



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in INGEGNERIA EDILE

**LA MISURA DEL COEFFICIENTE DI PERMEABILITÀ
DI TERRENI A GRANA FINE
MEDIANTE PROVE DI LABORATORIO**

**DETERMINATION OF THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY
OF FINE GRAINED SOILS
BY LABORATORY TESTING**

Relatore: Chiar.ma prof.ssa
EVELINA FRATALOCCHI

Tesi di Laurea di:
ADRIANO GABRIELLI

A.A. 2019/2020

Indice

1. OGGETTO E SCOPO DELLA TESI.....	3
2. PROVE DI PERMEAZIONE IN ACQUA.....	4
2.1 Introduzione	4
2.2 Definizioni	5
2.3 Attrezzatura	5
2.3.1 Sistema idraulico	5
2.3.2 Sistema di misura del flusso.....	7
2.3.3 Sistema di pressione	8
2.3.4 Permeametro.....	8
2.3.5 Attrezzature per preparazione e allestimento del provino in cella	9
2.3.6 Ulteriori strumentazioni.....	10
2.4 Acqua di permeazione	10
2.5 Procedure di prova	11
2.5.1 Preparazione del provino	11
2.5.2 Montaggio.....	13
2.5.3 Saturazione	13
2.5.4 Consolidazione.....	15
2.5.5 Permeazione e criteri di termine prova	16
2.5.6 Smontaggio	18
2.6 Elaborazione dei risultati	18
2.6.1 Prova a carico costante e prova a flusso costante.....	18
2.6.2 Prova a carico variabile	19
2.6.3 Correzione per la temperatura	20
2.7 Rapporto dati di prova	20
3. PROVE DI PERMEAZIONE CON SOLUZIONI ACQUOSE.....	22
3.1 Introduzione e finalità della prova.....	22
3.2 Apparato, procedure di allestimento ed esecuzione della prova.....	24

3.3 Termine della prova	29
3.4 Elaborazione dei risultati	30
3.5 Rapporto di prova	32
4 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	33

1. OGGETTO E SCOPO DELLA TESI

La tesi si inquadra nell'ambito della sperimentazione geotecnica relativamente alla misura della conducibilità idraulica dei terreni, parametro che ne condiziona il comportamento idraulico e meccanico. Nel dettaglio, la tesi riguarda le procedure sperimentali per la determinazione della permeabilità mediante prove di laboratorio, utilizzando il permeametro a parete flessibile e l'acqua o, in alternativa, soluzioni acquose quale permeante.

Il permeametro è un'attrezzatura di laboratorio che consente di eseguire prove per la determinazione *diretta* della conducibilità idraulica, k , su campioni di terra. Con il termine diretta si intende che, a differenza di quanto si può fare nel caso dell'edometro, imponendo un flusso costante o variabile attraverso il campione, è possibile eseguire la misura del coefficiente di conducibilità idraulica (detto anche coefficiente di permeabilità) del materiale.

L'oggetto di questo elaborato è la determinazione della permeabilità dei terreni con particolare riferimento a terreni a grana fine per i quali il coefficiente di permeabilità ha grande rilevanza poiché condiziona direttamente la durata del processo di consolidazione. Il coefficiente di permeabilità è inoltre fondamentale nel caso in cui si debba utilizzare la terra come materiale per costruire barriere idrauliche per impedire il flusso dell'acqua o di inquinanti solubili, come ad esempio nel caso delle barriere di fondo per discariche controllate.

La scelta del permeametro a parete flessibile risulta vantaggiosa rispetto ad altri tipi di permeametri per diverse ragioni. Innanzitutto, con tale permeametro è possibile il controllo delle pressioni di confinamento e delle deformazioni del campione, che rivestono un ruolo fondamentale nel valore di k che si misura. Inoltre, è possibile controllare e garantire la saturazione del campione. Anche il grado di saturazione infatti influenza notevolmente il valore della permeabilità. Il permeametro a parete flessibile consente di alloggiare campioni cilindrici anche di dimensioni ragguardevoli in confronto ad altri permeametri (nella versione più ricorrente: diametro fino a 10 cm ed altezza fino a 15 cm).

Lo scopo della tesi è di fornire un quadro riepilogativo delle corrette procedure sperimentali per l'esecuzione delle prove di permeazione con permeametro a parete flessibile che può essere utile per quanti approcciano al problema della determinazione della permeabilità di laboratorio o ne debbano individuare gli aspetti salienti per un'analisi critica di risultati ottenuti.

Quanto riportato nella presente tesi è stato tratto dalla norma ASTM D5084 per quanto riguarda le prove con acqua (cap. 2) e dalla norma ASTM D7100 per le prove con soluzioni acquose (cap. 3).

2. PROVE DI PERMEAZIONE IN ACQUA

2.1 Introduzione

La prova riguarda la misurazione in laboratorio del coefficiente di conducibilità idraulica, o coefficiente di permeabilità, di materiali porosi saturi d'acqua mediante permeametro a parete flessibile, con utilizzo di l'acqua come liquido permeante.

La prova consiste nell'imporre un flusso monodimensionale in regime di moto laminare all'interno di materiali porosi, come terra e roccia, saturi o saturati d'acqua. Si presume che la legge di Darcy sia valida e quindi che la conducibilità idraulica non vari al variare del gradiente idraulico.

Il permeametro a parete flessibile consente di determinare conducibilità idraulica ad un livello controllato di tensioni efficaci. Poiché la conducibilità idraulica varia al variare dell'indice dei vuoti, che cambia quando cambia la tensione efficace, se l'indice dei vuoti è modificato, la conducibilità idraulica del provino può variare apprezzabilmente. Per determinare la relazione tra conducibilità idraulica e indice dei vuoti, il test di conducibilità dovrebbe essere ripetuto a differenti livelli di tensioni efficaci.

È importante precisare inoltre che numerosi studi ed esperienze documentate in letteratura hanno dimostrato che la conducibilità idraulica misurata in laboratorio su campioni di piccole dimensioni non sono uguali a valori ottenuti su scala maggiore. Pertanto, i risultati dovrebbero essere utilizzati con cautela e da personale qualificato.

Nella maggior parte dei casi, quando si testano materiali ad alto potenziale di rigonfiamento, la pressione di confinamento efficace dovrebbe essere circa 1,5 volte la pressione di rigonfiamento del provino o, comunque tale da impedirne il rigonfiamento, per evitare che si verifichino condizioni di flusso anomale.

Esistono 4 principali metodi diversi (sistemi idraulici) che possono essere utilizzati:

1.1.1 Metodo A: carico costante

1.1.2 Metodo B: carico variabile in ingresso e costante in uscita

1.1.3 Metodo C: carico variabile in ingresso e in uscita,

1.1.4 Metodo D: flusso costante

Durante la prova è necessario registrare la temperatura per tenere conto dell'influenza della temperatura sulla viscosità dell'acqua e quindi sul valore di k misurato.

Si può utilizzare questa prova su vari tipi di campione (intatti, ricostituiti, compattati, ecc.) che hanno una conducibilità idraulica inferiore a 1×10^{-6} m/s. Per il metodo a volume costante, la conducibilità idraulica deve essere inferiore a 1×10^{-7} m/s.

Se la conducibilità idraulica è maggiore di 1×10^{-6} m/s ma non superiore a circa 1×10^{-5} m/s, la dimensione dei condotti deve essere aumentata così come la porosità delle pietre porose. Un altro metodo per ovviare a ciò è quello di utilizzare un fluido a viscosità più elevata o di diminuire adeguatamente la sezione trasversale dell'area del campione di prova, o entrambi.

Se la conducibilità idraulica è inferiore a 1×10^{-11} m/s, tipicamente i sistemi idraulici standard non saranno sufficienti. Una possibile soluzione quando si tratta di materiali così impermeabili è l'adozione di misurazioni utilizzando attrezzature ad alta precisione oppure ridurre la lunghezza o incrementare l'area della sezione trasversale, o entrambi, del provino (tenendo conto della granulometria del provino).

Il tempo per eseguire la prova dipende dal metodo utilizzato, dal grado iniziale di saturazione e dalla conducibilità idraulica del campione di prova.

Il metodo a flusso costante richiede il periodo di tempo più breve (qualche giorno). Gli altri metodi richiedono un periodo di tempo più lungo, da pochi giorni a poche settimane a seconda della k del provino.

In genere, per k nell'ordine di 1×10^{-9} m/s è necessaria circa una settimana.

2.2 Definizioni

Perdita di carico, Δh : la variazione del carico idraulico totale dell'acqua attraverso il provino.

Gradiente idraulico, i : rapporto fra la perdita di carico e l'altezza del provino.

Permeometro: l'apparato (cella) contenente il campione. L'apparato in questo caso è tipicamente la cella di tipo triassiale con tutti i suoi componenti (copertura superiore e inferiore per campioni, pietre porose e carta da filtro; membrana; cella; piastre superiore e inferiore; valvole; ecc).

Conducibilità idraulica, k : la velocità con cui filtra l'acqua in condizioni di flusso laminare attraverso un'area della sezione trasversale unitaria del mezzo poroso per effetto di un gradiente idraulico unitario, a condizioni di temperatura standard (20 ° C).

Numero di pore volume: nei test di conducibilità idraulica, il volume di acqua permeata attraverso un provino diviso per il volume dei vuoti del provino.

2.3 Attrezzatura

2.3.1 Sistema idraulico

Il sistema idraulico nel caso di metodo a carico costante deve essere in grado di mantenere pressioni idrauliche costanti $\pm 5\%$ e deve includere mezzi per misurare le pressioni idrauliche a entro la tolleranza prescritta. Inoltre, la perdita di carico attraverso il permeometro deve essere mantenuto costante $\pm 5\%$ e deve essere misurato con la stessa precisione.

Un manometro, un trasduttore elettronico di pressione o qualsiasi altro dispositivo di adeguata precisione deve misurare le pressioni fino a un minimo di tre cifre significative. L'ultima cifra potrebbe essere dovuta alla stima. Quando viene stimata l'ultima cifra, quella lettura è influenzata dalla posizione dell'occhio, quindi è necessario uno specchio o un altro dispositivo per ridurre l'errore di lettura causato dalla parallasse.

Nel caso di prova a carico variabile, il sistema deve consentire la misurazione della perdita di carico applicata, quindi del gradiente idraulico, $\pm 5\%$ in qualsiasi momento durante la prova. Inoltre, il rapporto tra le perdite di carico iniziali diviso per la perdita di carico finale, in un determinato intervallo di tempo, deve essere misurato in modo accurato $\pm 5\%$. La perdita di carico deve essere misurata con un manometro, trasduttore elettronico di pressione o una pipetta graduata o qualsiasi altro dispositivo di adeguata precisione fino ad un minimo di tre cifre significative.

Lo schema in Figura 1 descrive il sistema idraulico con i componenti di base necessari soddisfare gli obiettivi del metodo di prova a carico variabile.

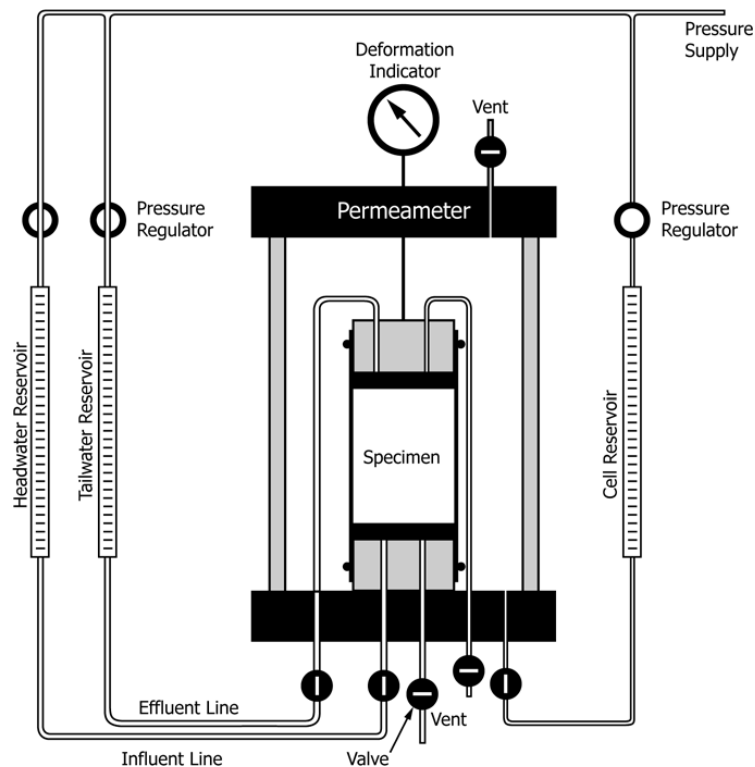


FIGURA 1. Sistema per misura a carico variabile

Nel caso di prova a flusso costante, il sistema deve essere in grado di mantenere una velocità di flusso costante attraverso il campione al $\pm 5\%$.

La misurazione del flusso deve essere effettuata mediante siringa calibrata, pipetta graduata o altro dispositivo di adeguata precisione. La perdita di carico attraverso il permeametro deve essere misurata con un minimo di tre cifre significative e con una precisione di $\pm 5\%$ utilizzando uno o più trasduttori di pressione elettronici o altri dispositivi di adeguata precisione.

Il sistema idraulico, in ogni caso, deve essere progettato per facilitare la rimozione rapida e completa delle bolle d'aria libere dalle linee di flusso; ad esempio, utilizzando correttamente tubi e valvole a sfera di dimensioni adeguate e raccordi senza filettatura.

I tubi di dimensioni adeguate devono essere abbastanza piccoli da prevenire l'intrappolamento di bolle d'aria.

Il sistema idraulico deve avere la capacità di applicare una contropressione (back-pressure) al provino per facilitarne la saturazione. Il sistema deve essere in grado di mantenere la contropressione applicata per tutta la durata della misura della conducibilità idraulica. Il sistema di contropressione deve essere in grado di applicare, controllare e misurare la contropressione al $\pm 5\%$ della pressione applicata.

La contropressione può essere fornita da un gas compresso, o da un peso che agisce su un pistone o qualsiasi altro metodo in grado di applicare e controllare la contropressione alla tolleranza prescritta.

L'applicazione della pressione del gas direttamente a un fluido dissolverà il gas nel fluido. Sono disponibili diverse tecniche per ridurre al minimo la dissoluzione di gas nel fluido di contropressione, inclusa la separazione delle fasi di gassose e liquide con un sistema di separazione a membrana (e.g. accumulatore a vescica) e sostituzione frequente del liquido con acqua disaerata.

2.3.2 Sistema di misura del flusso

Il sistema di misurazione del flusso deve consentire la misura sia dei volumi in entrata che in uscita a meno che la continuità di flusso e la fine della consolidazione o del rigonfiamento possono essere verificati con altri mezzi. I volumi di flusso devono essere misurati con un accumulatore graduato, una pipetta graduata, un tubo verticale in combinazione con un trasduttore di pressione elettronico o altro dispositivo di misurazione del volume di adeguata precisione.

La precisione del flusso richiesta per la quantità di volume di flusso misurato in un intervallo di tempo è al $\pm 5\%$ o migliore.

Il sistema di misurazione del flusso deve consentire di effettuare una completa e rapida disaerazione. La conformità del sistema in risposta alle variazioni di pressione deve essere ridotta al minimo utilizzando un sistema rigido di misurazione del flusso. Devono essere utilizzati tubi rigidi, come tubi metallici o termoplastici rigidi, o vetro.

Le perdite di carico nei tubi, nelle valvole, nelle pietre porose e la carta da filtro possono causare errori. Per ovviare a tali errori, il permeametro deve essere assemblato senza un campione all'interno e deve essere riempito il sistema idraulico. Se si utilizza una prova a carico costante o variabile, le pressioni o i carichi idraulici che verranno utilizzati nella prova e la portata, devono essere misurati con una precisione del $\pm 5\%$ o migliore. La velocità di flusso deve essere almeno dieci volte maggiore della velocità di flusso misurata quando un campione viene posizionato all'interno del permeametro e vengono applicate le stesse pressioni o carichi idraulici. Nel caso di prova a flusso costante, la portata da utilizzare per la prova deve essere fornita

al permeametro e la perdita di carico misurata. La perdita di carico senza il campione deve essere inferiore a 0,1 volte la perdita di carico quando è presente il campione.

2.3.3 Sistema di pressione

Il sistema per la pressurizzazione della cella del permeametro deve essere in grado di applicare e controllare la pressione in cella al $\pm 5\%$ della pressione applicata. Tuttavia, la tensione efficace sul campione (che è la differenza tra la pressione in cella e la pressione interstiziale dell'acqua) deve essere mantenuta al valore desiderato con una precisione del $\pm 10\%$. Il dispositivo per la pressurizzazione della cella può essere costituito da un serbatoio collegato alla cella del permeametro e parzialmente riempito con acqua disaerata, con la parte superiore del serbatoio collegata a una fonte di aria compressa o un'altra fonte di pressione. La pressione dell'aria deve essere controllata da un regolatore di pressione e misurata da un manometro, un trasduttore di pressione elettronico o qualsiasi altro dispositivo in grado di misurare con la tolleranza prescritta. Può essere utilizzato un sistema idraulico pressurizzato da un peso agente su un pistone, o qualsiasi altro dispositivo di pressione in grado di applicare e controllare la pressione della cella del permeametro entro la tolleranza prescritta.

L'acqua disaerata viene comunemente utilizzata per il fluido in cella per ridurre al minimo il potenziale di diffusione dell'aria attraverso la membrana nel campione. Sono accettabili anche altri fluidi che hanno basse solubilità nei gas come gli oli, a condizione che non reagiscano con i componenti del permeametro. Inoltre, utilizzare un tubo lungo (circa da 5 a 7 m) che collega il liquido in cella pressurizzato aiuta alla cella a ritardare la comparsa di aria nel fluido in cella e a ridurre il flusso di aria disciolta nella cella.

2.3.4 Permeametro

Il provino è posizionato fra due pietre porose e due basi inferiore e superiore, il tutto racchiuso da una membrana sigillata alla sommità e alla base (vedi Fig.1).

La cella del permeametro può consentire la misura della variazione di altezza del campione con il monitoraggio del pistone (ove presente) o un estensimetro che si estende attraverso la piastra superiore della cella che si appoggia sulla sua sommità e collegato a un quadrante o altro dispositivo di misurazione. Il pistone o l'estensimetro devono passare attraverso una boccia e una guarnizione incorporata nella piastra superiore e deve essere caricata con forza sufficiente per compensare la pressione della cella che agisce sull'area di sezione trasversale del pistone in cui passa attraverso la guarnizione. Se vengono misurate le deformazioni, l'indicatore di deformazione deve essere un comparatore graduato a 0,5 mm o migliore. Qualsiasi altro dispositivo di misurazione che soddisfi questi requisiti è accettabile.

Al fine di facilitare la rimozione dell'aria e quindi la saturazione del sistema, si consigliano quattro linee di drenaggio due alla base inferiore e due alla base superiore. Le linee di drenaggio devono essere controllate senza variazione di volume delle valvole, come le valvole a sfera, e devono essere progettate per ridurre al minimo lo spazio nelle linee.

Devono essere utilizzati una base superiore e inferiore impermeabili e rigide, per supportare il campione e favorire la trasmissione del liquido permeante al e dal campione. Il diametro della base superiore e della base inferiore deve essere uguali al diametro del campione $\pm 5\%$. La base inferiore deve impedire perdite, movimenti laterali o inclinazioni e la base superiore deve essere progettata per ricevere il pistone o l'estensimetro, se utilizzato, in modo tale che l'area di contatto tra pistone e base superiore siano concentriche. La superficie laterale delle basi, che entrano in contatto con la membrana per formare una chiusura, deve essere liscia e priva di graffi.

La membrana flessibile utilizzata per racchiudere lateralmente il campione deve fornire una protezione affidabile contro le perdite. La membrana deve essere attentamente ispezionata prima dell'uso. Se vi sono evidenti difetti o fori, la membrana deve essere scartata.

Per ridurre al minimo il confinamento al provino esercitato dalla membrana, il diametro della membrana a riposo deve essere compreso tra 90% e il 95% di quello del campione.

La membrana deve essere sigillata alla base e alla sommità del campione con un O-ring in gomma di diametro interno inferiore al 90% del diametro delle basi, o con qualsiasi altro metodo che produrrà una tenuta adeguata.

Le membrane possono essere testate per eventuali difetti posizionandole intorno a una forma sigillata ad entrambe le estremità con O-ring in gomma, sottoponendoli a una piccola pressione d'aria all'interno e poi immergerli in acqua. Se le bolle d'aria provengono da qualsiasi punto della membrana o se si osservano difetti visibili, la membrana deve essere scartata.

Le pietre porose devono essere di carburo di silicio, ossido di alluminio o altro materiale che non venga corrosa dal campione o dal liquido permeante. Le parti terminali devono avere superfici piane e lisce ed essere prive di crepe, scheggiature e discontinuità. Devono essere controllati regolarmente assicurarsi che non siano ostruite. Esse devono avere lo stesso diametro o larghezza $\pm 5\%$ del provino e lo spessore deve essere sufficiente per evitare rotture.

La conducibilità idraulica delle pietre porose deve essere significativamente maggiore di quella del campione che deve essere testato. I requisiti delineati al § 2.3.2 garantiscono questo criterio.

Se necessario, per prevenire l'intrusione di materiale nei pori delle pietre porose, devono essere posti uno o più fogli di carta da filtro tra le pietre porose e il provino. La carta deve avere un'impedenza idraulica trascurabile. I requisiti delineati al § 2.3.2 assicurarsi che l'impedenza sia piccola.

2.3.5 Attrezzature per preparazione e allestimento del provino in cella

Nel caso di campione compattato, devono essere utilizzate attrezzature (inclusi compattatore e stampo) adatte al metodo di compattazione specificato dal richiedente.

Quando il provino da testare proviene da un campione indisturbato, il campione deve essere solitamente rimosso dal campionatore con estrusione nello stesso verso di prelievo, con minimo disturbo. Se l'estrusione non è verticale, è necessario prestare attenzione per evitare sollecitazioni di flessione dovute alla gravità.

L'attrezzatura specifica per rifilare il provino alle dimensioni desiderate varierà a seconda della qualità e delle caratteristiche del campione. Possono essere utilizzati i seguenti utensili: tornio, sega a filo, con filo di diametro di circa 0,3 mm, spatole, coltelli, ecc.

I dispositivi utilizzati per misurare le dimensioni del provino devono essere in grado di misurare con l'approssimazione di 0,5 mm o migliore e devono essere tali che il loro utilizzo non disturbi il provino.

La bilancia da utilizzare nel caso di provini con massa inferiore a 100 g, deve avere precisione di 0,01 g, quella dei provini con massa tra 100 g e 999 g con precisione di 0,1 g. e quella dei provini con massa pari o superiore a 1000 g con precisione del grammo.

L'attrezzatura per il montaggio del provino nella cella del permeametro deve includere un tendi-membrana cilindrico utile anche per posizionare gli O-ring sulle basi per sigillare la membrana.

2.3.6 Ulteriori strumentazioni

La temperatura del permeametro, del campione di prova e del serbatoio del liquido permeante non dovrebbe variare più di ± 3 °C. Normalmente, ciò si ottiene eseguendo il test in una stanza con una temperatura relativamente costante. Se tale stanza non è disponibile, l'apparecchiatura deve essere posta in un bagno d'acqua, o in una camera isolata o altro dispositivo che mantiene la temperatura entro la tolleranza sopra specificata. La temperatura deve essere periodicamente misurata e registrata.

È infine necessaria una pompa a vuoto per facilitare la disaerazione del permeante liquido (acqua) e saturazione dei campioni, oltre a contenitori per la misura del contenuto d'acqua, un forno che raggiunga una Temperatura di 110 ± 5 °C e dispositivi di misurazione del tempo (orologio a lancette o un cronometro, o entrambi).

2.4 Acqua di permeazione

L'acqua permeante è il liquido utilizzato per permeare il campione di prova ed è anche il liquido utilizzato nella contropressione del campione.

Il tipo di acqua permeante dovrebbe essere specificato dal richiedente. Se non viene fatta alcuna specifica, deve essere utilizzata una delle seguenti: acqua potabile del rubinetto, una soluzione 0,0013 molare di NaCl e 0,0010 molare di CaCl₂, o CaCl₂ 0,01 molare. La soluzione con CaCl₂ è stata storicamente utilizzato in zone con acque estremamente dure o dolci.

Il tipo di acqua utilizzata deve essere indicata nella relazione.

La soluzione NaCl-CaCl₂ può essere preparata sciogliendo 0,76 g di NaCl e 1,11 g di CaCl₂ in 10 litri di acqua deionizzata.

La soluzione 0,01 CaCl₂ può essere preparata sciogliendo 11,1 g di CaCl₂ in 10 litri di acqua deionizzata.

Eventuali interazioni chimiche tra il liquido permeante e il materiale poroso possono portare a variazioni di conducibilità idraulica. L'acqua distillata può abbassare notevolmente la conducibilità idraulica dei terreni argillosi. Per questa ragione, l'acqua distillata non è generalmente raccomandata come liquido permeante.

Per aiutare a rimuovere quanta più aria possibile dal campione di prova, deve essere utilizzata acqua disaerata. Se si utilizza l'ebollizione come metodo di disaerazione, prestare attenzione a non far evaporare una quantità eccessiva di acqua, che può portare a una concentrazione di sale nell'acqua permeante maggiore di quella desiderata. Per evitare che l'aria si dissolva nuovamente nell'acqua, l'acqua disaerata non deve essere esposta all'aria per periodi prolungati.

2.5 Procedure di prova

2.5.1 Preparazione del provino

La maggior parte dei test di conducibilità idraulica vengono eseguiti su provini cilindrici. È possibile comunque utilizzare attrezzature speciali per provini prismatici.

I provini devono avere un diametro minimo di 25 mm e un'altezza minima di 25 mm. L'altezza e il diametro del provino devono essere misurate con tre cifre significative. La lunghezza e il diametro non potranno variare di più del $\pm 5\%$. La superficie del provino può essere irregolare, ma le rientranze non devono essere così profonde da far variare la lunghezza o il diametro più del $\pm 5\%$. Il diametro e l'altezza del campione devono essere almeno 6 volte maggiore della massima dimensione dei grani del provino. Se, al termine della prova, si riscontra sulla base di un'osservazione visiva che sono presenti delle particelle di dimensione eccessiva, tale informazione deve essere indicata sulla scheda dati.

Se è necessario determinare la densità o il peso di volume, va registrato a quattro cifre significative, e l'indice dei vuoti a tre cifre significative; quindi le dimensioni dei provini devono avere quattro cifre significative cioè tipicamente va misurato al 0,01 mm.

Nel caso di campioni di terreno-cemento, miscele cemento-bentonite o terreni che hanno spesso superfici più irregolari, la lunghezza e il diametro può variare non più del $\pm 10\%$.

I provini da campioni indisturbati devono essere preparati da una porzione rappresentativa del campione secondo le procedure descritte in ASTM D1587, D3550, D6151 o D2113. Indicazioni su metodi di perforazione e campionamento sono fornite nello standard ASTM D6169.

I campioni ottenuti mediante carotaggio possono essere testati senza rifilatura eccetto per il taglio delle superfici terminali piane e perpendicolari all'asse longitudinale del campione, a condizione che le caratteristiche del terreno siano tali che dal campionamento non risulti alcun disturbo significativo. Se

l'operazione di campionamento ha causato un disturbo, il materiale disturbato deve essere rimosso. Dove la rimozione di ciottoli o lo sbriciolamento derivante dal taglio provoca vuoti sulla superficie del provino che fanno variare la lunghezza o il diametro di oltre $\pm 5\%$, i vuoti devono essere riempiti con materiale rimodellato ottenuto dalla rifilatura. Le estremità del provino devono essere tagliate e non spatolate. I campioni devono essere rifilati, quando possibile, in un ambiente in cui le variazioni del contenuto di acqua siano ridotte al minimo. A tale scopo viene solitamente utilizzata una stanza controllata ad alta umidità. La massa e le dimensioni del campione di prova devono essere determinate in base alle tolleranze indicate precedentemente. Il provino deve essere montato immediatamente nel permeametro. Deve essere determinato il contenuto di acqua dal materiale di rifilatura, secondo il metodo D2216.

Nel caso di campioni compattati in laboratorio, il materiale da testare deve essere preparato e compattato all'interno di uno stampo secondo le modalità specificate dal richiedente. Se il campione è posizionato e compattato a strati, la superficie di ogni strato precedentemente compattato deve essere leggermente scarificata con una forchetta o altro utensile adatto, a meno che il richiedente specificamente non specifichi che la scarificazione non deve essere eseguita. I metodi di prova ASTM D698 e D1557 descrivono due metodi di compattazione, ma qualsiasi altro metodo specificato dal richiedente può essere utilizzato purché il metodo sia descritto nella relazione. Grandi zolle di materiale non dovrebbero essere frantumate prima della compattazione a meno che non sia noto che saranno rotte anche nella costruzione in sito, o il richiedente specificamente richieda che le dimensioni delle zolle vengano ridotte. Né le zolle dure né le singole particelle del materiale devono superare $1/6$ dell'altezza o del diametro del campione. Dopo la compattazione, il campione di prova deve essere rimosso dallo stampo, le estremità ritagliate e le dimensioni e il peso determinati entro le tolleranze precedentemente specificate.

Dopo aver determinato le dimensioni e la massa, il campione di prova deve essere immediatamente montato nel permeametro. Dopo che l'altezza, il diametro, la massa e il contenuto d'acqua del provino sono stati determinati, deve essere calcolato il peso unitario del secco. Inoltre, deve essere stimato il grado iniziale di saturazione (questa informazione può essere utilizzata successivamente per l'applicazione della contropressione).

Altri metodi di preparazione di un provino sono consentiti se espressamente richiesto. Il metodo di preparazione del campione deve essere identificato nella scheda.

Nel caso in cui sia necessario determinare la conducibilità idraulica orizzontale di un campione, il provino può essere tagliato in modo che il suo asse longitudinale sia perpendicolare all'asse longitudinale del campione. Ottenere un campione con un diametro di 36 mm in genere richiede un campione cilindrico con un diametro uguale o superiore a circa 70 mm o un campione rettangolare con una dimensione minima di circa 40 mm.

2.5.2 Montaggio

Tagliare due fogli di carta da filtro della stessa dimensione e forma della sezione trasversale del provino. Immergere le pietre porose e fogli di carta filtro, se utilizzati, in un contenitore di acqua.

Posizionare la membrana tendi-guaina. Applicare uno strato sottile di grasso al silicone per alto vuoto sui lati delle basi. Posizionare una pietra porosa sulla base del permeametro e posizionare il filtro di carta, se utilizzato, sulla pietra porosa, seguita dal provino. Posizionare il secondo foglio di carta filtro, se utilizzato, sopra il provino, seguito dalla pietra porosa e dalla base superiore.

Posizionare la membrana attorno al provino utilizzando l'espansore della membrana e posizionare uno o più O-ring per sigillare la membrana alla base inferiore e uno o più O-ring per sigillare la membrana alla base superiore.

Collegare il tubo di flusso alla base superiore, assemblare la cella del permeametro e riempirla con acqua disaerata o altro fluido. Collegare il serbatoio della pressione della cella alla linea della cella del permeametro e il sistema idraulico alle linee di ingresso e uscita. Riempire il serbatoio a pressione della cella con acqua disaerata, o altro liquido adatto, e il sistema idraulico con acqua disaerata.

Applicare una piccola pressione di confinamento compresa tra 7 e 35 kPa alla cella e applicare una pressione inferiore alla pressione di confinamento sia al sistema in ingresso che a quello in uscita e far scorrere l'acqua attraverso il sistema di flusso. Dopo che tutta l'aria visibile è stata rimossa dalle linee di flusso, chiudere le valvole di controllo. In nessun momento durante la saturazione del sistema e durante le misurazioni della conducibilità idraulica, la massima pressione efficace applicata deve superare quella a cui deve essere consolidato il provino.

2.5.3 Saturazione

Per favorire la saturazione, i provini possono essere posti sotto vuoto parziale applicato alla parte superiore mantenendo l'acqua a pressione atmosferica alla base, attraverso le linee flusso. L'ampiezza del vuoto va impostata per generare un gradiente idraulico attraverso il provino che sia inferiore a quello che sarà utilizzato durante le misurazioni della conducibilità idraulica.

La saturazione sotto vuoto è applicabile quando ci sono vuoti d'aria nel campione, ad esempio, campioni aventi un grado di saturazione inferiore all'85%.

Per saturare il campione di solito è necessaria una contropressione. La Figura 2 fornisce indicazioni sulla contropressione necessaria per raggiungere la saturazione in funzione del grado di saturazione iniziale del provino e del grado di saturazione finale che si vuole ottenere.

Le relazioni presentate in Figura 2 si basano sul presupposto che l'acqua utilizzata per la contropressione sia disaerata e che l'unica fonte per la dissoluzione dell'aria nell'acqua sia l'aria proveniente dal provino. Se

viene utilizzata aria compressa per controllare la contropressione, l'aria pressurizzata si dissolverà nell'acqua, riducendo così la capacità dell'acqua utilizzata per la contropressione di dissolvere l'aria situata nei pori del provino. Il problema viene ridotto al minimo utilizzando un tubo lungo (> 5 m) che sia impermeabile aria tra l'interfaccia aria-acqua e il provino, o separando l'acqua di contropressione dall'aria mediante un materiale o un fluido relativamente impermeabile all'aria, o sostituendo periodicamente l'acqua di contropressione con acqua disaerata, o con altri mezzi.

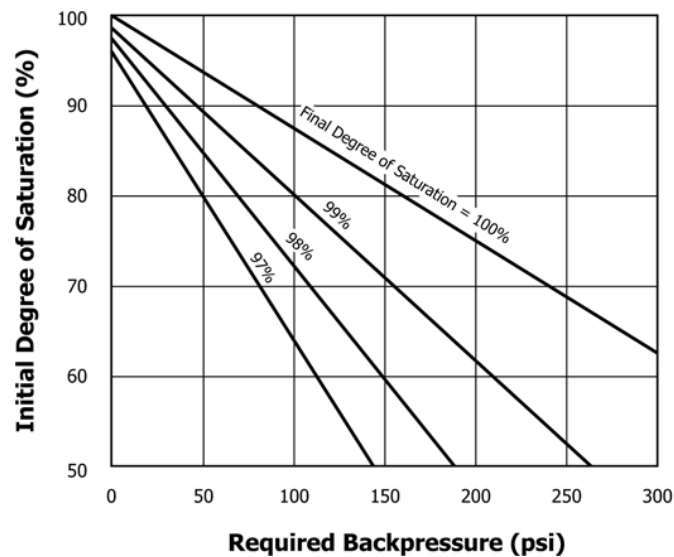


FIGURA 2. Contropressione per raggiungere vari gradi di saturazione

Durante il processo di saturazione, qualsiasi modifica nel volume (rigonfiamento o riduzione dell'indice dei vuoti, densità, ecc.) del provino deve essere ridotto al minimo. La via più facile per verificare che le variazioni di volume siano trascurabili è misurare l'altezza del provino durante l'applicazione della contropressione. Le variazioni di volume sono considerate trascurabili se la variazione risultante nella conducibilità idraulica è inferiore a circa la metà dell'errore accettabile ($\pm 25\%$), a meno che non sia richiesto un controllo più rigoroso sulla densità o sulla conducibilità idraulica, o su entrambi. Affinché ciò si verifichi, la deformazione assiale dovrebbe essere inferiore a circa lo 0,4 % per terreni normalconsolidati, o circa lo 0,1% per i terreni sovraconsolidati.

Effettuare e registrare una lettura iniziale dell'altezza del campione, se monitorato. Aprire le valvole della linea di flusso e far fuoriuscire dal sistema eventuali bolle d'aria libere utilizzando la procedura appena descritta. Se durante la prova deve essere utilizzato un trasduttore di pressione elettronico o un altro dispositivo di misurazione per misurare le pressioni interstiziali o il gradiente idraulico applicato, spurgare l'aria intrappolata dal dispositivo.

Regolare la pressione di confinamento applicata sul valore che deve essere utilizzato durante la saturazione del campione. Applicare la contropressione aumentando simultaneamente la pressione della cella e le pressioni in ingresso e uscita in incrementi. Il valore massimo di un aumento della

contropressione deve essere sufficientemente basso in modo tale che nessun punto del provino sia esposto a una sollecitazione efficace superiore a quella a cui il provino verrà successivamente consolidato. In nessun momento deve essere applicata un carico idraulico tale che la tensione di confinamento effettiva sia < 7 kPa a causa del pericolo di separazione della membrana dal provino. Mantenere ogni incremento di pressione per un periodo compreso tra pochi minuti e alcune ore, a seconda delle caratteristiche del provino. Per facilitare la rimozione dell'aria intrappolata, è possibile applicare un piccolo gradiente idraulico attraverso il campione per indurre il flusso.

La saturazione deve essere verificata con una dei tre seguenti tecniche:

- a) La saturazione può essere verificata misurando il coefficiente B , definito per questo tipo di prova come il rapporto fra la variazione della pressione dell'acqua interstiziale nel materiale poroso e la variazione della pressione totale di confinamento applicata. I materiali comprimibili che sono completamente saturi d'acqua avranno $B = 1$. I materiali relativamente incompressibili, saturi hanno B valori che sono leggermente inferiori a 1. Il provino può essere considerato adeguatamente saturo se $B \geq 0,95$, oppure, per materiali relativamente incompressibili (ad esempio roccia), se B rimane invariato con l'applicazione di valori di contropressione maggiori. Il valore B può essere misurato prima o dopo il completamento della fase di consolidazione. Un accurata determinazione di B può essere effettuata solo se nessun gradiente agisce sul campione e tutta la pressione dell'acqua interstiziale indotta dalla consolidazione si è dissipata.
- b) La saturazione del provino può essere confermata al completamento della prova calcolando il grado di saturazione finale. Il grado di saturazione finale dovrà essere $100\% \pm 5\%$. Tuttavia, la misurazione del coefficiente B come descritto in (a) o l'uso di qualche altra tecnica è fortemente raccomandato perché è preferire confermare la saturazione prima della permeazione piuttosto che attendere la fine della prova per determinare se la prova è valida.
- c) Altri mezzi per verificare la saturazione, come l'osservazione del flusso di acqua nel campione quando la contropressione viene aumentata, possono essere utilizzati per verificare la saturazione purché siano disponibili dati per materiali simili, per stabilire che la procedura utilizzata garantisce la saturazione.

2.5.4 Consolidazione

Il provino deve essere consolidato alla tensione efficace specificata dal richiedente. La consolidazione deve essere realizzata in più fasi, con l'aumento della pressione della cella meno la contropressione (stress efficace) in ogni fase che sia uguale o inferiore alla pressione efficace nella fase precedente.

Il provino può essere consolidato prima dell'applicazione della contropressione. Inoltre, la contropressione e le fasi di consolidazione possono essere completate contemporaneamente se le contropressioni vengono applicate sufficientemente lentamente per ridurre il rischio di sovraconsolidazione del provino.

Se monitorata, l'altezza del campione va registrata periodicamente durante la consolidazione.

Aumentare la pressione della cella al livello necessario per ottenere la tensione efficace desiderata e iniziare la consolidazione. Il drenaggio può essere consentito dalla base o dalla parte superiore del campione, o simultaneamente da entrambe le estremità.

Registrare i volumi di flusso in uscita per confermare che la consolidazione primaria sia completata prima dell'inizio della prova di conducibilità idraulica. In alternativa, è possibile utilizzare le misurazioni della variazione di altezza del provino per confermare il completamento della consolidazione. La procedura appena descritta è facoltativa perché i requisiti descritti per la fase di permeazione assicurano che il campione di prova sia adeguatamente consolidato durante la permeazione perché, se così non fosse, i volumi di flusso in entrata e in uscita saranno diversi in modo significativo. Si consiglia comunque di registrare i volumi di flusso in uscita o le variazioni di altezza come mezzo per verificare il completamento della consolidazione prima dell'inizio della permeazione. Inoltre, le misurazioni della variazione di altezza del provino, insieme alla conoscenza dell'altezza iniziale, forniscono un mezzo per controllare l'altezza finale del provino.

2.5.5 Permeazione e criteri di termine prova

Gradiente idraulico. Quando possibile, il gradiente idraulico ($i = \Delta h/L$) utilizzato per le misurazioni della conducibilità idraulica dovrebbe essere simile a quello che ci si aspetta in sito. In generale, i gradienti idraulici da <1 a 5 coprono la maggior parte delle condizioni in sito. Tuttavia, l'uso di piccoli gradienti idraulici può portare a tempi di prova molto lunghi per materiali con bassa conducibilità idraulica (inferiore a circa 1×10^{-8} m/s). Gradienti idraulici più grandi vengono solitamente utilizzati in laboratorio per accelerare i test, ma è necessario evitare gradienti eccessivi perché elevate pressioni di infiltrazione possono consolidare il materiale, e/o del materiale può essere eroso dal provino e le particelle fini possono occludere le pietre porose in uscita. Questi effetti potrebbero aumentare o diminuire la conducibilità idraulica misurata. Se nessun gradiente viene specificato dal richiedente, dovrebbero essere seguite le indicazioni in Tabella 1.

TABELLA 1. Valori del gradiente idraulico da utilizzare

<i>Conducibilità idraulica (m/s)</i>	<i>massimo gradiente idraulico</i>
<i>da 1×10^{-5} a 1×10^{-6}</i>	<i>2</i>
<i>da 1×10^{-6} a 1×10^{-7}</i>	<i>5</i>
<i>da 1×10^{-7} a 1×10^{-8}</i>	<i>10</i>
<i>da 1×10^{-8} a 1×10^{-9}</i>	<i>20</i>
<i>< 1×10^{-9}</i>	<i>30</i>

Può essere utilizzato un gradiente maggiore di quello specificato in Tabella 1 se si può dimostrare che non modifica la conducibilità idraulica.

Per avviare la permeazione del provino si deve aumentare la pressione in ingresso. La pressione dell'effluente non deve essere ridotta perché le bolle d'aria che sono state disciolte nell'acqua interstiziale

durante la contropressione possono fuoriuscire dalla soluzione se la pressione viene ridotta. La contropressione deve essere mantenuta per tutta la fase di permeazione.

L'aumento massimo della pressione dell'acqua in ingresso non può superare il 95% della pressione efficace di consolidazione. In alternativa, la differenza tra la pressione della cella e la pressione dell'acqua in ingresso non può essere inferiore al 5% della pressione efficace di consolidazione.

All'inizio e alla fine di ogni fase di permeazione (t_1 e t_2), leggere e registrare la temperatura di prova con precisione di 0,1 °C.

Si deve misurare e registrare il tempo all'inizio e alla fine di ciascuna fase di permeazione (o il suo intervallo) a due o più cifre significative. Questo intervallo di tempo deve essere maggiore di 9 s, a meno che il tempo non sia registrato con precisione di 0,1 s.

Prova a carico costante (a). Misurare e registrare la perdita di carico richiesta attraverso le tolleranze e le cifre significative indicate al § 2.3 all'inizio e alla fine di ogni fase di permeazione. La perdita di carico attraverso il permeametro deve essere costante $\pm 5\%$. Misurare e registrare periodicamente la quantità di afflusso e la quantità di deflusso fino a un minimo di tre cifre significative. Misurare e registrare anche eventuali cambiamenti di altezza del provino, se monitorato. Continuare la permeazione fino a ottenere almeno quattro valori di conducibilità idraulica in un intervallo di tempo in cui: (1) il rapporto tra il flusso in uscita e quello in entrata è compreso tra 0,75 e 1,25 e (2) la conducibilità idraulica è stabile. La conducibilità idraulica può essere considerata stabile se quattro o più determinazioni consecutive sono entro $\pm 25\%$ del valore medio per $k \geq 1 \times 10^{-10}$ m/s o entro $\pm 50\%$ per $k < 1 \times 10^{-10}$ m/s e se la conducibilità idraulica rispetto al tempo non risulta crescente o decrescente.

Prova a carico variabile (b). Misurare e registrare la perdita di carico richiesta attraverso il permeametro nelle tolleranze e cifre significative indicate in 2.3. Misurare e registrare queste perdite di carico all'inizio e alla fine di ogni fase di permeazione. In nessun momento la perdita di carico applicata sul provino deve essere inferiore al 75% del valore iniziale (massimo) di perdita di carico durante la determinazione della conducibilità idraulica. Il requisito che la perdita di carico non diminuisca molto ha lo scopo di evitare che le pressioni efficaci cambino troppo. Per provini molto comprimibili, potrebbero essere necessari criteri ancora più restrittivi. Inoltre, quando le perdite di carico iniziale e finale sul provino non differiscono di molto, è necessaria una grande precisione per soddisfare il requisito che il rapporto tra la perdita di carico iniziale e quella finale sia determinato con una precisione di $\pm 5\%$ o migliore. Quando la perdita di carico iniziale e finale in un intervallo di tempo non differiscono molto, può essere possibile soddisfare i requisiti per una prova a carico costante in cui la perdita di carico non deve differire di oltre $\pm 5\%$ e per trattare il test come una prova a carico costante.

All'inizio e alla fine di ogni fase di permeazione, misurare e registrare qualsiasi variazione dell'altezza del campione, se monitorato. È molto probabile che la perdita di carico iniziale in ciascuna fase di permeazione debba essere reimpostata allo stesso valore ($\pm 5\%$) utilizzato nella prima fase. Inoltre, il "criterio del 75%" di cui sopra deve essere strettamente rispettato.

In entrambi i metodi (a) e (b) i volumi in ingresso e in uscita dal provino devono essere misurati e registrati a tre cifre significative (l'ultima cifra può essere dovuta a una stima). Misurare e registrare questi volumi all'inizio e alla fine di ogni fase di permeazione. Continuare la permeazione fino a ottenere almeno quattro valori di conducibilità idraulica in un intervallo di tempo in cui: il rapporto tra la portata in uscita e in entrata è compreso tra 0,75 e 1,25 e la conducibilità idraulica è stabile (vedi (a)).

Prova a flusso costante (c). Iniziare la permeazione del campione imponendo una portata costante. Scegliere la portata in modo che il gradiente idraulico non superi il valore specificato in Tabella 1. Misurare periodicamente la velocità di afflusso, la velocità di deflusso e la perdita di carico attraverso il campione di prova secondo le tolleranze e le cifre significative fornite al § 2.3. Inoltre, misurare e registrare eventuali cambiamenti nell'altezza del provino, se monitorati. Continuare la permeazione fino a quando non si ottengono almeno quattro valori di conducibilità idraulica in un intervallo di tempo in cui il rapporto tra le portate in entrata e in uscita è compreso tra 0,75 e 1,25 e la conducibilità idraulica è stabile (vedi (a)).

2.5.6 Smontaggio

Dopo il completamento della permeazione, ridurre le pressioni di confinamento in cella, nella linea di ingresso e in quella di uscita in modo tale da non generare una variazione di volume significativa del provino. Quindi smontare con attenzione la cella del permeametro e rimuovere il provino.

Misurare e registrare l'altezza finale, il diametro e la massa totale del provino. Quindi determinare il contenuto d'acqua finale del campione con la procedura del metodo ASTM D2216. Le dimensioni e la massa del provino deve essere misurata in base alle tolleranze specificato al § 2.5.1.

Il campione può rigonfiare dopo la rimozione della contropressione a causa della fuoriuscita di aria dall'acqua interstiziale. È possibile apportare una correzione per questo effetto, a condizione che durante la prova vengano monitorate le variazioni dell'altezza del provino. La deformazione causata dallo smantellamento della cella viene calcolata dalla lunghezza del campione prima e dopo lo smantellamento della cella. Si presume che la stessa deformazione si abbia anche per il diametro. Il diametro corretto e la lunghezza effettiva prima della rimozione della contropressione vengono utilizzati per calcolare il volume del provino prima di smantellare la cella. Il volume prima dello smontaggio della cella viene utilizzato per determinare la densità secca finale e il grado di saturazione finale.

2.6 Elaborazione dei risultati

2.6.1 Prova a carico costante e prova a flusso costante

La conducibilità idraulica, k , viene calcolata come segue:

$$k = \frac{\Delta Q \cdot L}{A \cdot \Delta h \cdot \Delta t} \quad (1)$$

con:

k = conducibilità idraulica [m/s],

ΔQ = quantità di flusso per un dato intervallo di tempo Δt , preso come media del volume di afflusso e deflusso [m^3],

L = lunghezza del campione [m],

A = area della sezione trasversale del provino [m^2],

Δt = intervallo di tempo [s], nel quale si verifica il flusso ΔQ ($t_2 - t_1$),

t_1 = tempo all'inizio della prova di permeazione: ore, minuti, secondi,

t_2 = tempo alla fine della prova di permeazione: ore, minuti, secondi,

Δh = perdita di carico media attraverso il provino $((\Delta h_1 + \Delta h_2)/2)$, m di acqua,

Δh_1 = perdita di carico attraverso il provino al tempo t_1 , m di acqua,

Δh_2 = perdita di carico attraverso il permeometro/campione al tempo t_2 , m di acqua

2.6.2 Prova a carico variabile

Se la pressione in uscita è costante, la conducibilità idraulica, k , si calcola come segue:

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \ln \left(\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} \right) \quad (2)$$

con:

a = area della sezione trasversale del serbatoio contenente il liquido influente (m^2),

\ln = logaritmo naturale.

Se la pressione in uscita è crescente, la conducibilità idraulica, k , si calcola come segue:

$$k = \frac{a_{in} \cdot a_{out} \cdot L}{(a_{in} + a_{out}) \cdot A \cdot \Delta t} \ln \left(\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} \right) \quad (3)$$

dove:

a_{in} = area della sezione trasversale del serbatoio contenente il liquido influente (m^2),

a_{out} = area della sezione trasversale del serbatoio contenente il liquido deflusso (m^2).

Nel caso in cui $a_{out} = a_{in}$, l'equazione per il calcolo di k per una prova a carico variabile con un aumento del livello in uscita è:

$$k = \frac{a \cdot L}{2 \cdot A \cdot \Delta t} \ln \left(\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} \right) \quad (4)$$

dove:

a = area delle burette di ingresso e di uscita (m^2).

2.6.3 Correzione per la temperatura

Si corregga la conducibilità idraulica a 20 °C, k_{20} , moltiplicando il valore di k per il rapporto della viscosità dell'acqua alla temperatura di prova con la viscosità dell'acqua a 20 °C, R_T :

$$k_{20} = R_T \cdot k \quad (5)$$

con:

$$R_T = 2.2902 (0.9842^T) / T^{0.1702} \quad (6)$$

dove:

k_{20} = conducibilità idraulica corretta a 20°C, m/s

R_T = rapporto tra la viscosità dell'acqua alla temperatura di prova e la viscosità dell'acqua a 20 °C

T = temperatura media durante ciascuna fase di permeazione = $(T_1 + T_2)/2$, con l'approssimazione di 0,1°C

T_1 = temperatura di prova all'inizio di ogni fase di permeazione,

T_2 = temperatura di prova alla fine di ogni fase di permeazione.

L'equazione per il calcolo di R_T è accurata solo per tre cifre significative tra 5°C e 50°C. Se il numero di cifre significative nel calcolo di k a 20 °C può essere uno, allora la temperatura di prova può essere misurata con l'approssimazione di 1°C.

2.7 Rapporto dati di prova

Nel rapporto di prova vanno indicate almeno le seguenti informazioni generali, oltre al nome di chi esegue la prova.

Qualsiasi processo speciale di selezione e preparazione, come ad esempio rimozione di ghiaia o altri materiali o identificazione della loro presenza.

Se il campione viene ricostituito, rimodellato o tagliato in modo speciale (ad esempio per determinare la conducibilità idraulica orizzontale), fornire informazioni sul metodo di ricostituzione, rimodellamento, ecc.

Registrare come minimo i seguenti dati del provino:

- Peso specifico dei grani,
- massa iniziale, dimensioni (lunghezza e diametro), area e volume, a tre o quattro cifre significative,
- contenuto di acqua iniziale (più vicino allo 0,1 %),
- peso di volume del secco iniziale (tre o quattro cifre significative,
- grado di saturazione iniziale (unità %),
- massa finale, dimensioni (lunghezza e diametro), area e volume del campione, a tre o quattro cifre significative,
- contenuto di acqua finale (più vicino allo 0,1 %),
- peso di volume del secco finale (tre o quattro cifre significative, vedere 8.1.1)
- grado di saturazione finale (unità %).

Riportare almeno le seguenti condizioni di prova:

- Il tipo di liquido permeante utilizzato
- L'entità della contropressione (due cifre significative o tre per la determinazione della perdita di carico)
- Tensione efficace di consolidazione (due o più cifre significative).
- L'area dei tubi dell'acqua in ingresso e in uscita (come burette, serbatoi, manometri a tubo a u, ecc.), a seconda dei casi (tre o più cifre significative)
- La lunghezza (L) e l'area (A) del provino durante la permeazione (minimo tre cifre significative).

Questi valori possono essere determinati in base alle dimensioni iniziali del provino più qualsiasi variazione di altezza e volume che si verificano durante la saturazione e la consolidazione, oppure in base alle dimensioni finali del provino.

Riguardo le fasi di permeazione è necessario riportare quanto meno:

- la data e l'ora, la temperatura, le letture delle perdite di carico, le letture del flusso e le deformazioni all'inizio e alla fine di ogni fase.
- Le misurazioni ed eventuali medie calcolate utilizzando le misurazioni/letture devono avere due o cifre più significative. Per il calcolo del gradiente idraulico iniziale e finale, se si utilizza il metodo a carico variabile si utilizzano due o più cifre significative.
- La conducibilità idraulica media corretta (k_{20}) a due o tre cifre significative in unità di m/s.
- Un grafico o una tabella della conducibilità idraulica rispetto a tempo o rispetto ai pore volumes, meno che venga utilizzato un sistema idraulico a volume costante.

3. PROVE DI PERMEAZIONE CON SOLUZIONI ACQUOSE

3.1 Introduzione e finalità della prova

Questo metodo di prova ha lo scopo di ricavare la conducibilità idraulica di terreni saturi in laboratorio con soluzioni acquose che possono alterare la stessa conducibilità idraulica (ad esempio, liquidi correlati ai rifiuti) utilizzando un permeometro a parete flessibile. Viene eseguita una prova di conducibilità idraulica fino a quando non si raggiunge l'equilibrio idraulico e chimico in modo tale che siano prese in considerazione le potenziali interazioni tra il campione di terreno che viene permeato, e la soluzione acquosa rispetto alla conducibilità idraulica misurata. Questo metodo di prova è applicabile ai terreni con conducibilità idraulica inferiori a 1×10^{-8} m/s.

Oltre alla conducibilità idraulica, può essere determinata la permeabilità intrinseca per un terreno se la densità e la viscosità della soluzione acquosa sono note o possono essere determinate.

Questo metodo di prova può essere utilizzato per tutti i tipi di campioni, compresi campioni indisturbati, ricostituiti, o compattati.

Un campione può essere saturato e permeato usando tre metodi. Il primo metodo (1) è la saturazione con acqua e la permeazione con soluzione acquosa. Il secondo metodo (2) è la saturazione e la permeazione con una soluzione acquosa. Il metodo (3) è la saturazione con acqua, la permeazione iniziale con acqua e la successiva permeazione con soluzione acquosa.

La quantità di flusso attraverso un campione in risposta a un gradiente idraulico generato attraverso il provino viene misurata rispetto al tempo. La quantità e le proprietà dei liquidi influenti ed effluenti vengono monitorate durante il test.

La conducibilità idraulica con una soluzione acquosa è determinata utilizzando procedure simili alla determinazione della conducibilità idraulica di terreni saturi con acqua (§ 2). È possibile utilizzare diverse procedure di prova, tra cui la prova a carico costante, a carico variabile o a velocità di flusso costante, già descritte al § 2.

Questo metodo di prova viene utilizzato per misurare il flusso monodimensionale di soluzioni acquose (ad esempio percolati di discariche, rifiuti liquidi e sottoprodotti, prodotti chimici singoli e misti, ecc., da qui in avanti denominato liquido permeante) attraverso terreni inizialmente saturi sotto un gradiente idraulico e una pressione efficace.

Le interazioni tra alcuni liquidi permeanti e alcuni terreni argillosi hanno portato ad aumenti significativi della conducibilità idraulica dei terreni rispetto alla conducibilità idraulica degli stessi terreni permeati con acqua. Questo metodo di prova viene utilizzato per valutare la presenza e l'effetto delle potenziali interazioni, tra il campione di terreno che viene permeato e il liquido permeante, sulla conducibilità idraulica del campione di terreno. I programmi di prova possono includere confronti tra la conduttività idraulica di terreni permeati di

acqua rispetto alla conducibilità idraulica degli stessi suoli permeati di soluzioni acquose per determinare le variazioni della conducibilità idraulica nei terreni dovute alle soluzioni acquose.

Viene utilizzata la prova di conducibilità idraulica con un permeametro a parete flessibile per determinare le caratteristiche di flusso delle soluzioni acquose attraverso i terreni. I test di conducibilità idraulica che utilizzano permeametri a parete flessibile sono generalmente preferiti rispetto a celle a parete rigida per test con soluzioni acquose a causa di potenziali problemi di filtrazione laterale che si possono avere nel caso di permeametri a parete rigida. Si può verificare un'eccessiva perdita nella parete laterale, ad esempio, quando un terreno di prova si ritira durante la permeazione con il liquido permeante a causa delle interazioni tra il terreno e il liquido permeante in una cella a parete rigida. Inoltre, l'uso di una cella a parete rigida non consente il controllo delle pressioni effettive presenti nel provino.

Si precisa che le condizioni di flusso laminare e, quindi, la legge di Darcy, potrebbero non essere valide in determinate condizioni di prova. Ad esempio, le interazioni tra un liquido permeante e un terreno possono causare fessurazioni del terreno in modo tale che il flusso laminare non viene mantenuto attraverso il campione.

Possono verificarsi interazioni tali da ostruire i pori nei terreni di prova (e.g. precipitazione) durante la permeazione con alcuni liquidi permeanti. In questi casi, il flusso attraverso i terreni di prova può essere fortemente limitato. Nei casi in cui la conducibilità idraulica misurata è inferiore a 1×10^{-12} m/s, l'analisi dello stato instabile può essere utilizzato per determinare la conducibilità idraulica dei terreni di prova.

Campioni di terreni inizialmente saturi d'acqua (per esempio, terreni naturali indisturbati) possono essere permeati con il liquido permeante. Campioni di terreni insaturi (ad esempio, terreni compattati) possono essere completamente saturati con acqua o con il liquido permeante e quindi permeati con il liquido permeante. I campioni di terreno inizialmente, parzialmente o completamente saturati con un liquido particolare (ad esempio, campioni raccolti da una struttura di contenimento dopo un periodo di utilizzo) possono essere completamente saturati e quindi permeati con lo stesso o con un altro liquido. L'uso di diversi liquidi saturanti e permeanti può avere effetti significativi sia sui risultati che sull'interpretazione dei risultati di una prova. La selezione del tipo e della sequenza di liquidi per la saturazione e la permeazione dei campioni di prova si basa sulle caratteristiche dei campioni e sui requisiti dell'applicazione specifica per la quale la prova di conducibilità idraulica viene condotta. L'utente è responsabile della selezione e della specifica delle condizioni di saturazione e permeazione che meglio rappresentano l'applicazione prevista.

La conducibilità idraulica di un terreno con acqua e soluzioni acquose, può essere determinata utilizzando due approcci di test per il confronto tra la conducibilità idraulica basata sulla permeazione con acqua e la conducibilità idraulica basata sulla permeazione con soluzione acquosa. Nel primo approccio, i campioni vengono inizialmente saturati (se necessario) e permeati con acqua, quindi il liquido permeante viene cambiato con soluzioni acquose. Questa sequenza di test consente la determinazione delle conducibilità idrauliche sia dell'acqua che della soluzione acquosa sullo stesso provino. L'ottenimento di risultati con acqua e soluzioni acquose sullo stesso campione riduce le incertezze associate alla preparazione del campione, alla manipolazione e alle variazioni delle condizioni di prova. Tuttavia, tali sequenze di test

potrebbero non rappresentare le condizioni effettive in sito e potrebbero influenzare i risultati del test. Nel secondo approccio, due campioni dello stesso terreno sono permeati, uno dei quali è permeato con acqua e l'altro è permeato con la soluzione acquosa. I campioni vengono preparati utilizzando gli stessi metodi di preparazione e testati nelle stesse condizioni di prova. Questo approccio può rappresentare le condizioni effettive sul campo meglio del primo approccio, tuttavia, possono sorgere incertezze, a causa dell'uso di campioni distinti, per determinare le conducibilità idraulica in base alla permeazione con l'acqua e la soluzione acquosa.

I criteri di risoluzione utilizzati nel metodo di prova si basano sul raggiungimento delle condizioni di stato stazionario rispetto al flusso e all'equilibrio tra la composizione chimica del liquido effluente rispetto al liquido in ingresso.

La correlazione tra i risultati ottenuti utilizzando questo metodo e la conducibilità idraulica in sito non è stata completamente determinata. Possono esistere differenze tra la conducibilità idraulica misurata su piccoli campioni di prova in laboratorio e quelle ottenute per volumi maggiori in sito. Pertanto, i risultati ottenuti utilizzando questa metodologia di prova devono essere applicati alle situazioni reali con cautela e da personale qualificato.

Sebbene non siano necessarie per la determinazione della conducibilità idraulica dei terreni con soluzioni acquose, le proprietà chimiche del suolo come il pH, la conducibilità elettrica, i metalli scambiabili (cationi) e la capacità di scambio cationico nonché la composizione mineralogica del terreno, possono essere utili per l'interpretazione e la spiegazione dei risultati del test.

3.2 Apparato, procedure di allestimento ed esecuzione della prova

Lo schema dei vari componenti di un sistema di misura è riportato in Fig. 3 e Fig. 4. La compatibilità di tutti i componenti che entrano in contatto con il liquido permeante deve essere determinata prima della prova. Ciò si applica non solo all'apparecchiatura di prova o alle apparecchiature periferiche utilizzate per misurare la conducibilità idraulica, ma anche alle apparecchiature ausiliarie utilizzate per determinare sia le proprietà chimiche del liquido permeante (densità, pH, ecc.) che le proprietà fisiche dei provini (dimensioni, contenuto di umidità, ecc.). La determinazione della compatibilità è particolarmente importante se in un test vengono utilizzate soluzioni acquose che contengono più del 50% di liquidi organici miscibili.

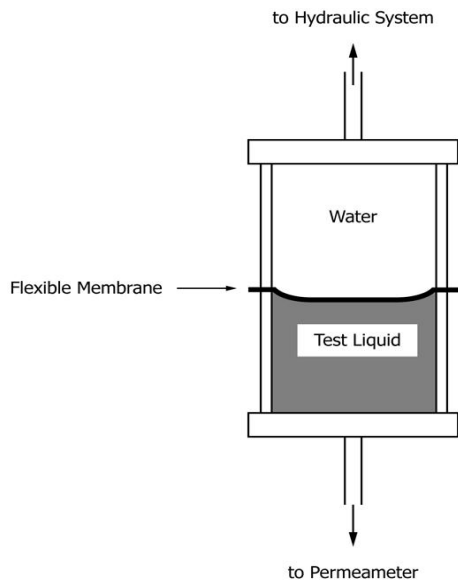


FIGURA 3. Dispositivo per prove di permeazione con soluzioni acquose (accumulatore a vescica)

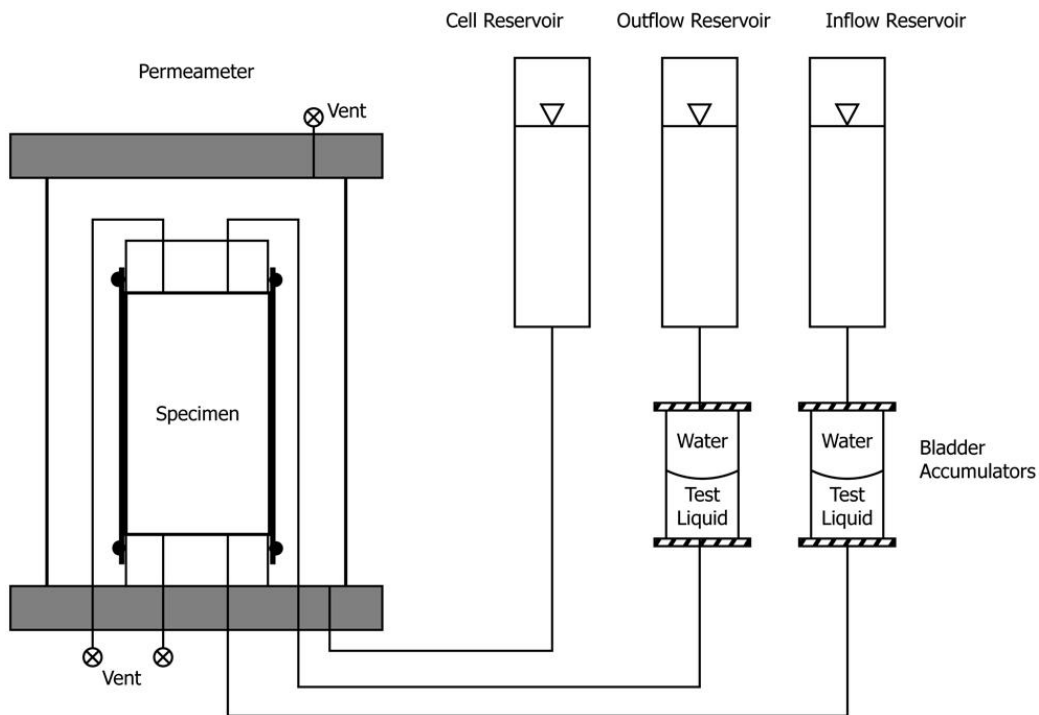


FIGURA 4. Schema del sistema per prove di permeazione con soluzioni acquose

La Fig. 3 riporta il dispositivo di interfaccia permeante, denominato anche accumulatore a vescica. Il dispositivo è diviso in due camere. Una camera contiene acqua ed è collegata a sistemi idraulici e di misurazione del flusso. L'altra camera contiene il liquido permeante ed è collegata alla cella del permeametro e quindi al campione. Le camere sono separate da una membrana flessibile e resistente chimicamente. La pressione applicata all'acqua viene completamente trasferita al liquido permeante nella camera adiacente attraverso la membrana. Le linee di drenaggio e/o le porte di campionamento sono

incluse nella progettazione dei dispositivi di interfaccia per il riempimento o il drenaggio rapido e anche per il campionamento del liquido permeabile durante la permeazione. Il dispositivo di interfaccia permeante deve impedire il rilascio del liquido permeante nell'ambiente circostante e deve anche impedire il contatto del liquido permeante con il sistema idraulico e il sistema di misurazione del flusso. Devono essere utilizzati dispositivi di interfaccia permeante quando il liquido di prova è pericoloso o volatile. I dispositivi di interfaccia permeante, possono essere utilizzati anche per liquidi permeanti non pericolosi. L'uso di accumulatori a vescica riduce al minimo la necessità di procedure di pulizia dei sistemi idraulici e di misurazione del flusso. Sono necessari due accumulatori a vescica, uno collegato alla linea di ingresso e l'altro alla linea di uscita.

Il dispositivo di interfaccia permeante deve essere costruito in acciaio inossidabile resistente al liquido permeante. Tutti i raccordi ed i tubi devono essere costruiti con materiali resistenti al liquido permeante. Il teflon può essere utilizzato per i tubi che vengono a contatto con il liquido permeante. La camera d'aria deve essere costruita con un materiale flessibile e chimicamente resistente. Materiali come il viton o il nitrile sono comunemente usati per la vescica, ma possono essere usati anche altri materiali che sono resistenti al liquido permeante. Deve essere verificata la compatibilità a lungo termine di tutti i componenti con i liquidi di prova.

La membrana dell'accumulatore deve essere attentamente ispezionata prima dell'uso e deve essere eliminata se si osservano difetti come fori. Il dispositivo deve essere controllato per rilevare eventuali perdite alla massima pressione di prova prevista prima della prova, riempiendone una delle camere con acqua e l'altra camera con acqua colorata. Il dispositivo deve essere collegato alla cella del permeametro per questa verifica. Qualsiasi miscelazione dell'acqua limpida con l'acqua colorata indica perdite attraverso la vescica. Inoltre, le linee di pressione e i raccordi intorno all'interfaccia della vescica devono essere ispezionati per eventuali perdite.

Per quanto riguarda i metodi di prova, il sistema idraulico, il sistema di applicazione delle pressioni (e contropressione), la preparazione e l'allestimento del provino nel permeametro e le procedure di prova, le procedure sono le stesse già descritte al Cap. 2. Si riportano di seguito le ulteriori indicazioni e raccomandazioni per le prove con soluzioni acquose.

Per quanto riguarda la membrana che avvolge il provino, oltre a quanto riportato per le prove in acqua, essa deve essere compatibile con il liquido permeante. In letteratura sono state riportate interazioni avverse tra membrane in lattice di uso comune e liquidi di prova organici. Quando le membrane specificamente compatibili non siano disponibili, il campione può essere avvolto in un foglio, pellicola o nastro sottile e flessibile di materiale chimicamente resistente e compatibile, come il teflon, prima di essere rivestito da una membrana flessibile. In alcuni casi potrebbero essere necessari più strati di rivestimento.

Il liquido permeante può essere ottenuto da varie fonti e può avere varie caratteristiche. I campionatori e i contenitori per i liquidi permeanti devono essere selezionati in base alla provenienza del liquido permeante (ad esempio, percolato di discarica, campione di acque sotterranee, ecc.) e alle caratteristiche del liquido permeante (non pericoloso o pericoloso).

Il liquido permeante deve essere trasportato, manipolato e immagazzinato conformemente ai requisiti basati sulla sua origine e caratteristiche. Inoltre, il liquido permeante deve essere conservato e manipolato in modo tale che le caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche del liquido non vengano alterate durante l'intera durata di un programma di prova.

Per tutti i liquidi permeanti devono essere determinati quanto meno la composizione chimica e il pH. La conducibilità elettrica deve essere determinata per le sostanze inorganiche e la costante dielettrica deve essere determinata per le sostanze organiche. Se necessario, determinare anche la densità e la viscosità del liquido permeante.

Alcuni liquidi di prova possono essere pericolosi ed avere gravi effetti sulla salute. Questi liquidi possono comportare rischi per la salute in caso di inalazione o contatto con la pelle. Gli effetti possono essere molteplici.

Oltre ad altre precauzioni per liquidi pericolosi (che possono essere esplosivi, tossici, corrosivi e o reattivi), i liquidi pericolosi devono essere conservati in contenitori infrangibili sigillati per controllare l'evaporazione in un'area ben ventilata o sotto una cappa aspirante. Gli accumulatori a vescica devono essere assemblati e riempiti con liquidi permeabili pericolosi in un'area ben ventilata o sotto una cappa aspirante. Guanti di gomma devono essere sempre usati quando si contattano liquidi pericolosi. Le perdite devono essere pulite immediatamente utilizzando una procedura consigliata esplicitamente per il particolare liquido di prova. Liquidi permeabili in eccesso o eventuali rifiuti contaminati con un liquido permeante devono essere smaltiti in modo sicuro e rispettoso dell'ambiente.

Si tenga presente che alcuni campioni di prova possono contenere costituenti o liquidi nei pori che possono provocare gravi effetti sulla salute. I campioni originariamente non pericolosi possono diventare pericolosi a causa della permeazione con un liquido permeante pericoloso. I campioni pericolosi devono essere preparati e montati in un permeometro prima di una prova di conducibilità idraulica e smontato dal permeometro dopo una prova di conducibilità idraulica in un'area ben ventilata o sotto una cappa aspirante. Guanti di gomma devono essere sempre usati quando si contattano campioni pericolosi.

Nella misura del contenuto d'acqua, gli effetti del riscaldamento e l'intervallo di temperature utilizzate devono essere determinati prima di determinare il contenuto di umidità di tali campioni mediante essiccazione in forno.

Le perdite di carico eccessive nei tubi, nelle valvole, nei pezzi terminali porosi e nella carta del filtro possono causare errori nelle misurazioni nei test. Le perdite di carico sono influenzate dalla viscosità del liquido permeante. Le perdite di carico devono essere determinate utilizzando il liquido permeante effettivo che verrà utilizzato nel programma di prova. Per i programmi di prova con più di un liquido permeante (ad esempio, studi comparativi), possono essere utilizzati due approcci. Nel primo approccio, le perdite di carico vengono misurate con una singola determinazione utilizzando il liquido permeante con la più alta viscosità nel programma di prova. Questo approccio è conservativo e fornirà le più alte perdite di carico nel sistema e quindi verificherà l'efficacia del sistema di misurazione del flusso rispetto al liquido a più alta viscosità così

come a tutti gli altri liquidi con viscosità inferiore. Nel secondo approccio, vengono determinate le perdite di carico per tutti i liquidi permeanti da utilizzare in un programma di prova. Il secondo approccio deve essere utilizzato quando la viscosità dei liquidi permeanti non è nota in un programma di prova di compatibilità idraulica. Il permeametro deve essere assemblato senza un campione e quindi un liquido permeante deve essere fatto passare attraverso il sistema per determinare le perdite di carico nel sistema (assicurarsi di includere il dispositivo di interfaccia permeante quando il dispositivo deve essere utilizzato in un programma di test). Devono essere applicate le pressioni/prevalenze idrauliche che saranno usate per provare un provino e la portata deve essere misurata entro una precisione del $\pm 5\%$. Questa velocità di flusso deve essere almeno dieci volte maggiore della velocità di flusso misurata quando un campione viene posizionato all'interno del permeametro e vengono applicate le stesse pressioni o prevalenze idrauliche.

Per liquidi permeanti non pericolosi, si può riempire direttamente una delle camere del dispositivo di interfaccia permeante con il liquido permeante e l'altra camera con acqua e collegare il dispositivo alla linea di ingresso del permeametro. Ripetere la stessa procedura per il secondo dispositivo e collegare il dispositivo alla linea di uscita del permeametro. Per liquidi permeabili pericolosi, il riempimento del dispositivo con il liquido permeante va fatto sotto una cappa o in ambiente ben aerato. Per i liquidi permeabili volatili, i liquidi possono essere iniettati nella camera del dispositivo mentre nella camera può essere mantenuta una pressione uguale alla tensione di vapore del liquido (se nota o determinata). Assicurarsi che entrambe le camere siano completamente riempite con i liquidi senza lasciare spazio per aria o gas sopra i liquidi. Mantenere gli accumulatori a vescica almeno pieni a metà per evitare uno stiramento eccessivo della membrana durante un test.

Se la prova di permeazione viene eseguita direttamente con la soluzione acquosa, le pietre porose e i dischi di carta filtro vanno immersi in un contenitore con il liquido permeante. Se il campione è inizialmente saturo di acqua e sarà immediatamente permeato con il liquido permeante, immergere la pietra porosa in ingresso e la carta filtro nel liquido permeante e la pietra porosa e la carta filtro della sezione di uscita in acqua. Se il liquido di prova è volatile, assicurarsi che la composizione del liquido non cambi mentre le pietre porose e la carta del filtro sono immerse nel liquido.

Per quanto riguarda la pressione efficace, occorre prendere in considerazione l'utilizzo di valori più bassi nei casi in cui il terreno di prova sarà sottoposto a tensioni efficaci variabili nel campo. Elevate pressioni efficaci possono nascondere la gravità delle interazioni tra il provino e il liquido permeante (ad esempio, elevate sollecitazioni di confinamento possono impedire il pieno sviluppo di fessure nel terreno di prova a causa delle interazioni con un liquido permeante).

L'acqua viene utilizzata per la fase di consolidazione per i metodi 1 e 3 e il liquido permeante viene utilizzato nella fase di consolidamento per il metodo 2. Le procedure per la consolidazione sono essenzialmente le stesse per tutti e tre i metodi.

Per saturare il campione, di solito è necessaria l'applicazione della contropressione. Le relazioni riportate in Fig. 2 si presume che siano generalmente applicabili alle soluzioni acquose che vengono utilizzate come liquidi permeanti.

Le procedure per la saturazione con contropressione sono essenzialmente le stesse per tutti i tre metodi. La saturazione con il liquido di prova non deve essere condotta se il liquido di prova provoca una rapida ed eccessiva variazione di volume nel campione quando si utilizza il metodo 2. In questi casi, il campione deve essere saturato con acqua (anche se ciò potrebbe non rappresentare le condizioni a cui sarà esposto il campione) e quindi permeato con il liquido di prova. Eventuali modifiche alla sequenza di prova prevista, devono essere incluse nel rapporto di prova.

I dati pubblicati possono essere consultati per stimare i potenziali effetti di un liquido permeante su un terreno di prova. Inoltre, attraverso i limiti di Atterberg, o rigonfiamento, possono essere condotte prove per fornire una stima qualitativa del potenziale di interazioni avverse tra il liquido permeante e il terreno di prova in un periodo di tempo relativamente breve.

I campioni devono essere permeati utilizzando il liquido permeante nei metodi 1 e 2. La permeazione dei campioni che utilizzano il metodo 3 deve iniziare con acqua e quindi si deve cambiare il liquido permeante di prova. Il liquido permeabile deve essere cambiato quando i criteri di termine per la permeazione con acqua sono soddisfatti.

Le proprietà e la composizione del liquido di prova effluente devono essere monitorate per tutta la durata di una prova. Le proprietà e la composizione del liquido permeante influente non devono cambiare per tutta la durata di una prova di conducibilità idraulica. Determinare la composizione chimica, il pH e la conducibilità elettrica (EC) o la conduttanza specifica o la costante dielettrica (in base al tipo di liquido permeante). Il liquido permeante deve essere campionato in modo tale che la composizione del liquido permeante e anche le condizioni di pressione sul campione non vengano alterate durante il campionamento. Evitare il contatto del liquido permeante con l'ambiente circostante che potrebbe alterarne le proprietà o la composizione. Il liquido di prova deve essere monitorato frequentemente all'inizio di un test. La frequenza di monitoraggio può diminuire dopo un po' di tempo. La frequenza del monitoraggio può essere regolata in base al volume del campione o ai pore volume. Quanto segue fornisce uno schema di campionamento esemplificativo (solo un esempio, le specifiche dovrebbero essere considerate sulla base dei dati disponibili): un minimo di un campionamento per ogni quarto di pore volume per i primi due pore volume, un minimo di un campione per ogni mezzo pore volume compreso tra 2 e 4 pore volume e successivamente ad un minimo di un campione per ogni pore volume.

3.3 Termine della prova

Bisogna continuare la permeazione fino a ottenere almeno quattro valori di conducibilità idraulica in un intervallo di tempo considerando tutti i seguenti criteri: (1) il rapporto tra deflusso e afflusso, (2) stabilità della conducibilità idraulica, (3) numero di pore volume e (4) consistenza delle caratteristiche dell'effluente e dei liquidi influenti (equilibrio chimico). Il rapporto tra deflusso e afflusso deve essere compreso tra 0.75 e 1.25. La conducibilità idraulica deve essere considerata costante se quattro o più determinazioni consecutive della

conducibilità idraulica rientrano nel $\pm 25\%$ o migliore del valore medio se $k \geq 1 \times 10^{-10}$ m/s o entro $\pm 50\%$ o migliore per $k < 1 \times 10^{-10}$ m/s, e un grafico della conducibilità idraulica rispetto al tempo non mostra alcuna tendenza significativa a crescere o diminuire.

Devono passare almeno 2 pore volume attraverso il campione. L'equilibrio chimico si considera raggiunto quando la variazione nella composizione chimica, misurata dalla concentrazione del soluto (per i soluti specificati nel programma di prova), pH, conducibilità elettrica e/o costante dielettrica (in base al tipo di prova liquido) dell'effluente, è all'interno del $\pm 10\%$ di quello della soluzione in ingresso senza tendenze significative in aumento o in diminuzione. Per la terminazione possono essere utilizzati criteri fisici e chimici aggiuntivi per le caratteristiche dei liquidi di prova.

Durante alcuni test possono verificarsi gravi effetti sui campioni, come un'eccessiva variazione di volume, un'eccessiva fessurazione e l'apertura di fori di grandi dimensioni. In questi casi, il test può essere terminato senza soddisfare uno o più criteri suddetti.

Si può ammettere che la variazione della concentrazione di alcuni soluti individuali nell'effluente sia fino a $\pm 50\%$ di quello dell'influente per soluzioni organiche o per provini contenenti materiali cementizi o pozzolanici. Questo requisito non è previsto per tutte le soluzioni organiche o campioni contenenti materiali cementizi o pozzolanici. L'applicabilità del requisito per particolari soluti e campioni dovrebbe essere valutata caso per caso.

I criteri (1), (2) e (3) forniti sopra devono essere utilizzati come criterio di termine rispetto alla fase di permeazione dell'acqua nel metodo 3. Una volta che questi criteri di terminazione sono stati soddisfatti per la permeazione dell'acqua, il liquido permeabile può essere sostituito dal liquido permeato da utilizzare nel programma di prova. Tutti e quattro i criteri di risoluzione specificati sono quindi applicabili per la permeazione con il liquido di prova.

3.4 Elaborazione dei risultati

L'elaborazione dei risultati per il calcolo della conducibilità idraulica è analoga a quella delle prove di permeazione in acqua.

La permeabilità intrinseca, K , può essere calcolata utilizzando la seguente equazione:

$$K = k \cdot \frac{\mu}{\gamma} \quad (7)$$

dove:

K = permeabilità intrinseca del terreno (m^2),

k = conducibilità idraulica del terreno (m/s),

μ = viscosità dinamica del liquido (Pa s)

γ = peso di volume del liquido permeante (N/m^3).

La equazione (8) può essere utilizzata per il confronto tra la conducibilità idraulica al liquido permeante e la conducibilità idraulica all'acqua. Questa equazione consente di distinguere tra gli effetti del peso unitario e la viscosità dei liquidi permeanti e le variazioni nella struttura di un terreno di prova sulla conducibilità idraulica risultante.

$$\frac{k_{pl}}{k_w} = \frac{K_{pl} \cdot \mu_w \cdot \gamma_{pl}}{K_w \cdot \mu_{pl} \cdot \gamma_w} \quad (8)$$

con:

k_{pl} = conducibilità idraulica del terreno con liquido permeante (m/s),

K_{pl} = permeabilità intrinseca del terreno con liquido di prova (m^2),

μ_{pl} = viscosità dinamica del liquido permeante (cP),

γ_{pl} = peso di volume del liquido permeante (N/m^3),

k_w = conducibilità idraulica con acqua (m/s),

K_w = permeabilità intrinseca con acqua (m^2),

μ_w = viscosità dinamica dell'acqua (cP),

γ_w = peso di volume dell'acqua (N/m^3)

Per calcolare il numero di pore volume di flusso si usa la seguente equazione:

$$PVF = \frac{\sum V_{outflow}}{V_v} \quad (9)$$

con:

PVF = numero di pore volume di flusso,

$\sum V_{outflow}$ = sommatoria dei volumi effluenti durante il test (m^3 o cm^3)

V_v = volume dei vuoti del provino (m^3 o cm^3).

Il volume totale dei vuoti (V_v) potrebbe non essere uguale al volume effettivo dei vuoti (V_{ve}), che sono i vuoti che consentono il trasporto del liquido. Se il volume effettivo dei vuoti (V_{ve}) è noto, questo valore deve essere utilizzato per V_v nell'eq. 9.

3.5 Rapporto di prova

Oltre a quanto specificato per le prove di permeazione in acqua, per le prove con soluzioni acquose vanno anche riportati i dati specificati di seguito.

- Informazioni per identificare il liquido permeante come provenienza, composizione chimica, proprietà fisiche.
- La sequenza dei test condotti includendo la saturazione (se presente) e le fasi di permeazione.
- Il tipo di liquido utilizzato nelle varie fasi.
- I risultati della conducibilità idraulica devono essere presentati come conducibilità idraulica rispetto al tempo e rispetto ai pore volume di flusso in forma tabellare o grafica.
- Tutte le proprietà chimiche pertinenti di liquidi influenti e effluenti rispetto al tempo e rispetto ai pore volume di flusso in forma tabellare o grafica.
- Se si fanno confronti tra i valori di conducibilità idraulica con il liquido permeante e con l'acqua, riportare la conducibilità idraulica, la permeabilità intrinseca, la viscosità e il peso di volume per entrambi i liquidi permeanti.

4 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo scopo della tesi è stato quello di fornire un quadro riepilogativo delle corrette procedure sperimentali per l'esecuzione delle prove di permeazione con permeametro a parete flessibile, che rappresenta la tipologia di permeametro da preferire in generale per la determinazione della conducibilità idraulica sia in acqua, sia con soluzioni permeanti, soprattutto per la possibilità di controllare la saturazione, le pressioni di confinamento efficaci e le deformazioni dei provini durante la prova.

La tesi ha riassunto le procedure per le prove in acqua e per quelle con soluzioni acquose specificando anche i criteri per la valutazione dei possibili effetti di interazione fra soluzione permeante e provino.

Quanto riportato è stato ricavato dagli standard ASTM D5084 e ASTM D7100 può essere utile per coloro che approcciano al problema della determinazione della conducibilità idraulica di laboratorio o ne debbano individuare gli aspetti salienti per un'analisi critica di risultati forniti da laboratori.