

Nei paragrafi successivi verranno descritti in dettaglio i principali sistemi utilizzati nella pratica di campionamento e di spurgo.

3.6.1 Bailer

I bailer sono costituiti da un recipiente cilindrico legato ad un cavo utilizzato per immergere il campionatore all'interno del pozzo. I bailer vengono realizzati secondo una grande varietà di stili, dimensioni, materiali e grado di complessità. Generalmente hanno una dimensione compresa tra 1 e 2 metri, ma possono essere costruiti praticamente di ogni lunghezza.

I materiali con i quali viene realizzato il cilindro di campionamento devono garantire un'elevata inerzia chimica e comprendono acciaio inox, PVC, materiali fluorocarburici. Particolare attenzione deve essere rivolta al materiale con il quale viene realizzata la fune di recupero evitando di scegliere tessuti naturali o materiali adsorbenti.

Nella fase di campionamento bisogna immergere e sollevare il campionatore con estrema cautela evitando urti contro le pareti laterali dei piezometri o oscillazioni che potrebbero creare rimescolamenti all'interno della colonna d'acqua.

Per evitare una eccessiva aerazione del campione è possibile utilizzare bailer che si svuotano dal basso.

Vantaggi:

- Possono essere costruiti praticamente in ogni materiale.
- Economici, esistono anche versioni monouso.
- Di facile funzionamento.
- Nessuna limitazione a causa del diametro o della profondità del pozzo.
- Portatili e leggeri.
- Semplici da decontaminare.
- Non richiedono fonti di energia esterne.

Limitazioni:

- Possibile perdita di VOC o alterazione di campioni redox-sensibili.
- La qualità del campionamento dipende fortemente dall'abilità dell'operatore.
- Sconsigliati per lo spurgo.
- Possibili perdite dalle valvole.
- E' possibile effettuare una filtrazione in linea, ma è un processo generalmente lento.

3.6.2 Campionatori a siringa

I campionatori a siringa non sono molto comuni, nonostante il loro funzionamento sia molto simile a quello di una normale siringa medica.

La raccolta del campione richiede l'immersione del sistema alla profondità desiderata; a questo punto, il pistone all'interno della siringa viene azionato per via meccanica o pneumatica permettendo all'acqua di fluire all'interno.

I campionatori a siringa permettono di effettuare il campionamento praticamente a qualsiasi profondità; per contro sono sconsigliati per le operazioni di spurgo. Uno dei vantaggi di questi

sistemi consiste nel fatto che il campione non entra in contatto con l'aria atmosferica.

Vantaggi:

- Possono essere realizzati in differenti materiali a seconda delle necessità.
- Generalmente economici.
- Generalmente facili da far funzionare.
- La maggior parte non ha limitazioni di profondità.
- Efficaci nella raccolta di campioni a profondità determinate.
- Portatili e leggeri.
- Solitamente facili da decontaminare.
- Generalmente non richiedono fonti di energia esterne (alcuni però potrebbero richiedere l'uso di un compressore).

Limitazioni:

- I pistoni sono soggetti a bloccarsi ed a perdere.
- Le operazioni possono essere complesse nel caso in cui si operi a profondità elevate.
- I pistoni sono generalmente costruiti in materiali non inerti.
- La dimensione della camera ha generalmente un volume limitato.
- Non facilmente reperibili sul mercato.

3.6.3 Pompe centrifughe sommerse

In origine le pompe centrifughe sommerse sono state sviluppate per l'uso all'interno dei pozzi di approvvigionamento. Recentemente sono stati prodotti alcuni modelli di piccolo diametro che possono essere utilizzati in piezometri con dimensioni superiori ai 2'', caratteristica che ne ha decretato un largo successo di mercato, vedasi Fig. 27. Le pompe sommerse, a differenza di quelle esterne, agiscono con una pressione positiva sulla tubazione di mandata e quindi sul fluido, evitando fenomeni di stripping.

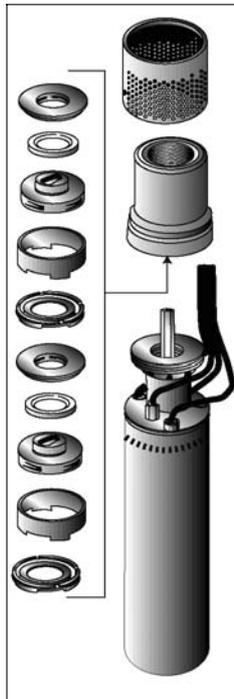


Fig. 27: Schema esplosivo di una pompa centrifuga assiale, utilizzata per il campionamento.

Le pompe centrifughe per analisi ambientali utilizzano come fluido lubrificante e di raffreddamento acqua piuttosto che oli idrocarburici. Le pompe di campionamento vengono generalmente fabbricate in materiali ad elevata inerzia, quali acciai inox, PTFE, Viton o altri ancora, adatti al campionamento di VOC.

Sono disponibili sul mercato pompe in grado di permettere una regolazione della portata in modo che questa si adatti alle diverse esigenze delle fasi di spurgo o di campionamento.

Vantaggi

- Nel caso si utilizzino basse portate di esercizio, il campione prelevato risulta essere di elevata qualità.
- Alcuni modelli permettono regolazione delle portate.
- Hanno capacità di sollevamento da medie ad alte.
- Alcuni modelli sono costruiti da materiali inerti.
- Permettono la filtrazione in linea del campione.

Svantaggi

- I modelli che non permettono di lavorare a basse portate sono inadeguati per il prelievo di campioni contenenti VOC.
- Richiedono una sorgente esterna di energia.
- Il processo di decontaminazione può essere complesso.
- Le pompe più piccole sono portatili, anche se tutto il sistema di campionamento è generalmente ingombrante e pesante da trasportare.

3.6.4 Bladder pumps

Le *bladder pumps* sono pompe volumetriche a immersione, tra le più efficaci per il campionamento di metalli in traccia e di VOC.

Il funzionamento della pompa bladder avviene in due tempi (Fig. 28): nella prima fase si ha il riempimento della camera per effetto della pressione idrostatica attraverso una valvola al fondo della pompa. Non appena la pompa è piena, la valvola di fondo si chiude e comanda l'iniezione di gas tra il corpo della pompa e la camera contenente l'acqua. La camera deformabile viene compressa liberando l'acqua verso la tubazione di mandata.

La capacità di sollevamento della pompa è direttamente correlabile alla pressione con la quale viene iniettato il gas all'interno dell'intercapedine della pompa.

Sono disponibili pompe che possono essere utilizzate in piezometri con diametro superiore ai 3/4", in grado di permettere una regolazione della portata in modo che questa si adatti alle diverse esigenze delle fasi di spurgo o di campionamento, fino a valori bassissimi (*low-flow purging, low-flow sampling*).

Vantaggi

- Nel caso si utilizzino basse portate di esercizio, il campione prelevato risulta essere di elevata qualità.
- Il campione non entra in contatto con il gas compresso o con le parti meccaniche della pompa.
- La camera flessibile può essere costruita con materiali praticamente inerti.
- E' possibile variare la portata di esercizio.
- Permette la filtrazione in linea del campione.
- In alcuni modelli la capacità di sollevamento è estremamente elevata.
- La pompa non si danneggia nel caso in cui vada a secco.

Limitazioni

- Le pompe più piccole sono portatili, ma tutto il sistema di campionamento è generalmente

ingombrante e pesante da trasportare.

- Richiede l'uso di aria compressa e di una strumentazione di controllo.
- Lo spurgo ed il campionamento da pozzi profondi può essere lento.
- La procedura di decontaminazione può essere complessa.
- La camera deformabile può rompersi.

L'utilizzo della pompa richiede addestramento.

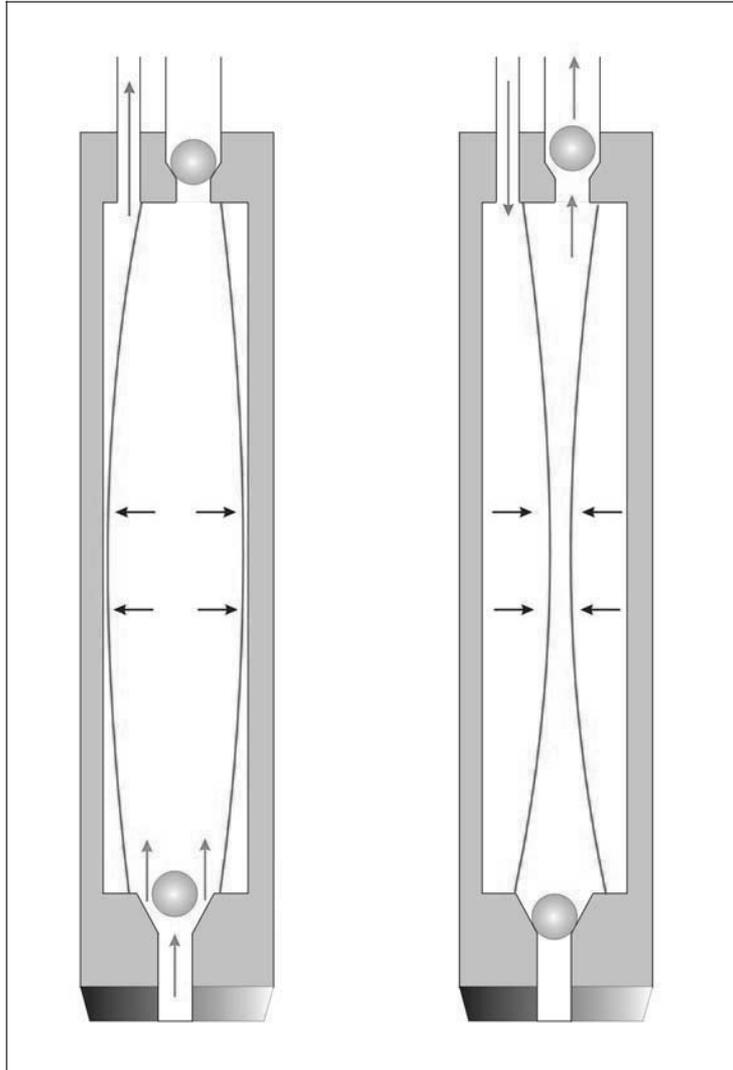


Fig. 28: Fasi del funzionamento di una bladder pump: riempimento e svuotamento della camera.

3.6.5 Pompe a gas o ad aria

Le pompe a gas (*gas or air displacement pumps*) sono sistemi volumetrici di campionamento, a immersione. Il loro funzionamento è legato a cicli di riempimento e svuotamento della camera della pompa per effetto della pressione idrostatica dell'acqua e della pressione esercitata da un gas inerte (es. azoto) o aria, proveniente da una linea dedicata (Fig. 29).

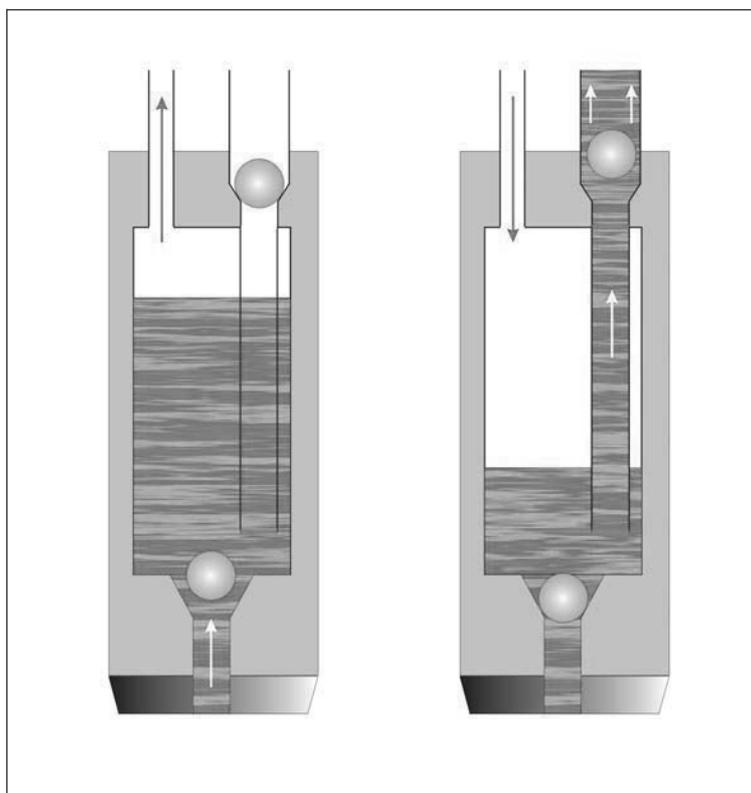


Fig. 29: Fasi di funzionamento di una pompa a gas: riempimento e svuotamento della camera.

Questi sistemi non sono consigliati nel caso in cui si voglia campionare acque contenenti VOC o sostanze redox-sensibili.

Vantaggi

- Portatili ed economiche.
- Disponibili per piezometri con diametri superiori a 1.25'' di diametro.

Svantaggi

- Possono causare l'ossidazione e la volatilizzazione dei campioni.
- Non efficienti per lo spurgo di piezometri con dimensioni superiori ai 2''.
- Richiedono la presenza di un compressore per gas o aria.
- Possono essere difficili da disassemblare, riparare e decontaminare.
- Non funzionano in maniera adeguata in pozzi profondi.

3.6.6 Pompe a pistone

I sistemi di campionamento a pistone rientrano nella categoria delle pompe volumetriche ad immersione. Questi sistemi possono essere azionati per via meccanica o pneumatica e possono essere caratterizzati dalla presenza di uno o più pistoni a singolo o doppio effetto. Con la configurazione a singolo effetto, il pistone si muove di moto alternativo all'interno della camera, prima richiamando l'acqua e poi spingendola lungo il tubo di campionamento. Nella configurazione a doppio effetto (Fig. 30), il movimento del pistone richiama e spinge l'acqua contemporaneamente sia nella fase di ascesa che di discesa del pistone.

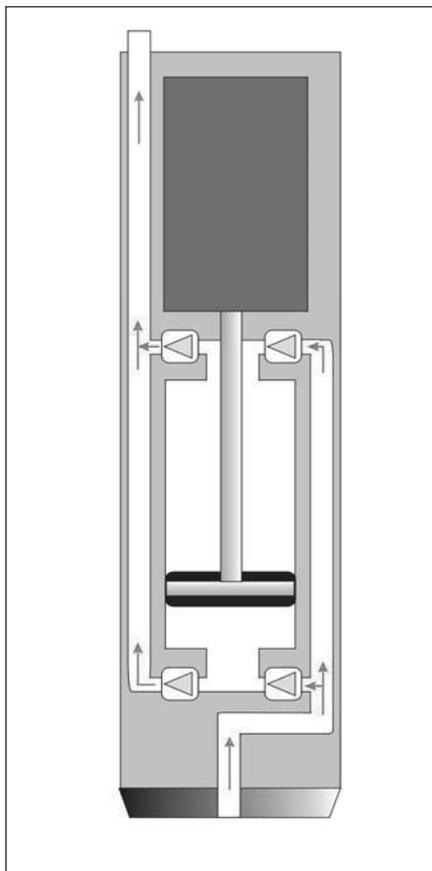


Fig. 30: Pompa a pistone a doppio effetto.

L'azione del pistone può creare forti variazioni di pressione sul campione generando fenomeni di stripping e modificazioni della chimica. Se non realizzato in materiale inerte il pistone può essere soggetto ad adsorbimento dei contaminanti.

Vantaggi

- Elevata capacità di sollevamento.
- Permettono il campionamento in linea del campione.
- Sono disponibili modelli a portata regolabile.
- Funzionamento semplice.
- Disponibili per piezometri di diametro superiore a 2''.

Limitazioni

- Possono danneggiarsi in seguito all'asciugamento del pozzo o a causa della torbidità dell'acqua.
- Generano forti variazioni di pressione sul campione.
- Richiedono una sorgente esterna di energia o di pressione.
- Difficili da disassemblare e da decontaminare in campo.

3.6.7 Pompe a ingranaggio

I sistemi di campionamento ad ingranaggio (*gear-drive pumps*) rientrano nella categoria delle pompe volumetriche ad immersione. Il funzionamento di questi sistemi si basa sullo spostamento del fluido generato da una coppia di ingranaggi, che muovono l'acqua dalla parte bassa della pompa

a quella alta, verso la tubazione di campionamento. Sono disponibili alcuni modelli che permettono una regolazione della portata e sono alimentati a batteria.

Per le fasi di campionamento in cui si preveda la presenza di VOC, vengono preferiti i modelli in cui le parti rotanti sono costruite in PTFE.

Vantaggi

- Possono essere costruite con materiali inerti.
- Portatili e dalle dimensioni contenute.
- Di facile funzionamento.
- Facili da disassemblare e decontaminare in campo.
- Economiche.
- Permettono la filtrazione in linea del campione.
- Permettono regolazione della portata.

Limitazioni

- La torbidità può danneggiare gli ingranaggi.
- Richiedono una fonte di energia esterna.
- Generano variazioni di pressione sul campione.
- Capacità di sollevamento inferiore ai 60 m.

3.6.8 Pompe centrifughe esterne

Le pompe centrifughe esterne, a volte utilizzate nello sviluppo dei pozzi, ricadono nella categoria delle pompe aspiranti e pertanto risultano poco appropriate per la fase di campionamento. I maggiori inconvenienti sono legati sia all'alterazione dei parametri chimico fisici a seguito del contatto con i meccanismi della pompa, che ai fenomeni di stripping che occorrono nel condotto di aspirazione.

Vantaggi:

- In grado di spurgare elevati volumi di acqua.
- Semplici da utilizzare.
- Facilmente reperibili sul mercato.

Limitazioni:

- Difficili da decontaminare.
- Non adatte per il campionamento di acque di falda.
- I meccanismi delle pompe entrano in contatto con il campione.
- Non è in genere possibile superare dislivelli superiori a 6-7 m.
- Richiedono una sorgente esterna di energia.

3.6.9 Pompe peristaltiche

Le pompe peristaltiche sono pompe aspiranti, di tipo volumetrico: sono azionate da un rotore che comprime un tubo di gomma in modo da creare una pressione negativa ad una estremità dello stesso (Fig. 31), tale da richiamare acqua dal pozzo.

In teoria, i sistemi a depressione come le pompe peristaltiche sono in grado di sollevare l'acqua al massimo di 9,7 m anche se in realtà non è, generalmente, possibile superare dislivelli superiori agli 8 m. Per lo stesso motivo non sono ideali per il campionamento di VOC, a meno che non vengano associati a sistemi di campionamento che limitino lo stripping dei contaminanti. Si rivelano, invece, estremamente utili per il campionamento in punti caratterizzati da piccolo

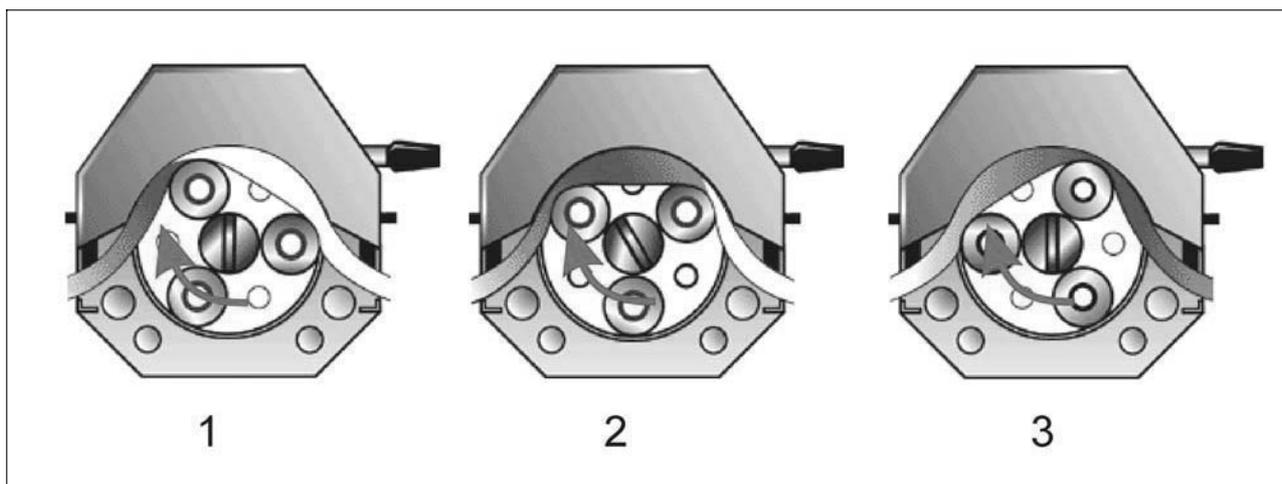


Fig. 31: Fasi del funzionamento della testa di una pompa peristaltica.

diametro o in tutti quei casi si renda indispensabile la filtrazione in linea del campione.

Sono disponibili sul mercato pompe in grado di permettere una regolazione della portata in modo che questa si adatti alle diverse esigenze delle fasi di spurgo o di campionamento anche a portate bassissime (*low-flow purging, low-flow sampling*).

Vantaggi:

- Permettono di effettuare in maniera rapida una filtrazione in linea del campione.
- Portatili e semplici da utilizzare.
- La tubazione flessibile può essere scelta di qualsiasi materiale, anche ad elevata inerzia chimica.
- Funzionamento a portata variabile.
- Il campione non entra in contatto con parti della pompa.
- Possono essere utilizzati in pozzi di qualsiasi diametro (anche <math><1/4''</math>).
- Possono funzionare a batteria.
- Semplici da decontaminare.

Limitazioni:

- Il sistema a depressione può causare volatilizzazione dei VOC.
- Non è in genere possibile superare dislivelli maggiori di 8 m.

3.6.10 Pompe inerziali con valvola di non ritorno

Le pompe inerziali (*inertial lift pumps, pompe WaTerra*) sono sistemi adeguati sia allo spurgo che al campionamento anche in piezometri di piccolissimo diametro. Sono costituite da una tubazione, provvista all'estremità di una valvola di non ritorno, che viene immersa nell'acqua. Agitando di moto alternativo la tubazione è possibile far risalire l'acqua all'interno di questa per prelevarne campioni (Fig. 32). Nel caso in cui si debbano prelevare portate costanti o sia necessario il sollevamento da punti molto profondi, è possibile associare la tubazione di campionamento a motori elettrici o a scoppio.

I campione prelevati con questo sistema sono caratterizzati da alte torbidità dovute all'agitazione che si crea nel piezometro.

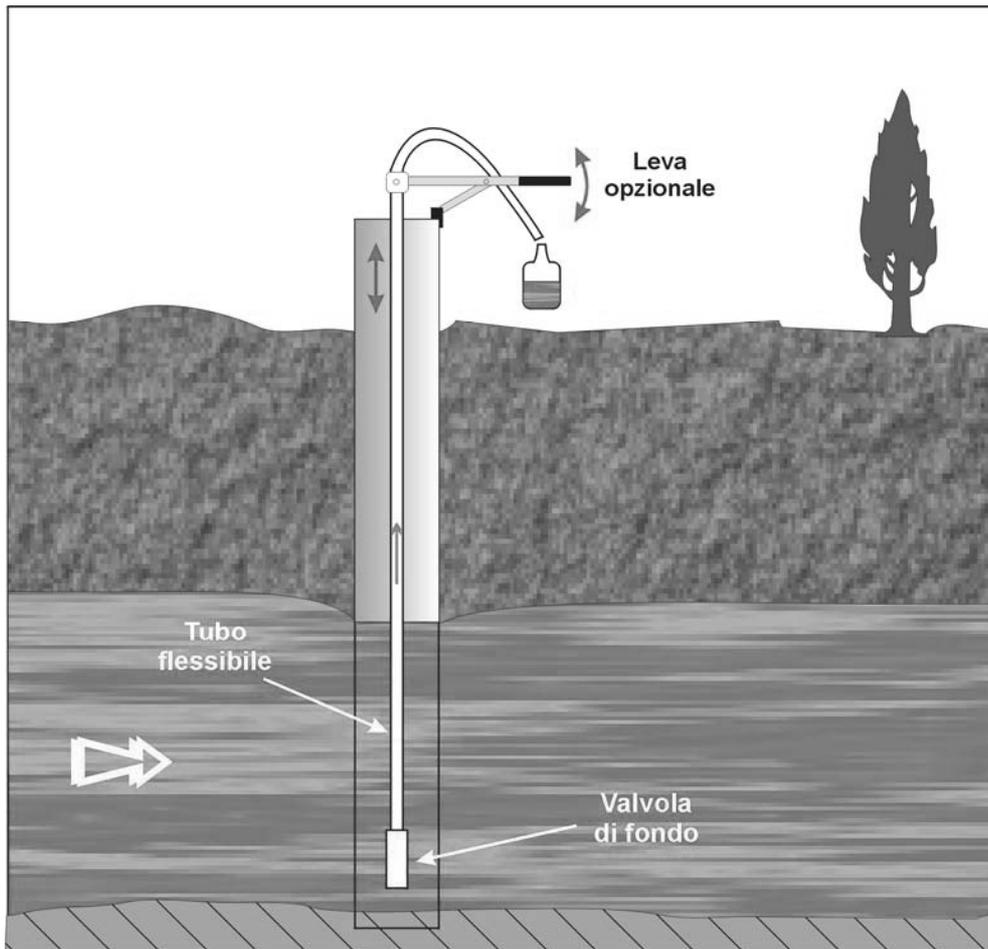


Fig. 32: Pompa inerziale con valvola di non ritorno.

Vantaggi

- Possono essere costruite praticamente da ogni materiale.
- Economiche, anche monouso.
- Di facile funzionamento.
- Nessuna limitazione a causa del diametro del pozzo.
- Portatili e leggere.
- Non richiedono fonti di energia esterne.

Limitazioni:

- Possibile aumento di torbidità.
- Non adatte per lo spurgo di grandi volumi di acqua.
- Non adatte per pozzi profondi.
- E' possibile effettuare una filtrazione in linea, ma è un processo generalmente complicato.

3.7 Misurazione in campo dei parametri di qualità dell'acqua

Molti dei parametri chimico-fisici dell'acqua sono soggetti a repentini cambiamenti durante l'estrazione dal punto di campionamento ed in seguito all'esposizione all'ossigeno ed alla pressione atmosferica. I parametri che sono soggetti a cambiamento sono, ricordando i più importanti,

conduttanza specifica, pH, ossigeno disciolto, Eh e alcalinità, temperatura.

Dal momento che questi parametri **non possono essere stabilizzati in alcun modo**, le misurazioni devono essere condotte in campo evitando il contatto con l'aria. A questo proposito è possibile ricorrere a sonde multiparametriche calate direttamente nel pozzo o esterne, accoppiate ad una cella di flusso (*flow through cell*, Fig. 33). Le letture devono essere effettuate durante lo spurgo del punto di misura.

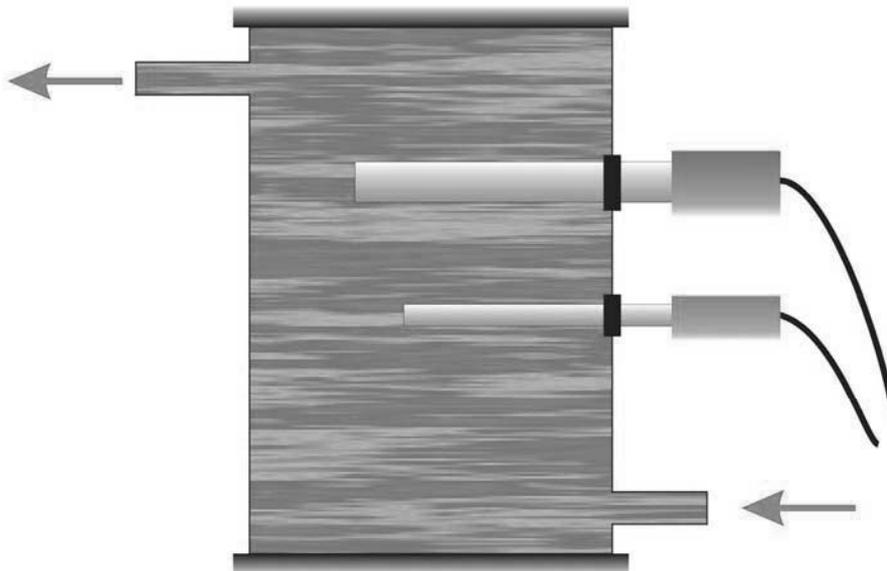


Fig. 33: Schema di una cella di flusso (flow-through cell).

Nel caso in cui si utilizzi una sonda sommersa è importante fare in modo che esista un ricambio di acqua sufficiente, ponendo la tubazione di aspirazione della pompa nei pressi degli elettrodi. L'utilizzo di una sonda è però spesso impedito dal ridotto diametro del punto di campionamento.

In tutti i casi in cui non sia possibile o non si voglia immergere i sensori in pozzo, è possibile far uso di una cella di flusso. Il principio di funzionamento di una cella di flusso è elementare. E' costituita da una camera con un ingresso ed una uscita, oltre ad un alloggiamento per i sensori. Durante la fase di spurgo l'acqua attraversa le cellule, in modo da lambire i sensori senza entrare in contatto con l'aria, per poi fuoriuscire.

Nel caso in cui non sia possibile effettuare le misure con i suddetti metodi, si consiglia di effettuare le misurazioni di questi parametri immediatamente dopo la raccolta del campione. In tutti gli altri casi è necessario specificare sui risultati delle analisi che queste non sono state condotte direttamente in campo.

3.8 *Pretrattamento del campione*

Le operazioni di trivellazione, completamento, sviluppo, spurgo e campionamento di un punto di monitoraggio tendono a mobilizzare colloidali e solidi sospesi che non verrebbero normalmente trasportati in condizioni di deflusso naturale. Il materiale mobilizzato artificialmente può aver adsorbito contaminanti sulla sua superficie o essere costituito, in toto o in parte, da composti

inorganici (per lo più metalli).

Una buona esecuzione del punto di monitoraggio, e soprattutto l'adozione di tecniche di spurgo e di campionamento low-flow, possono minimizzare la sospensione di solidi e di colloidali. Negli altri casi la filtrazione del campione può eliminare la maggior parte dei solidi sospesi e dei colloidali che sono stati mobilizzati artificialmente, anche se è possibile che venga eliminata anche quella porzione che si muove per effetto del gradiente naturale della falda.

Inoltre, a seconda della tecnica e della strumentazione utilizzata, la filtrazione può alterare alcuni parametri chimico-fisici quali la concentrazione dei metalli disciolti, la pressione parziale e le concentrazioni di gas disciolti, il pH, il potenziale redox. L'areazione del campione può causare la precipitazione di metalli in soluzione quali il ferro. L'operazione di filtrazione può inoltre rimuovere composti chimici a bassa mobilità che tendono ad essere adsorbiti sui solidi sospesi, quali ad esempio i PCB.

Risulta pertanto chiaro il motivo per cui esistano due posizioni radicalmente opposte circa la filtrazione dei campioni: la prima sostiene che la filtrazione possa danneggiare la rappresentatività del campione, mentre la seconda afferma che negli studi geochimici in siti a rischio sia importante la concentrazione dei composti effettivamente disciolti in acqua, piuttosto che quella apparente risultante dall'adsorbimento sul materiale solido sospeso.

Una posizione valida in assoluto non esiste: possono esistere casi in cui la filtrazione si rende indispensabile ed altri in cui questa è controproducente ai fini della correttezza dei risultati analitici. Nel caso delle analisi dei metalli è possibile perseguire una terza via, ovvero prelevare da ciascun punto due campioni da sottoporre ad analisi: uno filtrato per la concentrazione di metalli disciolti e l'altro tal quale per la determinazione dei metalli totali.

Il prelievo del campione tal quale è però, a volte, una scelta obbligata dalle difficoltà operative legate a operazioni lunghe e difficoltose in campo. Inoltre, se non eseguita immediatamente, spesso la filtrazione viene eseguita in laboratorio in quanto la presenza di solidi sospesi è dannosa e può interferire con la strumentazione analitica.

3.8.1 Tecniche di filtrazione

Nei casi in cui si decida di filtrare il campione è necessario scegliere il sistema più adatto. Esistono tre tecniche che possono essere utilizzate in campo:

- la filtrazione sotto vuoto;
- la filtrazione in pressione;
- la filtrazione in linea.

E' importante capire come queste tre diverse modalità possono influenzare la chimica del campione.

Sia la filtrazione sotto vuoto che quella in pressione richiedono il trasferimento dell'acqua prelevata da un contenitore ad un altro attraverso un filtro. L'acqua viene generalmente fatta passare attraverso membrane in microfibra di vetro, cellulosiche o di altri materiali inerti, caratterizzate da un diametro dei pori di 0.45 µm.

Nel caso di filtrazione sotto vuoto il campione viene "aspirato" attraverso il filtro, nel caso di filtrazione sotto pressione viene invece "spinto" per mezzo di aria o di azoto. I problemi legati a questi due sistemi comprendono areazione ed ossigenazione del campione, stripping e cambiamento delle pressioni parziali dei gas.

Per ovviare a gran parte di questi problemi, sono stati sviluppati i sistemi di filtrazione in linea. In questo caso il filtro a membrana o a cartuccia (Fig. 34) viene applicato direttamente alla linea di scarico di un sistema di campionamento low-flow, l'acqua in uscita viene raccolta senza bisogno di ulteriori travasi o contatto con altri gas. Risulta evidente che tali sistemi non sono

utilizzabili senza un sistema di pompaggio che permetta il campionamento *low-flow*.

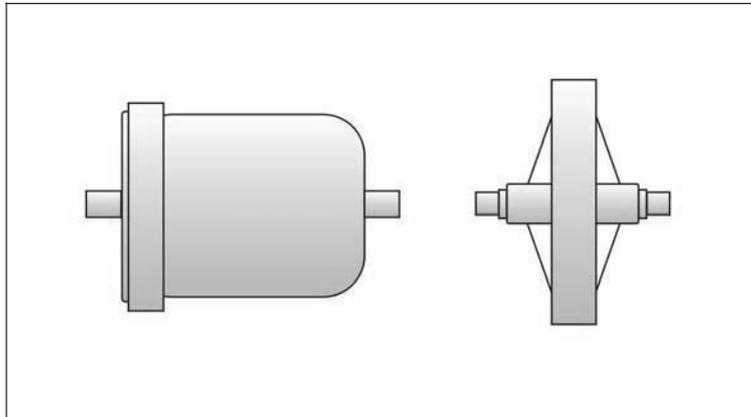


Fig. 34: Filtri in linea per il campionamento di acque.

3.8.2 *Preservazione*

Se il campione di acqua prelevato non può essere analizzato in campo immediatamente dopo la raccolta, questo, deve essere stabilizzato. Le caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua cominciano a modificarsi subito dopo che il campione viene estratto dalla formazione acquifera; i processi chimico-fisico-biologici che alterano la qualità e la rappresentatività del campione comprendono:

- adsorbimento e desorbimento;
- formazione di complessi;
- reazioni acido-base;
- reazioni di ossidoriduzione;
- precipitazione;
- stripping e dissoluzione di gas;
- degradazione biologica.

Tutti questi processi non possono essere fermati completamente, ma possono essere rallentati con l'adozione di idonei metodi di conservazione che comprendono:

- controllo del pH;
- addizione di sostanze chimiche;
- controllo della temperatura ;
- protezione dalla luce;
- utilizzo di contenitori chimicamente inerti e completamente riempiti.

L'idonea tecnica di preservazione per ciascun parametro da analizzare deve essere identificata dal laboratorio di analisi. In linea generale è possibile fornire le seguenti indicazioni per i diversi composti:

- *cationi*: acidificare a $\text{pH} < 2$ con acido nitrico o cloridrico ad elevata purezza, raffreddare a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, si consiglia la filtrazione del campione;
- *anioni*: raffreddare a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, si consiglia la filtrazione del campione;
- *composti organici*: si consiglia l'utilizzo di battericidi per limitare l'effetto della biodegradazione. Per i composti volatili è necessario minimizzare lo spazio di testa presente nel contenitore.

3.9 Controllo di qualità

In questo paragrafo vengono descritte le procedure di QA/QC (assicurazioni di qualità e controllo di qualità) che dovrebbero accompagnare tutte le fasi del campionamento.

L'Allegato 2 al D.M. 471/99 prevede che ai "fini di garantire il controllo e la qualità delle operazioni di campionamento dovrà essere predisposta appropriata documentazione delle attività che consenta la rintracciabilità dei campioni prelevati dal sito e inviati presso il laboratorio di analisi; tale documentazione deve includere anche le azioni di controllo delle attività svolte in campo ed in laboratorio.

Di seguito di riporta una sintesi della documentazione da redigere:

- *registro per la raccolta organizzata delle informazioni di campo; localizzazione del sito, tempistica delle operazioni svolte, scopo delle attività e quant'altro serve a descrivere univocamente le operazioni svolte;*
- *identificazioni univoca dei campioni, data, ora e luogo di prelievo, denominazione del campione, profondità e temperatura del campionamento, analisi richiesta, e dati relativi ai contenitori, materiale, capacità, sistema di chiusura, grado di pulizia;*
- *numero dei punti di misura, numero di sottocampioni, numero di repliche delle analisi;*
- *quantità del campione raccolta, in relazione al numero ed alla tipologia dei parametri da determinare (e quindi delle metodologie analitiche da adottare);*
- *precisione delle determinazioni analitiche;*
- *misure di sicurezza per gli operatori (rischio di contatto con gli occhi, rischio di ingestione accidentale, rischio di inalazione, rischi dovuti alle attrezzature utilizzate, rischio dovuto a radiazioni, ecc.) ed equipaggiamento di sicurezza necessario;*
- *pulizia e decontaminazione dell'attrezzatura di campionamento (modalità e sostanze utilizzate);*
- *modalità di contenimento, trasporto e conservazione dei campioni;*
- *etichettatura dei campioni, tramite apposizione di cartellini con diciture annotate con penna ad inchiostro indelebile, da riportare sul verbale di campionamento che potrà essere redatto in analogia con quanto previsto dalla normativa in materia di rifiuti;*
- *protocollo di campionamento ed analisi, descrizione delle procedure di campionamento e di analisi;*
- *modalità di elaborazione, presentazione ed archiviazione dei dati."*

Di seguito verranno trattati in dettaglio due punti che risultano essere fondamentali nei controlli di qualità di una campagna di campionamento e di analisi: la fase di pulizia e di decontaminazione delle attrezzature, citata anche dal D.M. 471/99, e la fase di raccolta dei bianchi e dei duplicati di controllo.

3.9.1 Pulizia e decontaminazione delle attrezzature

La decontaminazione delle attrezzature ha la funzione di minimizzare il rischio di indurre contaminazioni esterne o di creare fenomeni di cross-contaminazione tra i punti di monitoraggio. L'American Society for Testing and Materials individua le procedure di decontaminazione delle attrezzature nella norma ASTM D 5088-90 (ASTM, 1990):

Procedura minima di decontaminazione:

- lavare l'attrezzatura con una soluzione detergente non fosfatica (ad es. Liquinox della Alconox);
- risciacquare abbondantemente con acqua di rubinetto.

Procedura rigorosa di decontaminazione:

- lavare l'attrezzatura con una soluzione detergente non fosfatica strofinando con una spazzola inerte;
- far circolare la soluzione detergente all'interno dei meccanismi delle apparecchiature;
- risciacquare con acqua di rubinetto;
- per il campionamento di composti organici risciacquare con un agente che desorba i composti organici (es. isopropanolo ad elevata purezza, acetone, metanolo o esano). Per il campionamento di composti inorganici risciacquare con un agente che desorba i composti inorganici (es. soluzione di acido cloridrico o nitrico ad elevata purezza);
- risciacquare con acqua di rubinetto (solo nel caso sia stata utilizzata una soluzione per il desorbimento dei composti organici);
- risciacquare con acqua deionizzata;
- disporre l'equipaggiamento in un contenitore inerte o in plastica pulita o in un foglio di alluminio per l'immagazzinamento ed il trasporto.

3.9.2 Bianchi e duplicati di controllo

La realizzazione dei bianchi e dei duplicati di controllo è di fondamentale importanza nelle procedure di controllo di qualità di una campagna di campionamento e di analisi.

Esistono tre tipi di bianchi:

- *Trip blank* (bianco di viaggio): serve per identificare la contaminazione dei contenitori e dei campioni durante il viaggio e l'immagazzinamento. Viene preparato dal laboratorio di analisi con acqua ad elevata purezza; è quindi spedito, assieme agli altri contenitori vuoti, nel punto dove devono essere effettuati i campionamenti. Il bianco rimane all'interno dei contenitori di trasporto o dei frigoriferi per tutta la durata del campionamento, senza essere aperto, e poi rispedito indietro assieme agli altri campioni. Solitamente questo bianco viene utilizzato nel caso si voglia indagare la presenza di contaminanti volatili.
- *Field blank* (bianco di campo): viene utilizzato per verificare la contaminazione di un campione nella fase di raccolta. Viene preparato come il trip blank, ma è esposto all'aria del sito come lo sono i campioni.
- *Equipment blank* (bianco della strumentazione): serve a valutare l'efficacia delle operazioni di decontaminazione e del rilascio di contaminanti dalla strumentazione di spurgo, campionamento e di misura. L'acqua preparata in laboratorio viene flussata attraverso la strumentazione per poi essere nuovamente raccolta.

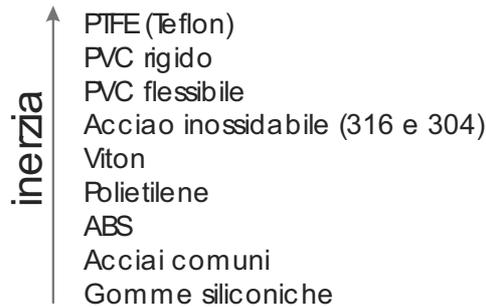
I bianchi, ed in particolare il field blank, non devono essere confusi con i *campioni del fondo naturale* che sono, invece, i campioni prelevati da aree adiacenti il sito nelle quali si ha la certezza di assenza di contaminazione derivante dal sito stesso.

A differenza dei bianchi, i duplicati di controllo hanno la funzione di valutare ed individuare o l'affidabilità e la variabilità dei risultati analitici del laboratorio. Si divide un campione in due o tre aliquote che vengono etichettate come se fossero altri campioni e poi fatti analizzare.

L'allegato 2 al D.M. 471/99 prevede il prelievo di due campioni di controllo: *“un campione per permettere all'autorità competente di approfondire le indagini o eseguire verifiche sui valori di concentrazione risultanti dalle analisi, un campione dovrà essere conservato (...) per eventuali contestazioni e controanalisi”*.

3.10 Materiali

Di fondamentale importanza risulta essere la scelta dei materiali utilizzati durante le fasi di realizzazione dei punti di monitoraggio, di campionamento e di spurgo. I materiali di cui è costituita la strumentazione (corpo dello strumento, rotori, tubazioni, giunture, contenitori) devono essere dotati di elevata inerzia ai processi di attacco e di degradazione chimico-fisica che possono instaurarsi al contatto con il contaminante. Tale requisito è importante sia per ottenere risultati analitici affidabili, sia per garantire la durata nel tempo della strumentazione. Di seguito vengono elencati alcuni materiali in ordine decrescente di inerzia chimica.



L'importanza di altre caratteristiche quali flessibilità, resistenza meccanica e peso devono essere valutate di caso in caso scegliendo la soluzione più opportuna.

Nei successivi paragrafi vengono descritti i materiali più comunemente utilizzati per i sistemi di campionamento.

3.10.1 Materie plastiche

Vasto gruppo di materiali costituiti da sostanze idrocarburiche non cristalline, composte da estese catene molecolari il cui costituente principale è il carbonio.

I *materiali termoplastici*, a causa di una scarsa o nulla reticolazione tra le molecole rammolliscono quando riscaldati e induriscono quando si raffreddano, indipendentemente dal numero di volte in cui il processo viene ripetuto.

I *materiali termoindurenti* hanno, invece, forti legami intermolecolari e quindi, dopo essere stati solidificati, non perdono questa caratteristica se sottoposti al calore.

Poche delle materie plastiche sono interamente composte da resine polimeriche: quasi tutte contengono una o più sostanze additive, al fine di modificare o controllare le proprietà del materiale o di ridurre il costo, che possono essere trasferite al campione inficiando i risultati analitici:

- *gli ingredienti di carica* sono gli additivi più comuni, vengono utilizzati per dare volume o per modificare alcune proprietà;
- *i plastificanti* servono per migliorare la fluidità della resina durante la lavorazione o per migliorare caratteristiche quali la flessibilità. Sono generalmente sostanze liquide che hanno elevati punti di ebollizione, ad esempio alcuni ftalati;
- *gli stabilizzanti* vengono utilizzati per aiutare a prevenire la decomposizione o il deterioramento durante lo stampaggio o quando il polimero viene esposto all'azione di agenti atmosferici o chimici. Gli agenti stabilizzanti possono essere dei composti metallici a base di stagno, piombo, cadmio, bario, ecc. I fenoli e le ammine sono agenti anti-ossidanti che si sostituiscono alla sostanza plastica nelle eventuali reazioni di ossidazione;
- *i coloranti*, aggiunti alle materie plastiche per fini decorativi, sono disponibili in un'ampia varietà di pigmenti e di sostanze tintorie. I coloranti tradizionali sono pigmenti metallici di

elementi quali il cadmio, piombo e selenio;

- *gli agenti ignifughi o ritardanti di fiamma* includono composti contenenti cloro o bromo, composti estero-fosfatici, triossido di antimonio, triidrato di allumina e borato di zinco.

Le materie plastiche vengono comunemente classificate in riferimento ai monomeri di base che le costituiscono:

- *Resine fluorocarburiche o fluoroplasti*: gruppo di materie plastiche ad elevate prestazioni tecniche e molto costose. In questa categoria rientrano tra le materie plastiche migliori in termini di resistenza alle sostanze chimiche e prestazioni a temperature elevate. Le materie plastiche fluorurate si suddividono in tre categorie principali che, in ordine decrescente di contenuto in fluoro, sono: i fluorocarburi, il perclorotrifluoroetilene e i fluoroidrocarburi. Esistono due tipi di fluorocarburi: il politetrafluoroetilene (PTFE) ed il poli-etilene-propilene fluorurato (FEP), che vengono commercializzati dalla Du Pont sotto il nome di Teflon. I fluoroidrocarburi sono di due tipi: polivinildenfluoruro (PVF₂) e polivinilfluoruro (PVF). Ad eccezione del PTFE, che non può esistere allo stato fuso vero e proprio, le materie plastiche fluorurate possono essere modellate per stampaggio, estrusione e con altri metodi tradizionali.
- *Polietileni*: gruppo di polimeri poliolefinici derivanti dall'etilene attraverso polimerizzazione ottenuta con calore e pressione. Sono tra i materiali plastici più economici e più largamente impiegati e si distinguono per tenacità, ottima resistenza dielettrica e resistenza agli agenti chimici. Le variazioni di proprietà sono in relazione diretta con la densità: ad un aumento della densità corrisponde un incremento di ramificazioni e di cristallinità del polimero, ma aumentano anche proprietà quali la rigidità, la resistenza alla trazione, la durezza, la resistenza al calore ed agli agenti chimici. I polietileni a bassa densità (LDPE) sono flessibili, tenaci e meno traslucidi rispetto ai polietileni ad alta densità (HDPE) che sono, invece, più resistenti e rigidi.
- *Resine viniliche*: gruppo di prodotti che variano da liquidi a solidi rigidi, ottenuti per polimerizzazione dei derivati dell'etilene. Si ricorda il polivinilcloruro (PVC), disponibile sia rigido che flessibile.
- *Resine furfuroliche*: a questo gruppo appartengono le resine Tygon, che vengono applicate a pennello per applicazioni quali rivestimenti protettivi interni di serbatoi per prodotti chimici. Induriscono per autopolimerizzazione e sono resistenti ad acidi, alcali, alcool ed idrocarburi.
- *Resine poliesteri*: vasto gruppo di resine sintetiche prodotte per condensazione di acidi o anidridi con alcoli o glicoli per formare un poliestere insaturo che, quando viene polimerizzato con un idrocarburo insaturo, produce un copolimero dalla struttura complessa. Un poliestere termoplastico è il polietilenetereftalato (PET).
- *Polistireni*: gruppo di resine ottenute dalla polimerizzazione dello stirene monomero. Il polistirene è noto per la resistenza all'acqua e per l'elevata stabilità dimensionale, inoltre alle basse temperature è più tenace e resistente rispetto alle altre materie plastiche. Lo stirene può essere combinato con altri monomeri, il terpolimero acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS) costituisce una delle combinazioni più comuni.
- *Elastomeri*: materiali polimerici in grado di subire grossi allungamenti e che, eliminata la forza di trazione, ritornano rapidamente ad una lunghezza che si avvicina a quella iniziale. Gli elastomeri butadiene-stirene sono simili sotto molti aspetti alla gomma naturale, non sono resistenti agli oli e, in genere, sono poco resistenti ai prodotti chimici. Il Neoprene è chimicamente e strutturalmente simile alla gomma naturale ed anche le proprietà meccaniche sono simili; particolarmente resistente ad oli, prodotti chimici, luce solare, agenti atmosferici e ad invecchiamento, oppone, inoltre, una notevole resistenza al passaggio delle sostanze gassose. Le gomme nitrile, dette originariamente Buna N, sono copolimeri di acrilonitrile e butadiene, noti soprattutto per l'ottima resistenza ad oli e carburanti a temperature normali ed elevate, proprietà, queste, che possono essere modificate variando il rapporto reciproco dei due

monomeri. Il Viton è un copolimero di vinilidene fluoruro-ese fluoropropilene-tetrafluoroetilene della Du Pont, con una resistenza particolarmente elevata a solventi, idrocarburi, vapore ed acqua. Gli elastomeri siliconici sono polimeri costituiti fondamentalmente da atomi di silicio e di ossigeno, generalmente caratterizzati da alto costo. Gli elastomeri fluorurati presentano, come le materie plastiche corrispondenti, i valori massimi di resistenza all'ossidazione, ai prodotti chimici, agli oli, ai solventi ed al calore; sono anche i più costosi.

3.10.2 Acciai

L'acciaio è una lega di ferro contenente carbonio chimicamente disciolto in tenore inferiore al 2.06%, anche se tale tenore in realtà è quasi sempre inferiore all'1.5%. Negli acciai possono anche essere presenti altri elementi in lega (cromo, nichel, vanadio, molibdeno, ecc.). L'acciaio è diviso in qualità a seconda della percentuale di carbonio contenuto; grosso modo, è possibile individuare quattro categorie: acciai a basso tenore di carbonio (<0.3%), acciai a medio tenore di carbonio (0.30-0.60%), acciai ad alto tenore di carbonio (0.60-0.90%), acciai a tenore di carbonio molto elevato (0.90-1.5%).

Gli acciai inossidabili comprendono una grande famiglia di leghe ferro-cromo molto usate e note per la resistenza alla corrosione ed alla formazione di ruggine. Queste proprietà sono dovute alla formazione di un film superficiale di ossido di cromo in presenza di ossigeno; tale film è in genere insolubile, autocicatrizzante e non poroso. Esistono circa cinquanta composizioni chimiche di acciai inossidabili riconosciute dall'American Iron and Steel Institute (AISI). Questi acciai sono divisi in tre grandi categorie a seconda della microstruttura principale: austenitica, ferritica e martensitica. Molto utilizzati in campo ambientale sono gli acciai inossidabili austenitici serie AISI 300, che contengono fino al 30% di cromo e fino al 20% di nichel. Gli acciai inossidabili austenitici sono quelli dotati di migliore resistenza. L'acciaio AISI 304 è molto utilizzato perché facilmente disponibile. In condizioni fortemente corrosive viene utilizzato l'acciaio AISI 316.

3.10.3 Vetro

Il vetro è una sostanza solida amorfa ottenuta fondendo silice (diossido di silicio) con un ossido basico. Le sue proprietà caratteristiche sono la trasparenza, la resistenza agli agenti atmosferici ed alla maggior parte delle sostanze chimiche, ad eccezione dell'acido fluoridrico. I sali metallici vengono utilizzati nel vetro per dare una colorazione oltre che per determinarne le caratteristiche:

- I vetri *sodico-calcico* sono i più antichi, i più facili da lavorare ed i meno costosi, non hanno, comunque, una grande resistenza alla corrosione.
- I vetri *al piombo* o i vetri al piombo-alcali possiedono una resistenza alla corrosione varia a seconda del contenuto di piombo, ma rispetto agli altri tipi di vetro hanno tutti una scarsa resistenza agli acidi.
- I vetri *al borosilicato*, che contengono ossido di boro, sono i tipi di vetro più versatili. Sono noti per l'ottima resistenza a sostanze chimiche, la resistenza al calore ed agli sbalzi termici e per il basso coefficiente di espansione termica. Il tipo a basso coefficiente di espansione è meglio noto come Pyrex o Kimax.

4. BIBLIOGRAFIA

Aglietto I., De Michelini N., (2000). *Analisi di differenti tecniche per il campionamento ed il monitoraggio discreto delle acque sotterranee*. IGEA, n. 14, pagg. 39-46.

- ASTM, (1990). *Practice D5088-90 Standard practice for decontamination of field equipment used at nonradioactive waste sites.*
- ASTM, (1992). *Guide D4448-85a (1992) Standard guide for sampling groundwater monitoring wells.*
- ASTM, (1993). *Test Method D4750-87 (1993) e1 Standard test method for determining subsurface liquid levels in a borehole or monitoring well (observation well).*
- ASTM, (1996). *Guide D5903-96e1 Standard guide for planning and preparing for groundwater sampling event.*
- ASTM, (1996). *Guide D6001-96e1 Standard guide for direct-push water sampling for geoenvironmental investigations.*
- ASTM, (1999). *Guide D6452-99 Standard Guide for purging methods for wells used for groundwater quality investigations.*
- Batu V. (1998). *Aquifer Hydraulics*, John Wiley & Sons, N.Y.
- Bouwer H., Rice C. (1976). *A slug test for determining hydraulic conductivity for unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells*, Water Resources Research, vol. 12, n. 3, pagg. 423-438.
- Bouwer H. (1989), *The Bouwer and Rice slug test. An update*, Groundwater, vol. 27, n. 3, pagg. 304-309.
- Brady G. S., H.R. Clauser, (1992). *Manuale dei materiali. Tecniche nuove.*
- Butler Jr. J.J. (1998). *The design, performance and analysis of slug tests*, Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Cherry J.A., (2000). *Multilevel monitoring in rock boreholes*. Lecture 7. Department of Earth Science, University of Waterloo.
- Cooper Jr. H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S. (1967). *Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water*, Water Resources Research, vol. 3, n. 1, pagg. 263-269.
- Di Molfetta A. (1995). *Determinazione delle caratteristiche idrodinamiche degli acquiferi e produttive dei pozzi mediante prove di pompaggio*, IGEA, n. 4, pagg. 13-30.
- Di Molfetta A., L. Gautero, (1997). *Il monitoraggio delle acque sotterranee in siti pericolosi: impostazione metodologica, strumenti e costi*. IGEA, n. 9, pagg. 37-46.
- Duffield C.M. (2000). *User's Guide of AQTESOLV*, Hydrosolve Inc., Reston, VA, pagg. 1-164.
- Genetier B. (1993). *La pratica delle prove di pompaggio in idrogeologia*, Dario Flaccovio Ed., Palermo.
- Gibb J. P., R. M. Schuller, R. A. Griffin, (1981). *Procedures for the collection of representative water quality data from monitoring wells*. Cooperative Groundwater Report 7. Illinois State Water and Geological.
- Hvorslev M.J. (1951). *Time lag and soil permeability in groundwater observations*, Bull. n. 36, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, pagg. 1-49.
- Hyder Z., Butler Jr. J.J., Mc Elwee C.D., Liu W. (1994). *Slug tests in partially penetrating wells*, Water Resources Research, vol. 30, n. 11, pagg. 2945-2957.
- ISO (1993). International Standard 5667-11. *Water quality – Sampling. Part 11: Guidance on sampling of groundwaters.*
- Karklins S., (1996A). *Groundwater Sampling Desk Reference*. Wisconsin Department of Natural Resources Bureau of Drinking Water and Groundwater.
- Karklins S., (1996B). *Groundwater Sampling Field Manual*. Wisconsin Department of Natural Resources Bureau of Drinking Water and Groundwater.
- Kruseman G.P., De Ridder N.A. (1989). *Analysis and evaluation of pumping test data*, IV ed., ILRI, Wageningen, The Netherlands.

- Moench A.F. (1993). *Computation of Type Curves for Flow to Partially Penetrating Wells in Water-Table Aquifers*. *Ground Water*, vol. 31, n. 6, pagg. 966-971.
- Neuman S.P. (1974). *Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response*, *Water Resources Research*, vol. 10, n. 2, pagg. 303-312.
- Nielsen D. M. editor, (1991). *Practical Handbook of Ground-Water Monitoring*. Lewis Publishers. ISBN 0-87371-124-6.
- Pankow J. F., (1986). *Magnitude of artifacts caused by bubbles and headspace in the determination of volatile organic compounds in water*. *Analytical Chemistry*, n. 58, pagg. 1822-1826.
- Rubin I. I. editor, (1990). *Handbook of plastic materials and technology*. John Wiley & Sons, Inc.

INDICE

1.	PREMESSA	1
2.	CARATTERIZZAZIONE DI UN ACQUIFERO	2
2.1	Pianificazione di una prova di falda	3
2.2	Prova di falda in declino	7
2.2.1	Identificazione della tipologia idraulica	7
2.2.2	Procedura di interpretazione	10
2.2.2.1	Metodi base	10
2.2.2.2	Deviazione dal comportamento ideale	14
2.3	Prova di risalita	18
2.4	Slug Test	19
2.4.1	Modelli di interpretazione	19
2.4.2	Il metodo di Bouwer e Rice	20
2.4.2.1	Durata dello slug test	22
2.4.2.2	Scostamento del comportamento ideale	23
2.4.3	Il metodo di Cooper, Bredehoeft e Papadopulos	25
2.4.4	Il metodo KGS	28
3.	CARATTERIZZAZIONE DELLA CONTAMINAZIONE	30
3.1	Concentrazioni limite accettabili nelle acque di falda	31
3.2	Ubicazione dei punti di campionamento	32
3.3	Frequenza verticale di campionamento	34
3.3.1	Piezometri multilivello	35
3.3.2	Tecniche direct-push	36
3.4	Spurgo	37
3.4.1	Criterio basato sul volume del pozzo	38
3.4.2	Criterio legato alla stabilizzazione di parametri chimico-fisici	38

3.4.3	Criterio basato sull'immagazzinamento del pozzo e sui parametri idrodinamici dell'acquifero	38
3.5	Campionamento.....	38
3.5.1	Portata di campionamento.....	39
3.5.2	Raccolta del campione.....	40
3.6	Sistemi di campionamento e di spurgo.....	41
3.6.1	Bailer	42
3.6.2	Campionatori a siringa	42
3.6.3	Pompe centrifughe sommerse	43
3.6.4	Bladder pumps.....	44
3.6.5	Pompe a gas o ad aria	45
3.6.6	Pompe a pistone.....	46
3.6.7	Pompe a ingranaggio	47
3.6.8	Pompe centrifughe esterne	48
3.6.9	Pompe peristaltiche	48
3.6.10	Pompe inerziali con valvola di non ritorno	49
3.7	Misurazione in campo dei parametri di qualità dell'acqua	50
3.8	Pretrattamento del campione	51
3.8.1	Tecniche di filtrazione.....	52
3.8.2	Preservazione.....	53
3.9	Controllo di qualità.....	54
3.9.1	Pulizia e decontaminazione delle attrezzature.....	54
3.9.2	Bianchi e duplicati di controllo	55
3.10	Materiali	56
3.10.1	Materie plastiche	56
3.10.2	Acciai.....	58
3.10.3	Vetro.....	58
4.	BIBLIOGRAFIA	58