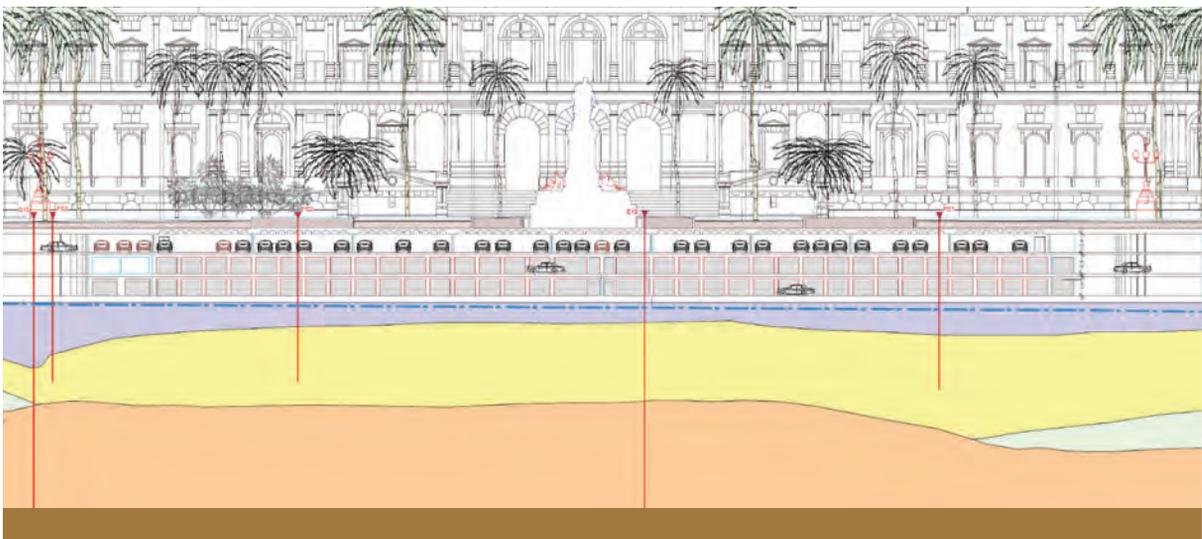


GEOLOGIA

TECNICA & AMBIENTALE

Settembre - Dicembre 2014 / ISSN 1722 - 0025



IL PERMEAMETRO DI BOUTWELL

Boutwell Permeameter

Stefano Cianci:

Geoplanning servizi per il territorio S.r.l.
laboratorio@geoplanning.it

Fabio Garbin:

Geoplanning servizi per il territorio S.r.l.
fabio.garbin@geoplanning.it

Quintilio Napoleoni:

La Sapienza - Università di Roma, Dipartimento Ingegneria Civile,
Edile ed Ambientale
quintilio.napoleoni@uniroma1.it

Maurizio Scarapazzi:

Geoplanning servizi per il territorio S.r.l.
laboratorio@geoplanning.it

Luigi Tramonti:

libero professionista, ingegnere
luigitramonti@gmail.com

Riassunto

La caratterizzazione e la qualifica delle barriere argillose avviene attraverso uno studio articolato che ha come principale obiettivo la determinazione della conducibilità idraulica, o coefficiente di permeabilità k . Tale grandezza, che esprime l'attitudine di un mezzo ad essere attraversato da un fluido, è misurata sia mediante prove di laboratorio su provini di piccole dimensioni estratti dalle barriere che per mezzo di prove eseguite direttamente sul manto. L'esperienza ha dimostrato come la conducibilità ottenuta da prove in sito sia un parametro di collaudo più affidabile rispetto al dato ricavato in laboratorio in quanto, interessando volumi maggiori di terreno, permette di verificare direttamente la macrostruttura della barriera realizzata. Tale considerazione, di validità generale, ha un risalto particolarmente importante nei manti argillosi artificiali in quanto la tecnica di realizzazione mediante compattazione per strati può determinare una significativa anisotropia della barriera in direzione prevalentemente orizzontale. Tra tutti i metodi di prova in sito (infiltrometri semplici e doppi, lisimetri, permeametri vari, ecc.) il Double Stage Boutwell Permeameter (TSB) è

Abstract

Clay liners or covers are an important components of waste retention structures, are used as impervious fluid containment barriers for the horizontal transport of process fluids or the containment of pollutants for the protection of groundwater resources from the development of leachate that could migrate downward. The most important geotechnical parameter for compacted clay is hydraulic conductivity which governs the barrier effect. Experience has show that field hydraulic conductivities may be substantially larger than those measured on small laboratory specimens. Many different in situ tests have been proposed, of these the Sealed, Double Ring Infiltrometer (SDRI) and Two Stage Borehole (TSB) test have received widest acceptance and use. The TSB method involves three dimensional infiltration, from which both vertical and horizontal conductivities are determined. These hydraulic conductivity values are the maximum possible for the vertical direction and minimum possible for the horizontal direction. >>

Termini Chiave

Barriera impermeabile
Boutwell
Conducibilità idraulica
Discarica
Permeametro
TSB

Keywords

*Impermeable barrier
Boutwell
Hydraulic conductivity
Landfill
Permeameter
TSB*

l'unico che permette di misurare separatamente le due componenti della conducibilità idraulica, verticale ed orizzontale, e quindi risulta il più idoneo ad essere applicato a barriere multistrato. La maggior parte dei metodi di prova in sito, a differenza della prova TSB, indagano prevalentemente la filtrazione in direzione verticale e forniscono indicazioni incomplete o meglio non cautelative nella progettazione dei manti. La prova TSB ha come standard di riferimento la norma ASTM D6391 "Standard Test Method for Field Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Materials Using Two Stages of Infiltration from a Borehole".

METODOLOGIE DI PROVA

Per la misura del coefficiente di permeabilità in sito sui manti di impermeabilizzazione, oltre alla prova Boutwell, le altre prove più diffuse utilizzano infiltrometri a singolo o doppio anello aperto o chiuso. Analogamente al TSB, entrambi permettono di investigare grandi volumi di terreno, ma a causa delle modalità di esecuzione di prova e delle geometrie di filtrazione, le analisi sono soggette a incognite che possono causare errori non trascurabili, soprattutto se eseguite in terreni con bassi valori di permeabilità ($k < 1E-10$ m/s). Nel caso degli infiltrometri alcune grandezze, come ad esempio le variazioni termiche nell'acqua o nello strumento, non sono oggetto di controllo. La misurazione di conducibilità molto basse, tipiche di terreni e materiali argillosi, richiede invece una accuratezza molto maggiore rispetto al caso di test eseguiti su terreni a maggiore permeabilità.

Un'altra limitazione importante di queste prove è l'impossibilità di distinguere il contributo, nella misura della permeabilità, della componente verticale da quella orizzontale. Come è noto tutti i test in sito sono influenzati dall'anisotropia idraulica del terreno: sperimentalmente è stato osservato che se il flusso orizzontale non è impedito, l'effetto è quello di incrementare da 2 a 5 ordini di grandezza il valore di k_v (Boutwell, 1992). Per questa ragione, grazie alla possibilità

This test method may be utilized for compacted fills or natural deposits that have a mean hydraulic conductivity than or equal to 1.10-5 m/s. For this purpose the norm ASTM 6391 "Standard Test Method for Field Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Materials Using Two Stages of Infiltration from a Borehole" explains with accuracy the purpose, terminology, apparatus, test site, test procedure and calculation of TSB method.

di variare la geometria di filtrazione nella prova TSB (Figura 1) e assumendo una filtrazione assialsimmetrica, si può determinare separatamente la conducibilità in direzione sia verticale che orizzontale. Inoltre si può dimostrare come questi valori ottenuti siano rispettivamente il valore massimo possibile della permeabilità in direzione verticale (Fase 1) e il valore minimo possibile della permeabilità in direzione orizzontale (Fase 2). I valori reali sono poi ottenuti mediante un modello analitico complesso (Boutwell, 1992, 1994) derivato da Hvorslev (1951).

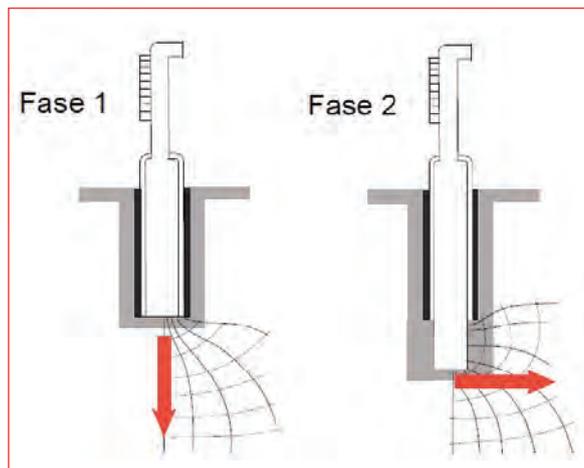


Fig. 1 Schema di infiltrazione e direzione del flusso
Fig. 1 Infiltration path scheme

L'analisi dei risultati è basata sulle equazioni di Hvorslev, adattate a diverse condizioni al contorno, mediante la tecnica del potenziale immagine (Carslaw & Jaeger, 1959) sulla base delle seguenti ipotesi:

- terreno omogeneo;
- pressione neutra nulla alla base del permeametro (fase 1) e al centro della parete del foro di approfondimento (fase 2);
- rigonfiamento completo del terreno al termine della prova;
- mezzo filtrante indefinitamente esteso in orizzontale.

La prova normalmente, ma non esclusivamen-

te, viene eseguita a carico variabile in quanto in tali condizioni essa trova un'importante applicazione su terreni a bassa conducibilità idraulica. Buoni risultati possono essere ottenuti con modalità a carico costante, su terreni granulari, ma presentando in questo caso specifiche problematiche realizzative.

STRUMENTAZIONE E ATTREZZATURE

La strumentazione sperimentale, composta da quella originale di Boutwell e da quanto sviluppato presso il nostro laboratorio (Caprioni et alii, 2011), si compone delle parti di seguito riportate.

Casing (telaio-corpo del permeametro) - Corpo cilindrico in acciaio con diametro interno di 10 cm; in sommità sono presenti gli elementi di connessione a tenuta stagna con l'apparato superiore. La normativa ASTM indica che una strumentazione in PVC può essere soddisfacente, ma nel nostro studio l'utilizzo dell'acciaio è apparso più idoneo per la risoluzione di alcune problematiche (eccessive deformazioni soprattutto nelle operazioni di approfondimento del foro in fase 2, fragilità in infissione ed estrazione della strumentazione al termine della prova).

Apparato superiore - Composto da un tappo di acciaio o Perspex, connesso al casing e sormontato da un sistema con componenti idraulici per la gestione e la regolazione dei flussi.

Burette volumetriche - Cilindri in PVC trasparente aventi scala graduata con risoluzione di 1 mm e altezza di almeno 1 m. Il diametro della sezione della buretta deve essere scelto in funzione della velocità di deflusso dell'acqua in modo da poter monitorare il decorso nel tempo senza ricorrere a refill intermedi.

Termometro - La strumentazione, usata per monitorare la temperatura dell'acqua nella parte centrale del TEG, deve permettere la misura nel campo delle oscillazioni della temperatura atmosferica con una risoluzione di 0.1° C. Tali misure permettono, attraverso la correzione della viscosità dell'acqua, di risalire al volume effettivamente filtrato attraverso il terreno.

TEG – Pseudo permeametro, simile alla strumentazione di misura, ma avente la parte inferiore chiusa. Tale strumentazione permette, attraverso la misurazione delle variazioni del livello dell'acqua, di apportare correzioni in funzione sia del fenomeno di dilatazione/contrazione del permeametro nel suo complesso, sia del fenomeno di evaporazione/condensazione dell'acqua utilizzata in fase di prova. Il problema delle variazioni termiche è molto pronunciato quando si usano diametri delle burette molto piccoli in terreni con conducibilità idraulica di $E-10$ m/s o inferiore. L'apparato superiore del TEG è provvisto di un alloggiamento per il termometro.

Attrezzatura di scavo - Le attrezzature utilizzate, realizzate ad hoc per i vari tipi di terreno, devono permettere di realizzare il foro, fino alle profondità desiderate, esercitando il minor disturbo possibile al terreno limitrofo. Le attrezzature di scavo sono differenti tra le due fasi, infatti la seconda, più delicata dal punto di vista delle operazioni, richiede delle attrezzature particolari per limitare le alterazioni della macrostruttura del terreno.

Sigillante anulare - La normativa suggerisce l'utilizzo di bentonite per sigillare lo spazio tra le pareti del foro e quella del casing. In realtà questo materiale induce problemi sia di suzione elevata, con la conseguenza di alterare in modo non controllato i risultati di prova, sia di intensa fessurazione, nei periodi più caldi, con il rischio di creare percorsi di fuga dell'acqua. Si sottolinea che tale sigillante ottiene effetti positivi solo se completamente contenuto. Al fine di ovviare a tali problematiche la sperimentazione qui esposta ha utilizzato un sigillante differente e tale da limitare significativamente alcune problematiche specifiche della bentonite.

Tensiometri – Strumenti per la misurazione del carico di suzione, cioè la forza con cui l'acqua è attratta e trattenuta nel terreno: questo parametro dipende dal grado di saturazione del terreno. Lo strumento è formato da un tubo con una punta porosa, riempito d'acqua e infisso nel mezzo permeante. Durante i test è opportuno

utilizzare più tensiometri alle diverse profondità a cui vengono eseguite le due fasi di prova. Se il terreno è saturo l'acqua all'interno del tensiometro non subisce variazioni di livello, e lo strumento misurerà il valore "zero"; viceversa se il terreno non è saturo l'acqua inizierà a defluire dallo strumento permettendo così di misurare la pressione interstiziale di suzione. Tale strumento è importante per verificare l'ipotesi di saturazione che la fase analitica richiede, in quanto la suzione crea un incremento della permeabilità misurata del terreno, che non deve essere considerato nelle valutazioni finali delle caratteristiche idrauliche della barriera. Nel caso in cui i tensiometri rivelino valori di pressione diversi da zero, in fase analitica si devono apportare delle correzioni ai valori di permeabilità apparente ricavati dalle misure in sito.

In Figura 2 si riporta la sezione dello schema di installazione.

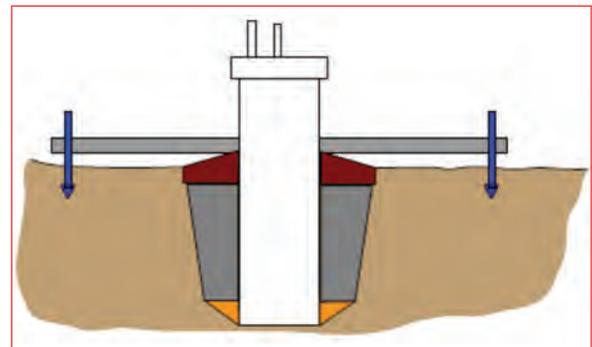


Fig. 2 Schema di installazione

Fig. 2 Installation scheme

PROCEDURA D'INSTALLAZIONE

Il test richiede due fasi di installazione molto accurate.

Fase 1

Filtrazione prevalentemente verticale

- Inizialmente si realizza un foro circa tronco conico (o tronco piramidale) avente il diametro della base minore maggiore del diametro esterno del casing (circa 10 cm) e tale da permettere l'inserimento dei materiali sigillanti tra l'infiltrometro e le pareti del foro. Quest'ultimo deve essere spinto ad una profondità di prova adeguata (in genere pari a circa due volte il diametro del casing). La superficie inferiore del foro deve essere piana, libera da residui di scavo. In particolare si deve cercare di non occludere i micropori della superficie filtrante, e pertanto si deve evitare di spianare il terreno di appoggio.
- Il casing del permeametro viene adagiato sul fondo dello scavo in posizione centrata e verticale. Successivamente eventuali fori prodotti dall'irregolarità tra il terreno ed il perimetro esterno dello strumento possono essere occlusi con un impasto di terreno naturale ed acqua ad uno stato semiplastico. La sigillatura del casing costituisce una delle fasi più complesse. Nella nostra sperimentazione sono stati testati inizialmente vari sigillanti e dopo alcuni tentativi è stato scelto di realizzare un doppio strato impermeabilizzante costituito dal basso verso l'alto da 5 cm circa di sigillante specifico e da 10-12 cm circa di cemento a presa rapida, a bassissimo ritiro ed autolivellante. Al di sopra, e fino a raggiungere la quota del piano campagna iniziale, viene posto il terreno naturale compattato manualmente al fine di creare uno strato di protezione contro le variazioni termiche superficiali.
- Al termine dell'effetto di presa del cemento il casing viene riempito d'acqua, facendola affluire lentamente e gradualmente al suo interno, e poi viene chiuso superiormente.

È importante assicurarsi che bolle d'aria non vengano intrappolate sotto il tappo del casing e/o nel sistema dei flussi (apparato superiore): a tal fine si permette lo spurgo dell'aria attraverso una valvola posta sul tappo stesso.

- Al termine di queste operazioni, verificata la tenuta idraulica del sistema attrezzatura-terreno, la fase di infiltrazione dell'acqua può avvenire imponendo un carico idraulico nella buretta di misura. Questa operazione deve essere realizzata ponendo attenzione a non erodere o disturbare eccessivamente il terreno posto alla base del permeametro ed in tal senso deve essere applicato un carico idraulico adeguato alla precompressione esercitata dalla compattazione a cui il terreno è stato sottoposto in fase di stesa. Ogni registrazione del livello dell'acqua nella buretta di misura deve prevedere la data, il tempo dall'inizio della prova, la lettura corrispondente alla parte inferiore del menisco dell'acqua nella buretta del permeametro e del TEG, e la temperatura dell'acqua nel TEG. La frequenza delle letture dipende dall'andamento del test. Quando il livello della buretta diventa troppo basso è possibile eseguire il refill con le stesse modalità con cui la buretta è stata riempita inizialmente. Il primo stage è considerato completo quando si raggiungono le condizioni stazionarie del flusso, cioè quando risulta evidente l'andamento asintotico delle misure del coefficiente di permeabilità apparente in funzione del tempo.

Fase 2

Filtrazione prevalentemente orizzontale

- Nel secondo stage il foro viene approfondito, mantenendo il casing nella posizione originaria, per circa 1 o 2 volte il diametro del permeametro al fine di massimizzare il contributo della permeabilità orizzontale k_h . In fase di scavo si deve porre attenzione particolare al fine di evitare e/o minimizzare la "lisciatura"

della superficie filtrante laterale e ciò può essere ottenuto mediante elevata manualità e utilizzo di utensili di scavo realizzati specificatamente per tale scopo e variabili anche in funzione della tipologia del terreno. Una ulteriore criticità in fase di scavo consiste nel problema che il casing possa spostarsi creando vie di fuga dell'acqua: in tal senso è stato sviluppato un ancoraggio ad X su quattro punti di infissione nel terreno e solidale al casing.

- Il foro realizzato, dopo essere stato misurato, viene riempito con sabbia calibrata al fine di ridurre il disturbo delle pareti del foro; la normativa suggerisce l'utilizzo di un tessuto non tessuto di contenimento, ma tale accorgimento non sembra importante se si esegue la prova su terreni coesivi.
- Il test, dopo il riempimento e la chiusura del casing, avverrà analogamente alla fase precedente.

L'elaborazione della conducibilità idraulica necessita inoltre della misura della suzione e della temperatura.

È poi necessario progettare l'installazione di un sistema di tensiometri per la misura della suzione nell'intorno della zona indagata dalla prova a distanze e profondità differenti. Il monitoraggio della suzione è importante in quanto questa esercita un carico idraulico aggiuntivo rispetto al carico idraulico effettivamente applicato: la problematica e quindi l'applicazione della suzione dovrà comunque essere valutata con attenzione in quanto dipendente dal caso applicativo specifico.

La temperatura influisce in due modi sui risultati della prova: attraverso la variazione della viscosità cinematica del fluido permeante ed a causa del fenomeno di dilatazione termica del permeametro. Le correzioni dovute al fenomeno di dilatazione termica vengono eseguite per mezzo del TEG, mentre le correzioni dovute alle variazioni della viscosità cinematica sono trattate riportando i valori di permeabilità alla temperatura di riferimento di 20°C per mezzo di un fattore correttivo Rt: il fattore Rt è pari al rapporto tra la viscosità cinematica dell'acqua alla tempe-

ratura T e la viscosità cinematica alla temperatura di riferimento di 20°C.

ANALISI DELLE MISURE E INTERPRETAZIONE DELLA PROVA

Le misure sono analizzate attraverso l'equazione generica del carico variabile:

$$k_v = R_v \cdot G \cdot L_n \cdot \left(\frac{H_1}{H_2'} \right) \quad (1)$$

Nella quale:

- R_v = fattore di correzione della viscosità (relativo all'acqua a 20°C, Figura 3);
- H_1 = livello iniziale dell'acqua al tempo t_1 ;
- H_2' = livello finale dell'acqua al tempo t_2 (corretto);
- G = costante geometrica.

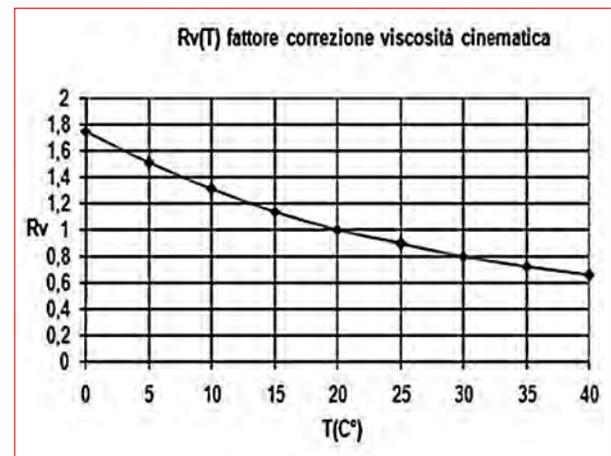


Fig. 3 Andamento del coefficiente correttivo $R_v(t)$

Fig. 3 $R_v(t)$ corrective coefficient trend

In particolare:

R_v è riferito alla media aritmetica delle temperature durante due letture consecutive;

H_1 è il carico idraulico calcolato dal livello di acqua nella buretta fino al livello dell'acqua di falda, e se questo è estremamente profondo ci si limita ad una profondità di 20D al di sotto del casing;

H_2' è la misura del carico idraulico H_2 depura-

to dalle correzioni nella buretta del TEG durante l'incremento temporale analizzato.

I fattori di forma per le condizioni al contorno usati nella prova TSB sono un'estensione di quelli derivati da Hvorslev (1951), opportunamente modificati in modo da tener conto dello spessore limitato del terreno e delle diverse condizioni al contorno tra terreno indagato e substrato.

I fattori geometrici sono:

Stage 1

$$G_1(m) = \left(\frac{\pi d^2}{11mD} \right) \left[1 + a \cdot \left(\frac{D}{4mb_1} \right) \right] \quad (2)$$

Stage 2

$$G_2(m) = \left(\frac{d^2}{16Lfm^2} \right) [2Ln(U_1) + aLn(U_2) + pLn(U_3)] \quad (3)$$

con:

$$U_1 = \frac{mL}{D + 2T} + \left[1 + \left(\frac{mL}{D + 2T} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (4)$$

$$U_2 = \frac{\frac{4mb_2}{D} + \frac{mL}{D} + \left[1 + \left(\frac{4mb_2}{D} + \frac{mL}{D} \right)^2 \right]^{0.5}}{\frac{4mb_2}{D} - \frac{mL}{D} + \left[1 + \left(\frac{4mb_2}{D} - \frac{mL}{D} \right)^2 \right]^{0.5}} \quad (5)$$

$$U_3 = \frac{\frac{mL}{D} + \left[1 + \left(\frac{mL}{D} \right)^2 \right]^{0.5}}{U_1} \quad (6)$$

$$f = 1 - 0.5623e^{-\frac{1.566L}{D}} \quad (7)$$

dove:

- d = diametro interno buretta;
- $m_2 = k_h/k_v$ con m coefficiente di anisotropia;
- D = diametro interno del casing;
- a = 1 per base impermeabile alla profondità b_1 , 0 per spessori assimilabili a infinito, 1 per basi permeabili alla profondità b_1 ;

- b_1 = spessore del suolo testato sotto il casing;
- $b_2 = b_1 - L/2$;
- L = lunghezza dell'approfondimento nello stage 2;
- T = spessore della zona disturbata;
- p = rapporto di disturbo.

Nel primo stage il fronte bagnato è assunto propagarsi perpendicolare al piano di compattazione e la permeabilità è inizialmente calcolata utilizzando l'equazione G_1 assumendo $m=1$, mentre nel secondo stage la conducibilità idraulica è calcolata nella stessa maniera assumendo $m=1$, $p=1$, $T=0$ con linee di flusso che si orientano lungo i piani di compattazione. Il valore risultante nello stage 1 è K_1 , per il secondo stage è K_2 ; essi sono rispettivamente il massimo valore possibile per k_v e il minimo valore possibile per k_h ; normalmente risulta $K_1 < K_2$ perché la conducibilità orizzontale è maggiore rispetto a quella verticale. I valori di K_1 e K_2 usati nel calcolo successivo sono le medie pesate temporali durante le fasi stazionarie. Assumendo il suolo omogeneo k_v deve essere uguale in entrambi gli stage.

Di conseguenza:

$$K_2 \left[\frac{G_2(m)}{G_2(1)} \right] = k_v = K_1 \left[\frac{G_1(m)}{G_1(1)} \right] \quad (8)$$

e

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{\left(\frac{G_1(m)}{G_1(1)} \right)}{\left(\frac{G_2(1)}{G_2(m)} \right)} \quad (9)$$

Questa ha un'unica soluzione per m, L, D, p risolta col metodo del trial and error per diversi m, usando una soluzione teorica e una analisi di regressione statistica.

L'equazione seguente può essere usata per determinare k_v e k_h dalla definizione di m.

Il parametro p, che varia da 1 a 20, è spesso

utilizzato quando $K_2/K_1 < 1$. Lo spessore della zona di disturbo T è normalmente assunto pari a 0.6 cm.

L'analisi qualitativa della prova avviene mediante l'osservazione delle curve di permeabilità. Una curva di permeabilità si ottiene riportando su grafico i valori della conducibilità idraulica in funzione del tempo di durata del test. Tipicamente i valori di permeabilità risultano alti all'inizio della prova per poi decrescere con andamento all'incirca asintotico. Andamenti differenti possono indicare problemi e/o anomalie della prova.

Le esperienze sperimentali acquisite suggeriscono un metodo di analisi per la scelta di K_1 e K_2 , alternativo alle medie temporali, che consiste nell'individuazione del valore a cui le curve di permeabilità asintoticamente tendono nelle due fasi. L'analisi è poi condotta allo stesso modo (cfr. metodo trial and error, di cui sopra).

Nell'interpretazione della prova il rapporto tra k_h e k_v (coefficiente di anisotropia) può rivelare l'omogeneità idraulica degli strati compattati costituenti la barriera e quindi le direzioni preferenziali del flusso.

Ogni test di conducibilità richiede approssimativamente una porzione di manto avente un'area di 4x4 m (interasse maggiore di 40 volte il diametro del casing) e spessore di almeno 1 m.

CASO APPLICATIVO

Di seguito vengono riportati i dati acquisiti e le elaborazioni di due prove Boutwell eseguite su una barriera di fondo di discarica per rifiuti non pericolosi. La barriera multistrato è costituita da un materiale naturale prevalentemente argilloso-limoso compattato le cui caratteristiche geotecniche, in ottemperanza al Capitolato utilizzato, presentano i valori di Tabella 1. I valori di permeabilità riportati in tabella sono stati ottenuti in cella edometrica attrezzata a permeometro a carico variabile.

Campioni	LL %	LP %	IP %	Attività	Ghiaia %	Sabbia %	Limo %	Argilla %	K m/s	γ_s kN/m ³	W_c %
C1	38	18	20	0.65	2	30	18	50	2.2×10^{-10}	15.57	22.9
C2	36	17	19	0.68	8	28	26	38	7.9×10^{-10}	15.46	22.7
C3	37	20	17	0.52	1	35	20	44	6.2×10^{-10}	15.03	24.1
C4	39	19	20	0.57	1	32	20	47	1.2×10^{-10}	15.12	24.6

Tab. 1 Caratterizzazione della barriera

Tab. 1 Barrier characterization

La barriera è costituita da cinque strati di circa 20 cm ciascuno ed è stata verificata al termine di ogni stesa mediante l'esecuzione di prove di densità in sito; i risultati di tali test, confrontati con il 90% del peso di volume del terreno secco (γ_d 90% opt > 14.00 kN/m³) ottimo, ottenuto da Proctor Standard, hanno evidenziato una idonea compattazione. Al termine di tale fase di controllo sono state eseguite prove di conducibilità idraulica in sito mediante test Boutwell e prove di permeabilità in laboratorio mediante edometro su campioni idoneamente presi nell'intorno della prova in sito di riferimento.

A scopo esemplificativo sono di seguito riportati i dati acquisiti, l'elaborazione e l'interpretazione dei risultati delle due prove TSB.

TEST 1

Registrazioni dopo l'installazione

fattore geometrico G1 con m=1	0.00102
a coefficiente delle condizioni al contorno	-1 (substrato drenante)
ID (diametro interno) casing	0.1m
ID (diametro interno) standpipe	0.019 m
b1 spessore indagato dal fondo foro	4 m
profondità del casing	0.22 m
altezza dal piano di campagna dello zero buretta	0.55m

Fase 1

I valori registrati e ricavati dalla prova sono riportati nelle Tabella 2 e Figura 4; nell'elaborazione si è tenuto conto dei valori di suzione registrati mediante tensiometri (la medesima considerazione vale per tutte le successive elaborazioni).

La valutazione interpretativa del k_1 è stata eseguita su base asintotica ed ha fornito un valore di 4.8E-11 m/s.

Data	Orario	T (°C)	TEG (cm)	Rv	Livello (cm)	h1 (m)	h'2 (m)	K1 (m/s)
23 apr	11:21		66		70	3.47		
23 apr	11:31	20.5	66	0.99	69.8	3.468	3.468	9.72E-10
23 apr	11:41	20.75	66	0.98	69.7	3.467	3.467	4.83E-10
23 apr	14:08	22	66.4	0.95	69.4	3.464	3.46	2.24E-10
23 apr	15:08	23.25	66.5	0.93	69.2	3.462	3.461	2.28E-10
23 apr	16:08	23.5	66.6	0.92	69	3.46	3.459	2.27E-10
24 apr	9:30	20.25	65.6	0.99	65.9	3.429	3.439	9.91E-11
24 apr	15:00	20.25	66.5	0.99	66	3.43		
26 apr	11:00	22.75	66.5	0.94	61.5	3.385	3.385	6.21E-11
28 apr	10:10	20.5	66.1	0.99	56.5	3.335		

Tab. 2 Valori misurati in sito.

Tab. 2 Measurements.

Data	Orario	T (°C)	TEG (cm)	Rv	Livello (cm)	h1 (m)	h'2 (m)	K2 (m/s)
28 apr	12:30		70		70	3.47		
28 apr	13:43	23.5	70.2	0.92	63.7	3.407	3.405	2.3E-10
28 apr	14:33	24	70.2	0.90	61.5	3.385	3.385	1.1E-10
28 apr	15:30	24	70.3	0.90	59.7	3.367	3.366	8.6E-11
28 apr	16:00	24	70.3	0.90	58.8	3.358	3.358	7.7E-11
28 apr	16:30	24	70.2	0.90	58	3.35	3.351	6E-10
29 apr	9:30	20.5	69.1	0.98	38.8	3.158	3.169	5.3E-11
29 apr	14:30	18	69.1	1.05	35.4	3.124	3.124	3.8E-11

Tab. 3 Valori misurati in sito.

Tab. 3 Measurements.

Fase 2

La seconda fase è stata eseguita con un approfondimento della tasca di prova sotto al casing di L=0.12 m, con fattore geometrico G2 (con m=1) pari a 0.000403. I valori ricavati da questa prova sono riassunti nelle Tabella 3 e Figura 5.

Con la medesima metodologia interpretativa è stato ottenuto un valore di k_2 apparente pari a 6.214E-11 m/s.

Il rapporto tra le permeabilità apparenti fornisce

un valore di 1,29 e il coefficiente di anisotropia che eguaglia il rapporto teorico con quello in sito secondo la funzione trial and error è $m = 2.05$, da cui si ricava:

$$k_v = 2.33 \text{ E-11 m/s}$$

$$k_h = 9.90 \text{ E-11 m/s}$$

A complemento dello studio in sito, durante l'esecuzione delle prove Boutwell sono stati prelevati due campioni indisturbati di terreno per ciascuna prova); il criterio eseguito per il campionamento è stato quello di caratterizzare il

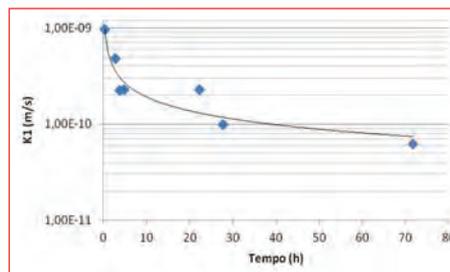


Fig. 4 Andamento delle misure nel tempo.

Fig. 4 Measurements vs time trend.

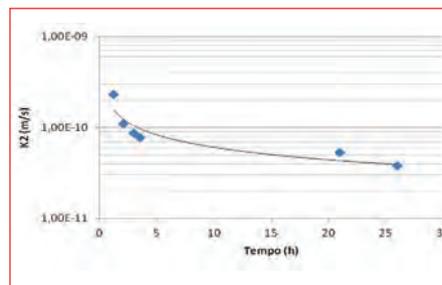


Fig. 5 Andamento delle misure nel tempo.

Fig. 5 Measurements vs time trend.

Tab. 4 Valori misurati in sito.
Tab. 4 Measurements.

Data	Orario		T media (C°)	TEG		carico idraulico		
	ore(h)	minuti(mi)		livello (cm)	Livello (cm)	h1 (m)	h' 2 (m)	K11(m/s)
15-set	15	22		94,2	95,9	3,489		
15-set	16	10	33,4	93,9	94,5	3,475	3,478	9,108E-10
16-set	9	10	29,3	90,1	90,3	3,433	3,471	1,699E-11
16-set	15	3	28	90,2	89,8	3,428	3,427	7,665E-11
17-set	9	20	28,25	88,4	86,4	3,394	3,412	6,562E-11
17-set	16	0	30,05	87,7	85,3	3,383	3,39	4,369E-11
18-set	8	55	29,4	86	82,7	3,357	3,374	3,942E-11
18-set	12	20	26,95	84,9	81,4	3,344	3,355	4,599E-11
20-set	10	45	30,45	83,1	78,6	3,316	3,334	1,58E-11
20-set	11	0	31,2	83	78,1	3,311	3,312	1,165E-09

terreno a circa 20 cm dal p.c. e cioè poco sopra il piano di appoggio della strumentazione nella Fase 1. Il campione, preso prima di completare lo scavo di tale fase, è stato oggetto di una prova di conducibilità idraulica in edometro in direzione verticale, ovvero perpendicolare al p.c. Il secondo campione è stato necessariamente prelevato dopo il termine della fase 2 e quindi dopo l'estrazione del casing; l'infissione della fustella è proceduta in direzione orizzontale all'interno dell'avanzamento di foro della fase 2 previa asportazione della parte più allentata; il test in edometro ha permesso di studiare il flusso in direzione orizzontale rispetto al p.c. e quindi analogamente a quanto avvenuto nella fase 2.

I valori della permeabilità ottenuti in laboratorio hanno fornito valori entrambi compresi in E-11 m/s e prossimi ai rispettivi valori ottenuti dalla prova in sito, e più precisamente:

$$k_v = 2.11 \text{ E-11 m/s}$$

$$k_h = 7.20 \text{ E-11 m/s}$$

TEST 2

Registrazioni dopo l'installazione

fattore geometrico G1 con m =1	0,00111
a coefficiente delle condizioni al contorno	-1 (substrato drenante)
ID (diametro interno) casing	0,1m
ID (diametro interno) standpipe	0,02 m
b1 spessore indagato dal fondo foro	1 m
profondità del casing	0,17 m
altezza dal piano di campagna dello zero buretta	0,36m

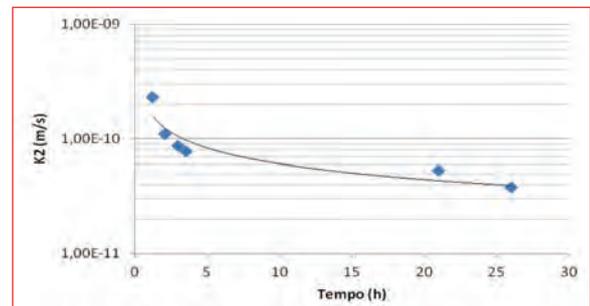


Fig. 6 Andamento delle misure nel tempo.
Fig. 6 Measurements vs time trend.

Fase 1

I valori registrati e ricavati dalla prova sono riportati nella tabella sottostante; nell'elaborazione si è tenuto conto dei valori di suzione registrati mediante tensiometri (la medesima considerazione vale per tutte le successive elaborazioni).

La valutazione del k_1 è stata eseguita su base asintotica ed ha fornito un valore di 4.2E-11 m/s .

Fase 2

La seconda fase è stata eseguita con un approfondimento della tasca di prova sotto al casing di $L=0.12 \text{ m}$, con fattore geometrico G2 (con $m = 1$) pari a 0.0004065 . I valori ricavati da questa prova sono riassunti nella tabella sottostante.

Con la medesima metodologia interpretativa è stato ottenuto un valore di k_2 apparente pari a 1.24E-10 .

Il rapporto tra le permeabilità apparenti fornisce un valore di 2,8 e il coefficiente di anisotropia che eguaglia il rapporto teorico con quello in sito secondo la funzione trial and error è $m =$

Data	Orario		T media (C°)	TEG		carico idraulico		K2t(m/s)
	ore(h)	minuti(mi)		livello (cm)	Livello (cm)	h1 (m)	h' 2 (m)	
20-set	11	55		83,3	92,7	3,457		
20-set	12	45	34,7	83,6	91,8	3,448	3,445	3,43E-10
20-set	14	0	35,8	83,8	91,3	3,443	3,441	1,31E-10
20-set	16	15	36,35	84	90,5	3,435	3,433	1,03E-10
21-set	9	45	28,4	80,7	79,9	3,329	3,362	1,15E-10
21-set	17	0	24,6	81,9	77,8	3,308	3,296	1,39E-10
22-set	10	15	27,5	81	70,3	3,233	3,242	1,11E-10
22-set	17	40	29,5	82	68,2	3,212	3,202	1,18E-10
23-set	10	20	31,25	80,8	60,7	3,137	3,149	1,05E-10
23-set	11	10	31,15	81,1	60,7	3,137	3,134	1,01E-10

Tab. 5 Valori misurati in sito.
Tab. 5 Measurements.

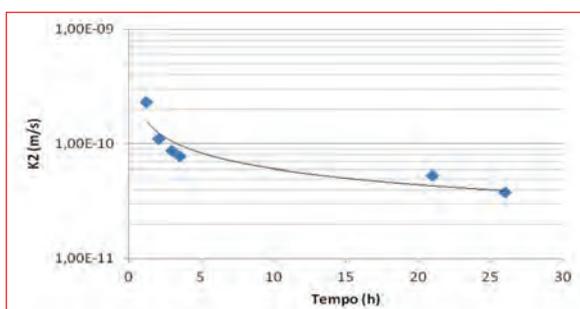


Fig. 7 Andamento delle misure nel tempo.
Fig. 7 Measurements vs time trend.

7.22, da cui si ricava:

$$kv = 5.9 \text{ E-12 m/s}$$

$$kh = 3.1 \text{ E-10 m/s}$$

L'elaborazione delle prove di conducibilità idraulica eseguite in laboratorio ha fornito valori molto simili tra loro e compresi tra 6 e 9 E-11 m/s .

INTERPRETAZIONE E CONFRONTO DELLE PROVE

Le prove di permeabilità, in sito ed in laboratorio, sono state protratte per tempi tali da permettere il raggiungimento della stazionarietà del flusso evidenziando la tendenza asintotica orizzontale delle curve.

Dal confronto delle prove in sito ed in laboratorio, relativamente al caso A si osserva una notevole similitudine dei risultati: ciò evidenzerebbe una buona omogeneità dell'intera barriera impermeabile ($m = 2$) per quanto riguarda sia i singoli strati sia i giunti tra essi presenti. Si nota inoltre come la permeabilità orizzontale, fortemente di-

pendente dalla connessione tra gli strati, sia comunque leggermente maggiore della verticale.

Nel caso B, dalla prova in sito risulta evidente una maggiore anisotropia idraulica ($m = 7$); viceversa i valori relativamente simili della conducibilità nelle due direzioni ricavati da prove di laboratorio manifestano omogeneità dal punto di vista idraulico ($m = 1.9$). In realtà l'apparente incongruenza può essere spiegata facendo dipendere la filtrazione in direzione orizzontale principalmente dai giunti interstrato, efficacemente rilevata dalle prove Boutwell che indagano un volume di terreno maggiore (macrostruttura) mentre, le prove di laboratorio, che di fatto hanno interessato i singoli strati e quindi la microstruttura, non hanno rilevato tale comportamento anisotropo. Le prove di laboratorio in tale contesto risultano potenzialmente fuorvianti e non cautelative qualora da esse soltanto si volesse valutare il comportamento del manto impermeabile nel suo complesso.

Si vuole inoltre sottolineare come lo studio dell'andamento delle curve di conducibilità idraulica in funzione del tempo sia un valido aiuto per identificare anomalie derivanti dalle condizioni del manto e da errori/problematiche di installazione della strumentazione. Queste situazioni si possono verificare in entrambe le fasi di prova. A scopo esemplificativo di seguito è riportato un grafico in cui si nota una forte dispersione dei dati che è

imputabile a due possibili cause: la prima può indicare un'insufficiente compattazione degli strati con la conseguente presenza di vuoti o microfratture che aumentano la permeabilità media della barriera, la seconda potrebbe essere associabile ad un errato posizionamento della strumentazione con conseguenti perdite idrauliche non dipendenti dal terreno.

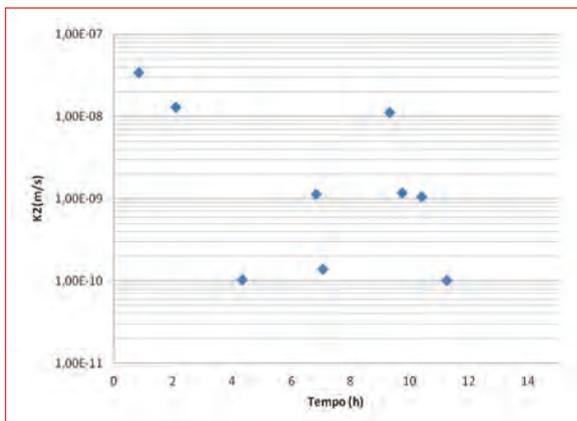


Fig. 8 Andamento delle misure nel tempo.

Fig. 8 Measurements vs time trend.

In questo caso può essere utile alla fine del test estrarre lo strumento e, asportando gradualmente il terreno nell'intorno del casing, valutare l'andamento del fronte umido nel terreno; tale procedura spesso permette di verificare la direzione del flusso misurato al fine di valutare una eventuale distribuzione relativamente omogenea, ovvero una prevalente orientazione lungo discontinuità idrauliche.

CONCLUSIONI

La prova Boutwell ha permesso, mediante due fasi operative, di ricavare la conducibilità idraulica verticale ed orizzontale del terreno in sito: tale valore è stato poi confrontato con i risultati di prove di permeabilità eseguite in laboratorio.

Lo studio ha permesso qualitativamente di confermare quanto esposto da Boutwell e Derick (1986), i quali affermano che l'affidabilità dei risultati dei valori di permeabilità, determinati con

questa prova, sono paragonabili a quelli eseguiti in laboratorio su campioni di ottima qualità, ma più rappresentativi in quanto eseguiti su un volume circa 100 volte maggiore rispetto a quello di un provino triassiale e circa 200 volte rispetto ad un provino edometrico.

In linea con tale affermazione lo studio ha permesso di indagare la macrostruttura del terreno, ovvero le zone di giunzione tra le zolle compattate all'interno del singolo strato e soprattutto i giunti interstrato, i quali risultano particolarmente critici dal punto di vista dell'impermeabilizzazione. Le prove di laboratorio, come si evince dai risultati sperimentali, risultano invece particolarmente idonee per indagare la microstruttura e quindi l'omogeneità idraulica dei singoli strati costituenti la barriera. Le prove di laboratorio permettono anche di controllare meglio le condizioni tensionali e deformative dei terreni soggetti alla filtrazione.

La migliore soluzione tecnico-economica è sempre quella di abbinare diverse prove di laboratorio ad alcune prove in sito aventi funzione di controllo dell'intera barriera. La sperimentazione eseguita su alcuni manti impermeabili mediante numerose prove TSB, di cui nel presente studio se ne riportano due esemplificative, e prove di permeabilità in laboratorio, ha dimostrato la disomogeneità idraulica delle componenti orizzontale e verticale della conducibilità.

Dalla sperimentazione presentata discende quindi la proposta di aggiornamento dei capitoli i quali attualmente fanno menzione solo ad un generico valore massimo di conducibilità idraulica. Le conoscenze acquisite mediante decine di prove in sito e centinaia di prove in laboratorio indirizzano a distinguere la conducibilità idraulica verticale ed orizzontale del singolo strato della barriera, bene indagabile con prove di laboratorio, dalla conducibilità idraulica orizzontale dell'intera barriera comprensiva dei giunti interstrato meglio investigata dalle prove in sito. In tal senso la realizzazione di più prove Boutwell a profondità differenti permetterebbe di testare tutti gli interstrati presenti all'interno

della barriera impermeabile pur dovendo tenere in considerazione i limiti geometrici, definiti da Hvorslev, tra la profondità della tasca di prova ed il limite inferiore del manto impermeabile. La prova TSB è richiamata da diversi capitoli tecnici del settore ambientale e sta entrando in alcune linee guida specifiche del settore delle discariche. Rimane fondamentale da parte delle direzioni lavori, del collaudatore e degli organi di controllo, verificare che il test venga sempre realizzato in due fasi. Invece molto spesso viene eseguito un test di percolazione (ad esempio la sola fase 1) che impropriamente è chiamato prova Boutwell: questa può fornire solamente un risultato parziale relativo alla sola k_v .

È importante sottolineare come la complessità, la "criticità" e la durata del test nelle varie fasi operative impongono sia un costo decisamente maggiore del test TSB rispetto alle prove di conducibilità idraulica in laboratorio, sia un corretto inserimento nel cronoprogramma della direzione tecnica della discarica.

Le prove TSB debbono essere oggetto di una vera e propria progettazione, frutto della sinergia delle varie figure tecniche aventi responsabilità nella progettazione, nell'esecuzione e nel collaudo dei manti impermeabili ■ ■ ■

BIBLIOGRAFIA

A.S.T.M.:D6391-99 - "Field measurement of hydraulic conductivity limits of porous materials using Two Stages of infiltration from a borehole".

Boutwell G.P. (1992) - "The STEI Two-Stage Borehole field Permeability Test". Geotechnical Committee Houston Branch, ASCE: Containment liner Technology and Subtitle D, March 12, Houston, Texas (US).

Boutwell G.P., Derick R.K. (1986) - "Groundwater protection for sanitary landfills in the saturated zone". Proc. NWWA Waste - Tech '86, Chicago.

Caprioni G., Garbin F., Napoleoni Q., Scarpazzi M., Tramonti L. (2011) - "Il perme-

metro di Boutwell". N. 29 notiziario Professione Geologo dell'Ordine dei Geologi del Lazio.

Casrlaw H.S., Jaeger J.C. (1959) - "Conduction of heat in solids". 2nd ed., Oxford University Press, London, UK.

Hvorslev J. (1951) - "Time lag and soil permeability in ground water observations". Bulletin No. 36, USA/COE WES Vicksburg, MS.

Trautwein S.J., Boutwell G.P. (1994) - "In situ Hydraulic Conductivity tests for compacted soil liners and caps". Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, ASTM STP 1142, David E. Daniel and Stephen J. Trautwein Eds., American Society for testing and Materials, Philadelphia (US).