

Progettazione e controllo in situ di barriere minerali di discariche controllate di RSU

Prof. Ing. Marco Favaretti

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA)

Università di Padova

Convegno Ecomondo - AGI

Monitoraggio geotecnico delle opere per la difesa del territorio e la tutela dell' ambiente

Rimini, 3 Novembre 2020

1-normativa vigente

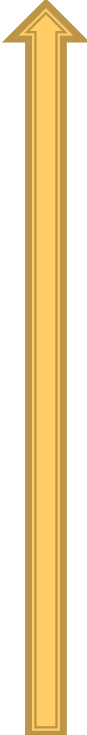
2-fattori che influenzano k

3-prove permeabilità LAB/SITU

4-proposte e conclusioni

DECRETO LEGISLATIVO 03.09.2020, n. 121
*Attuazione della direttiva (UE) 2018/850, che
modifica la direttiva 1999/31/CE relativa alle
discariche di rifiuti*
G.U. Serie Generale n.228 del 14.09.2020

Sistema multistrato di base per discarica di rifiuti non pericolosi

- 
- ❖ **strato drenante**: $s > 0,5$ m, $k \geq 10^{-5}$ m/s, classi A1 e A3 (HRB AASHTO).
 - ❖ **strato di protezione**, costituito da idoneo materiale **naturale o artificiale**;
 - ❖ **geomembrana in HDPE**, $s > 2,5$ mm;
 - ❖ **strato di impermeabilizzazione artificiale** con $s \geq 1$ m e $k \leq 10^{-9}$ m/s, impiegando terreni naturali o miscele di terreni compattati che garantiscono la permeabilità prescritta;
 - ❖ **barriera geologica naturale o completata artificialmente** $s > 1$ m e $k < 10^{-9}$ m/s

2.4.2. Barriera di fondo e delle sponde.

La barriera di fondo e delle sponde è composta da un sistema accoppiato costituito partendo dal basso verso l'alto da:

- 1. barriera geologica;***
- 2. strato di impermeabilizzazione artificiale;***
- 3. strato di drenaggio.***

La barriera geologica alla base e sulle sponde della discarica è costituita da una formazione geologica naturale che risponda a requisiti di permeabilità e spessore aventi un effetto combinato almeno equivalente in termini di tempo di attraversamento a quello risultante dai seguenti criteri:

discarica per rifiuti non pericolosi:

conducibilità idraulica $k \leq 10^{-9}$ m/s

spessore $s \geq 1$ m;

La barriera geologica, qualora non soddisfi naturalmente le condizioni di cui sopra, deve essere completata artificialmente con uno strato di materiale argilloso compattato di spessore $\geq 0,5$ m, anche accoppiato a geosintetici di impermeabilizzazione, che fornisca complessivamente una protezione idraulica equivalente in termini di tempo di attraversamento.

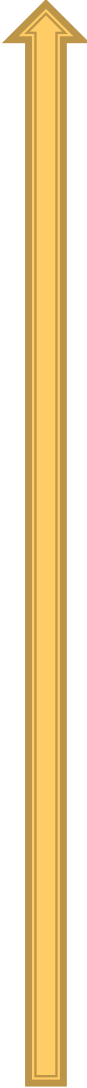
Ai fini dell'equivalenza i tempi di attraversamento da rispettare, nell'ipotesi di un carico idraulico di 0.3 m, non devono essere inferiori ai 25 anni per le discariche per rifiuti non pericolosi.

Lo strato minerale compattato deve avere $s \geq 1,0$ m e $k \leq 10^{-9}$ m/s, deve essere realizzato in strati uniformi compattati dello s_{\max} di 0,25 m, e deve avere caratteristiche idonee a resistere alle sollecitazioni chimiche e meccaniche presenti nella discarica.

Le modalità costruttive e il valore della permeabilità dello strato minerale compattato possono essere determinate mediante campo prova in situ.

In ogni caso, l'impermeabilizzazione del fondo e delle pareti della discarica non può essere costituita dalla sola barriera geologica che va sempre completata con uno sistema di impermeabilizzazione artificiale.

Sistema multistrato di copertura per discarica di rifiuti non pericolosi

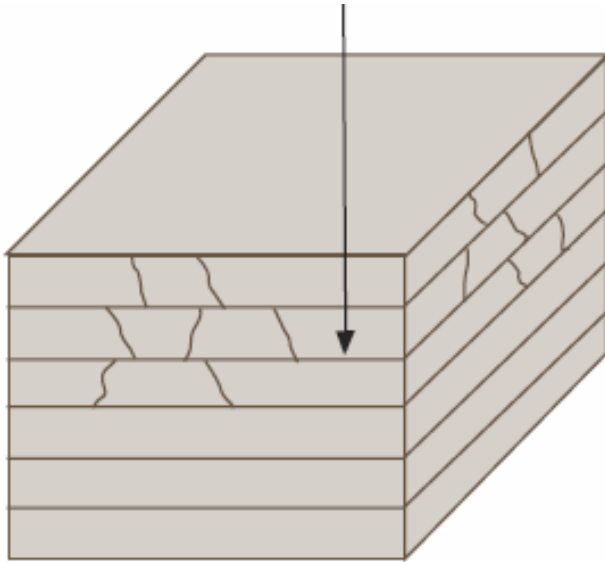
- 
- ❖ **strato superficiale di copertura** $s \geq 1$ m;
 - ❖ **strato drenante di materiale granulare** $s \geq 0,5$ m e idonea trasmissività e permeabilità ($k > 10^{-5}$ m/s);
 - ❖ **strato minerale compattato** $s \geq 0,5$ m e $k \leq 10^{-8}$ m/s integrato da un rivestimento impermeabile superficiale. ***Le modalità costruttive e il k dello strato minerale possono essere determinate mediante campo prova.*** Lo strato minerale compattato integrato dal geosintetico di impermeabilizzazione dovrà essere protetto con un opportuno strato costituito da idoneo materiale naturale o artificiale.
 - ❖ **strato di drenaggio del gas e di rottura capillare**, $s \geq 0,5$ m di idonea trasmissività e permeabilità al gas.
 - ❖ **strato di regolarizzazione**

Verifica spessore minimo

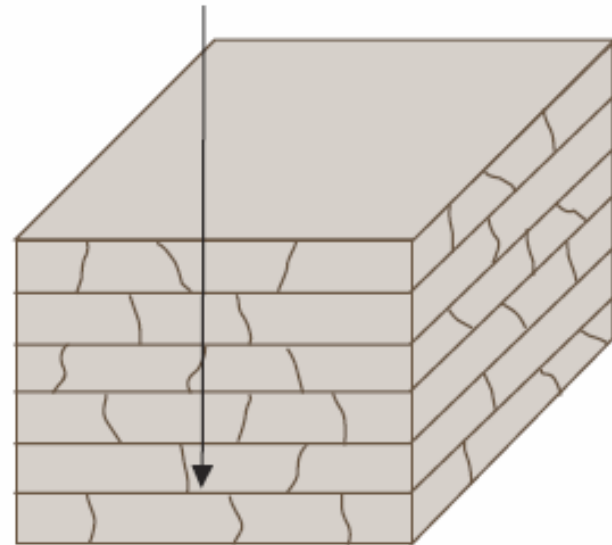


Compenetrazione tra singoli straterelli della barriera minerale

Compenetrazione ottimale produce una bassa conducibilità idraulica della barriera minerale compattata



Compenetrazione scarsa produce una elevata conducibilità idraulica della barriera minerale compattata



Effetto della compenetrazione tra gli straterelli (ottimale o scarsa) sull'efficienza della barriera minerale compattata

$$k \leq 10^{-9} \text{ m/s}$$

$$k \leq 0,00000000010$$



$$k \leq 0,0000000001\mathbf{1}$$



N.B. attenzione la norma è PRESCRITTIVA!!!

1-normativa vigente

2-fattori che influenzano k

3-prove permeabilità LAB/SITU

4-proposte e conclusioni

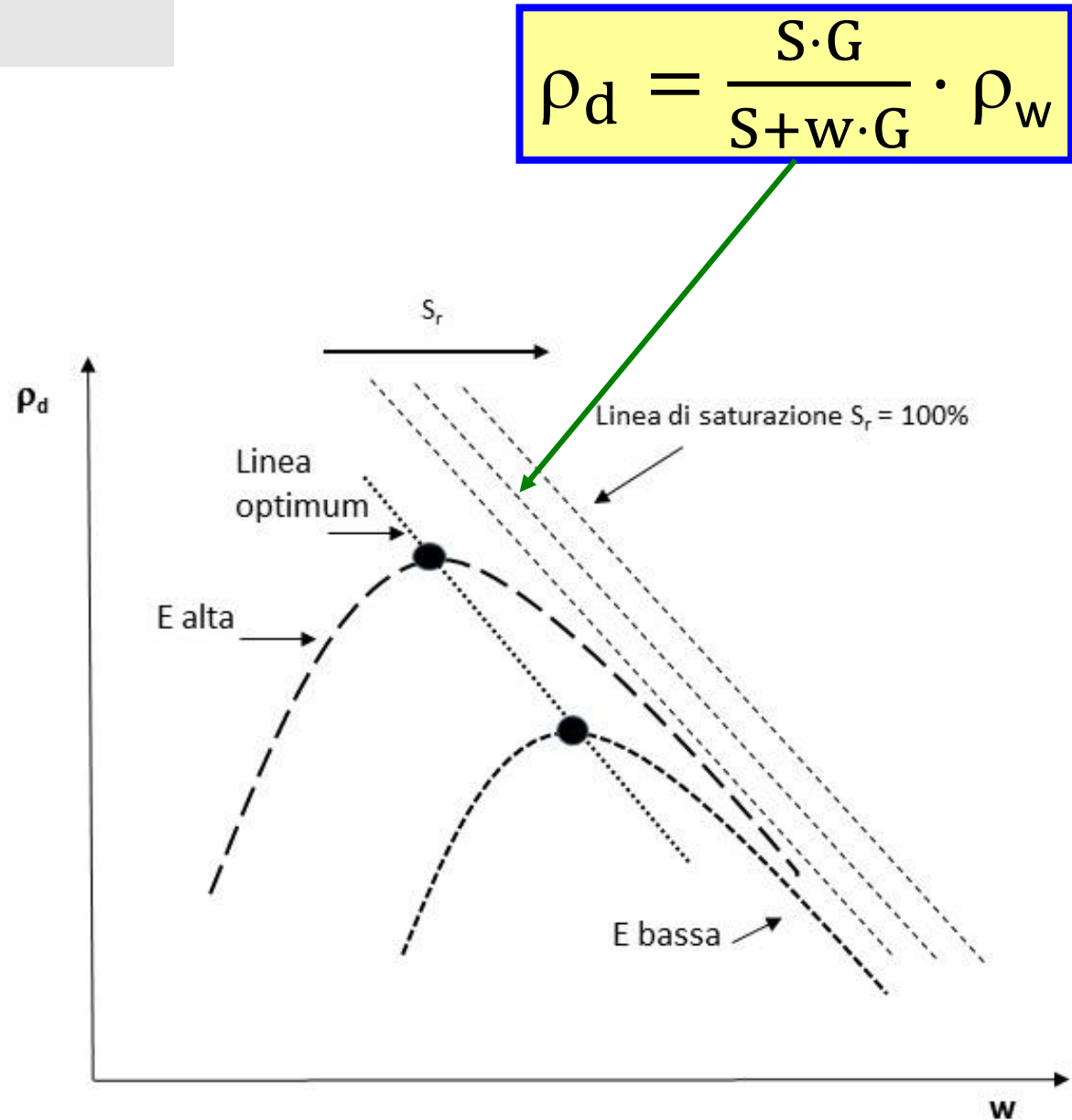
Effetto su $\rho_{d,max}$ e w_{opt} della energia di compattazione

A parità di procedura di compattazione, al crescere della E aumenta $\rho_{d,max}$ e diminuisce w_{opt} .

La linea degli optimum si dispone parallelamente alla curva di saturazione.

Per $w > w_{opt}$, le curve corrispondenti alle diverse energie tendono a confondersi in un'unica linea.

L'aumento di E è più efficace quando si opera con $w < w_{opt}$.

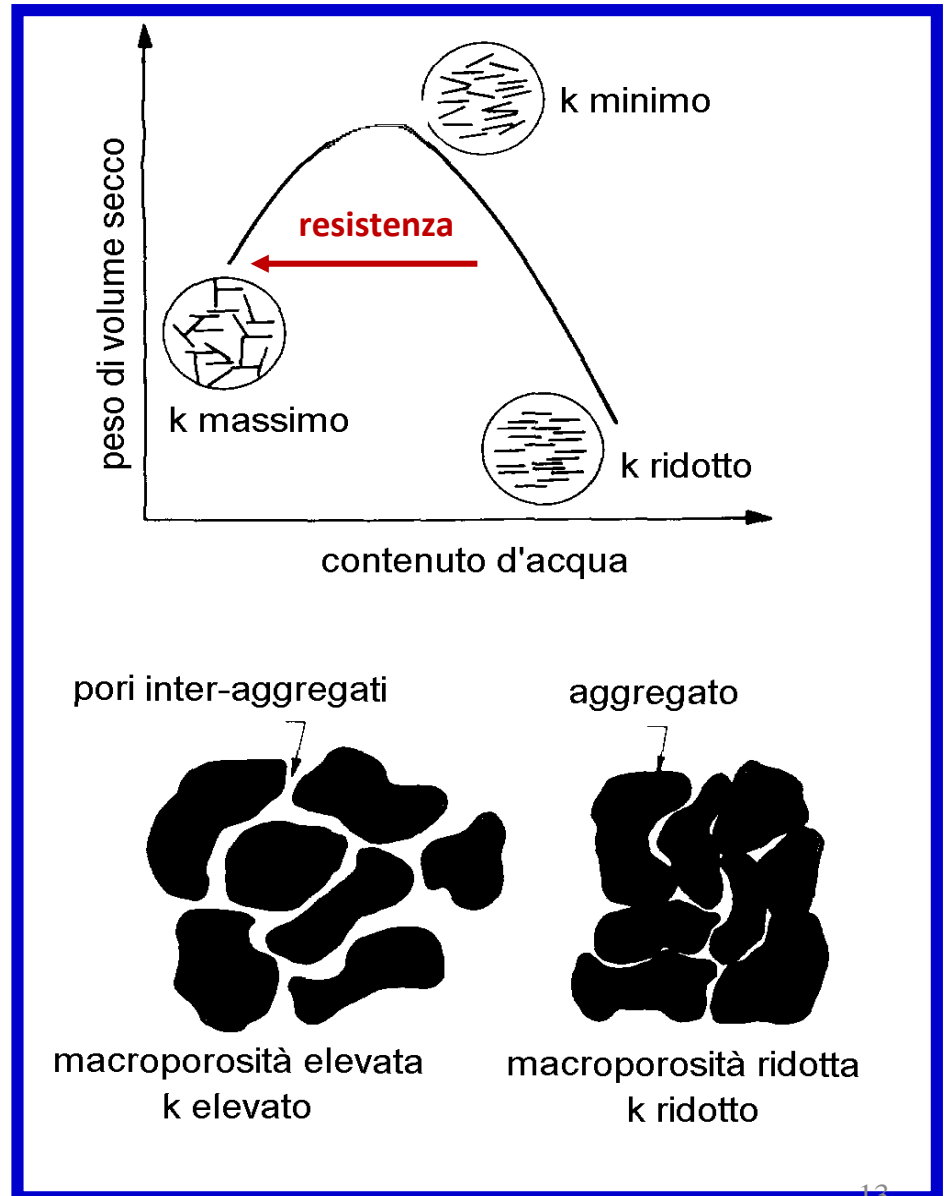


Effetto su k del contenuto d'acqua a parità di energia di compattazione

Al variare del contenuto d'acqua e della densità secca di una argilla compattata la conducibilità idraulica può aumentare o diminuire anche di diversi ordini di grandezza.

L'argilla preparata con un contenuto d'acqua uguale o leggermente superiore all'*optimum* può essere compattata alla massima densità secca possibile e risulta caratterizzata dalla minima conducibilità idraulica.

L'eccessiva umidità può produrre seri inconvenienti, quali la perdita di consistenza e la diminuzione di resistenza al taglio, pericolosa ai contatti tra materiali di diversa natura, posti sulle scarpate laterali della discarica.



Effetto su k di w e energia di compattazione

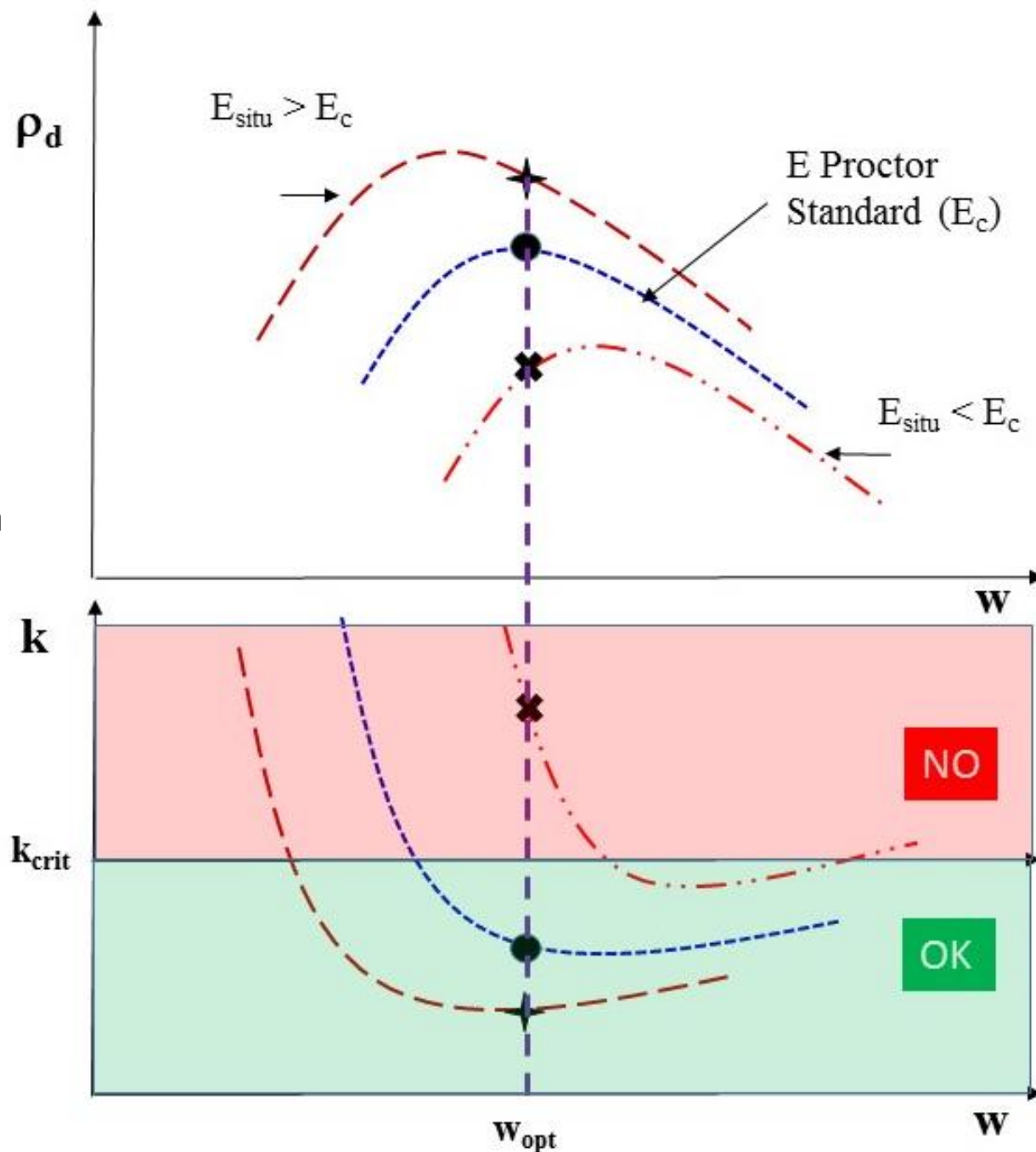
$w < w_{opt}$

aumentando w , k
diminuisce

rapidamente fino ad un
minimo $w > w_{opt}$

$w > w_{opt}$ all'aumentare
di w , k aumenta
lievemente

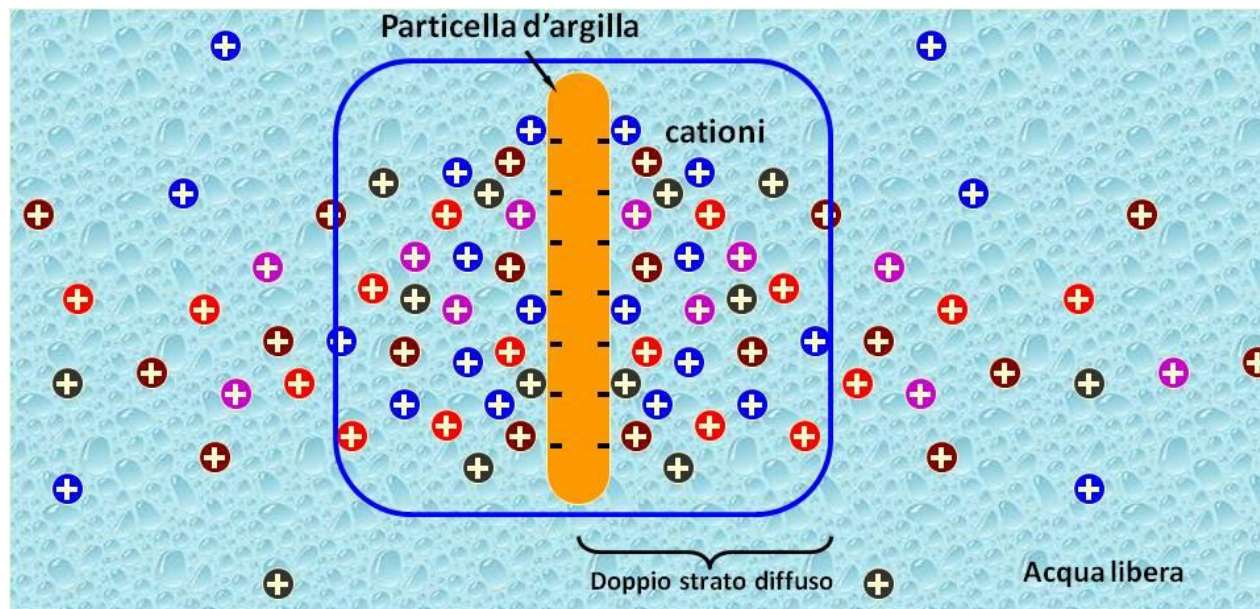
aumentando E il k
diminuisce riducendosi
l'indice dei vuoti



Effetto su k dello spessore del doppio strato diffuso

Le superfici argillose sono caricate negativamente. I cationi (+) vengono così attratti e strettamente trattenuti. I cationi in eccesso (quelli non impegnati a neutralizzare le cariche negative superficiali) e gli anioni (-) sono presenti come precipitati di sale. Questi vanno in soluzione nell'acqua, quando le particelle di argilla vengono messe a contatto con l'acqua.

Si assiste così ad un'alta concentrazione di cationi adsorbiti vicino alla superficie della particella argillosa; i rimanenti si diffondono attorno fino al limite di attrazione offerto dalla particella. Gli anioni presentano una concentrazione minima vicino alla particella.



Effetto su k dello spessore del doppio strato diffuso

La superficie caricata negativamente, l'acqua adsorbita e il volume soggetto all'azione della particella argillosa (con i cationi in eccesso e gli anioni) vengono definiti **DOPPIO STRATO DIFFUSO**, il cui spessore t può essere espresso approssimativamente attraverso la seguente espressione:

❖ D la costante dielettrica del mezzo

❖ K la costante di Boltzmann ($1,38 \times 10^{-6}$ erg/K)

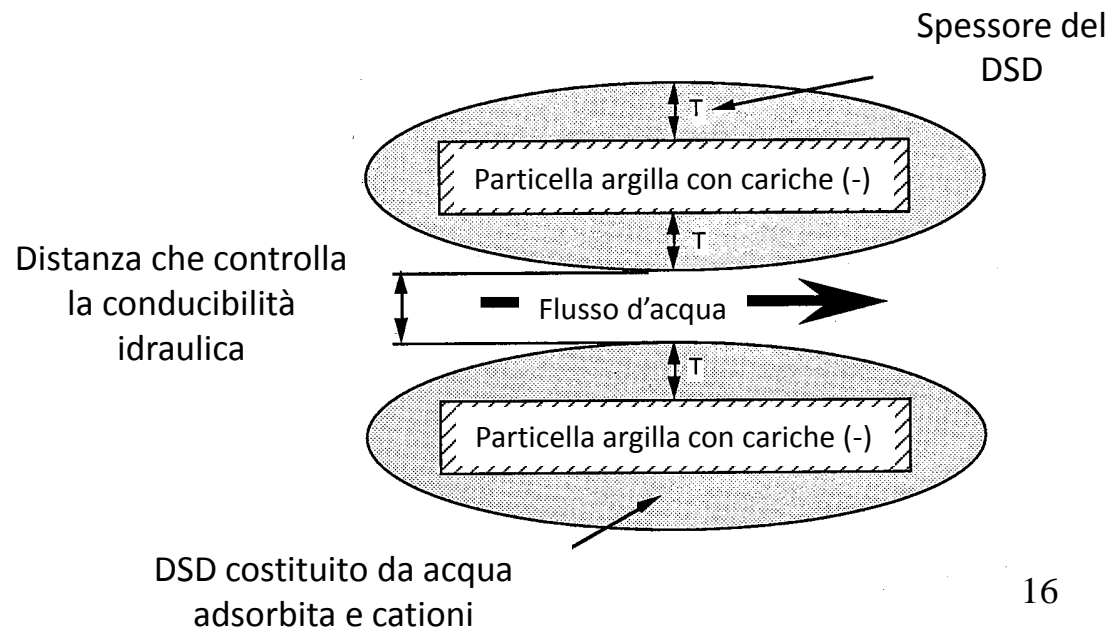
❖ T la temperatura

❖ n_0 la concentrazione dell'elettrolita

❖ ε la carica elettronica unitaria (16×10^{-20} Coulomb)

❖ v la valenza del catione.

$$t = \sqrt{\frac{D \cdot K \cdot T}{8 \cdot \pi \cdot n_0 \cdot \varepsilon^2 \cdot v}}$$



Effetto su k dello spessore del doppio strato diffuso

	parametro relativo al fluido interstiziale	spessore doppio strato diffuso	struttura del terreno
concentrazione dell'elettrolita	+	-	flocculata
	-	+	dispersa
valenza dello ione	+	-	flocculata
	-	+	dispersa
temperatura	+	+	dispersa
	-	-	flocculata
pH	+	+	dispersa
	-	-	Flocculata

Effetto su k della dimensione delle zolle

Influenza della dimensione delle zolle sulla conducibilità idraulica delle barriere minerali

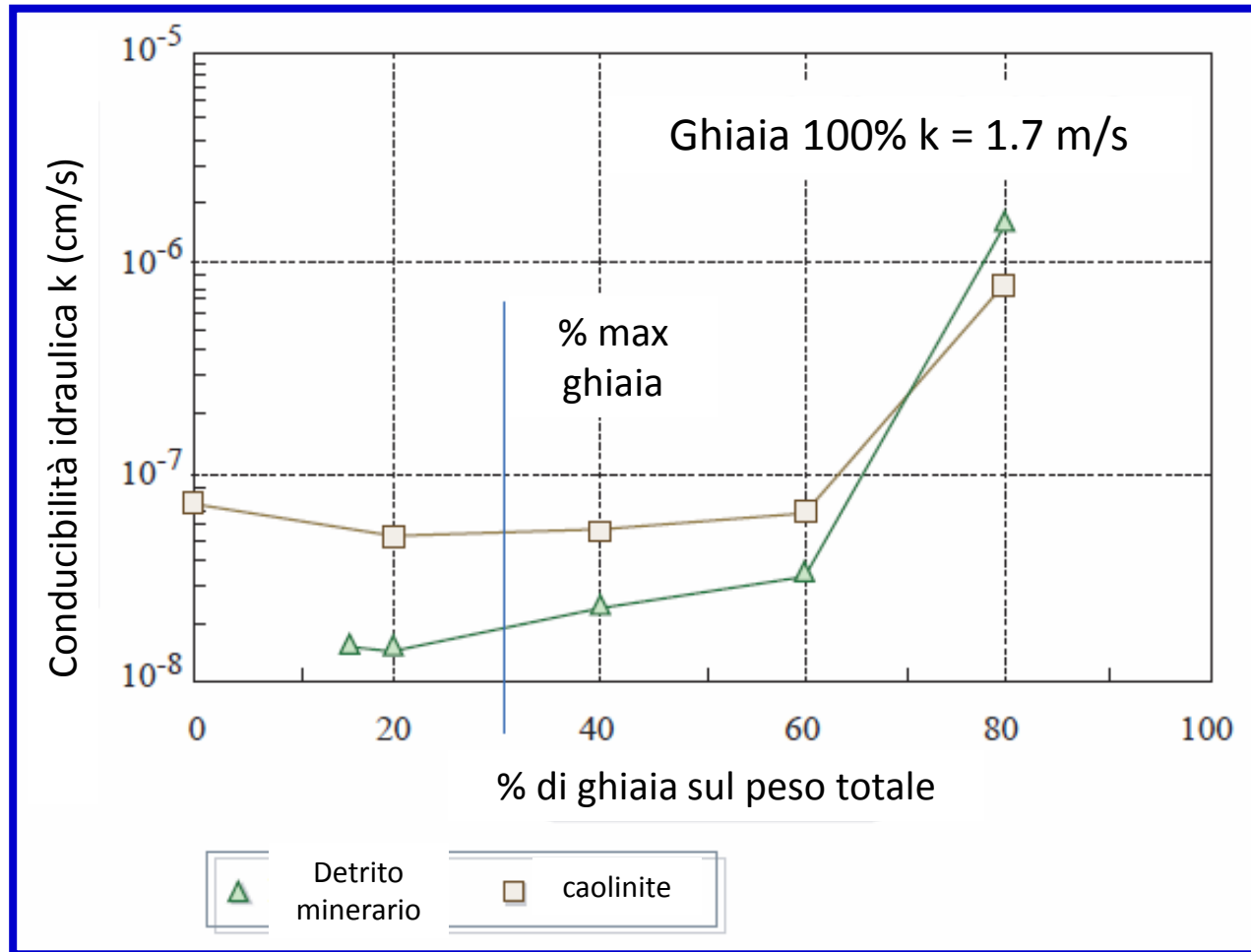
Dimensione media delle zolle

Conducibilità idraulica (cm/s)

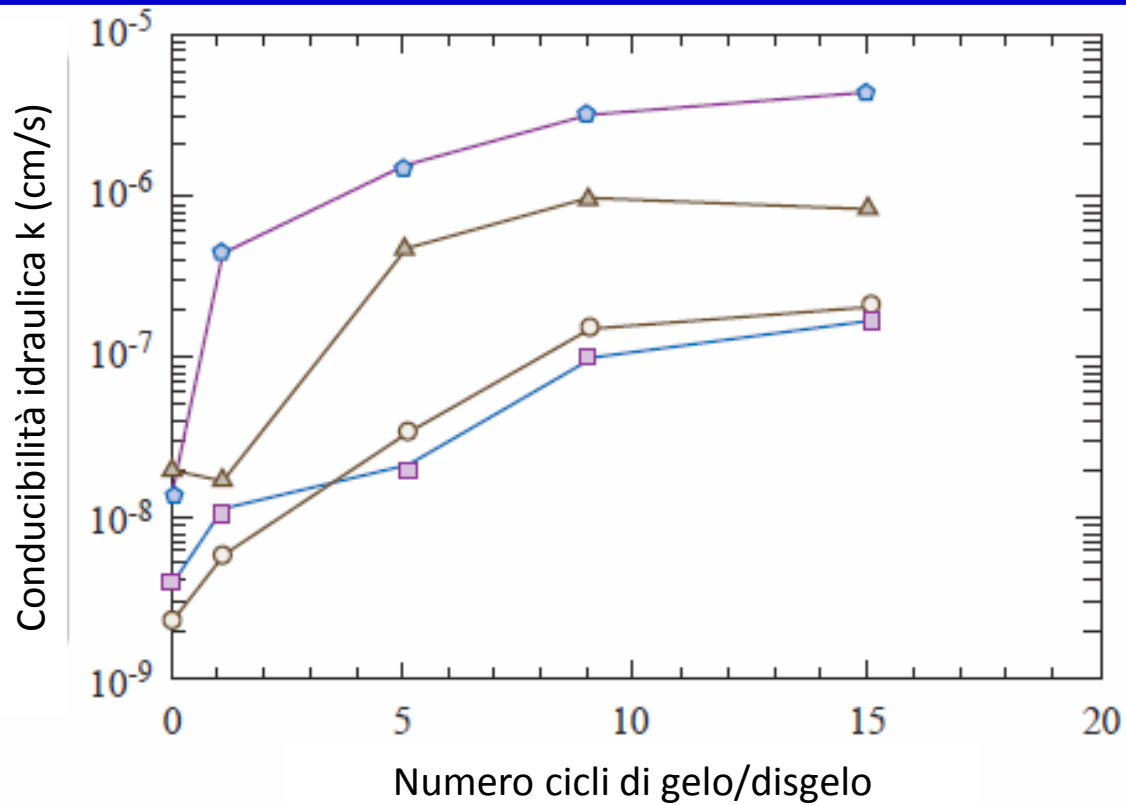
9.5 mm	3/8 inches
4.8 mm	3/16 inches
1.6 mm	1/16 inches

3.0×10^{-7}
2.0×10^{-8}
9.0×10^{-9}

Effetto su k della percentuale di ghiaia



Effetto su k dei cicli di gelo-disgelo



Effetto del gelo/disgelo sulla conducibilità idraulica di argilla compattata

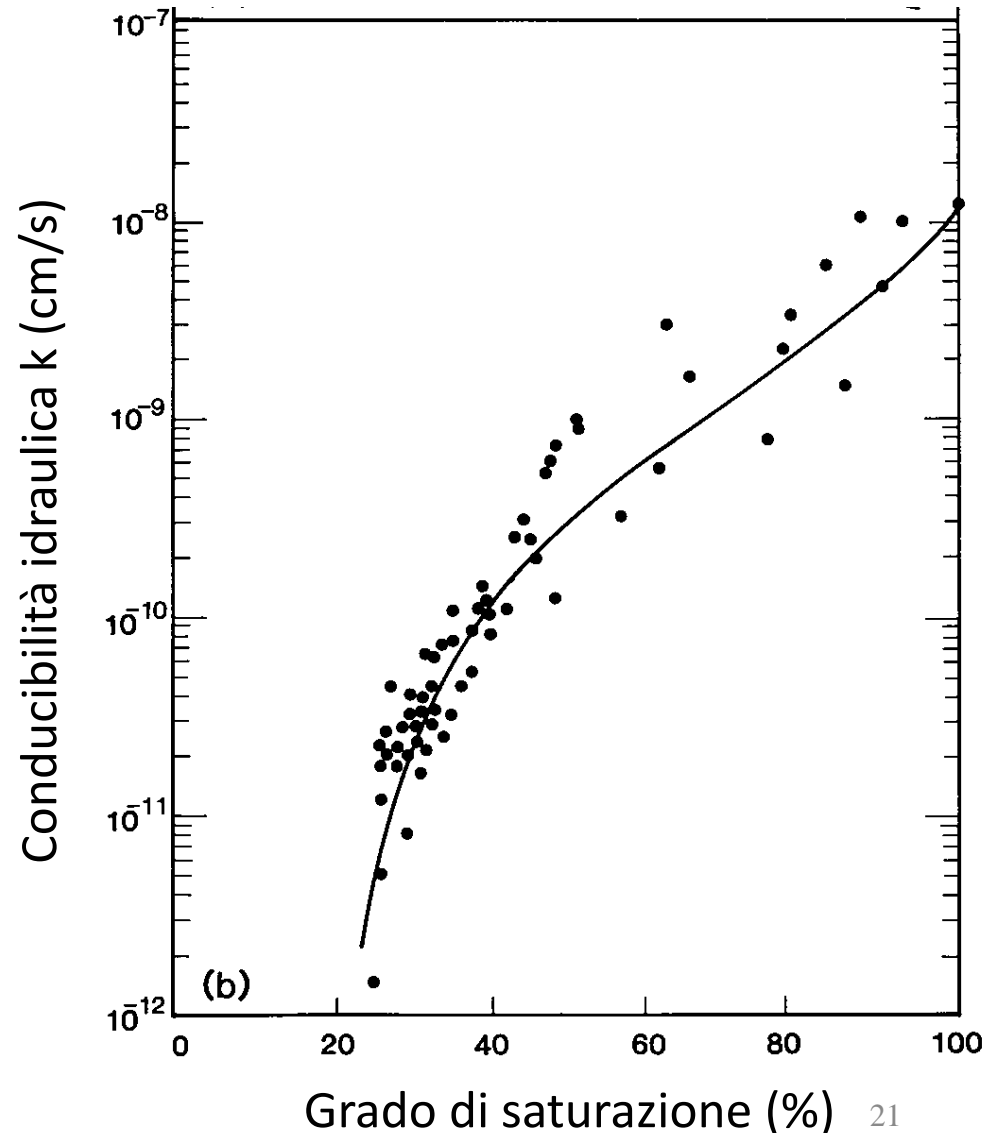
▲ Durango ● Green River ○ Slick Rock ■ Rifle

Effetto su k del grado di saturazione

$$k = C \cdot D_s^2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot S^3$$

L'equazione proposta da Taylor comprende l'effetto del grado di saturazione S^3 .

Nel diagramma a fianco si osserva come k aumenti con il grado di saturazione.

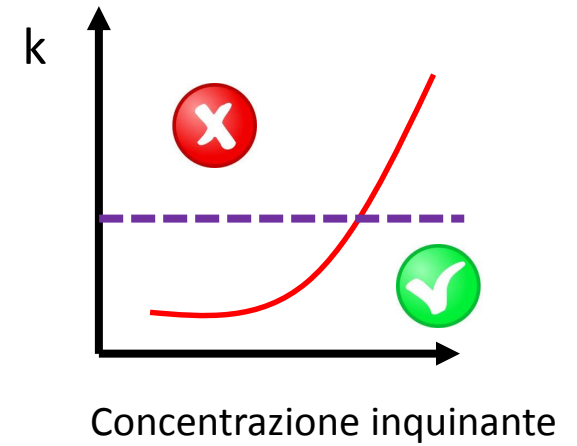
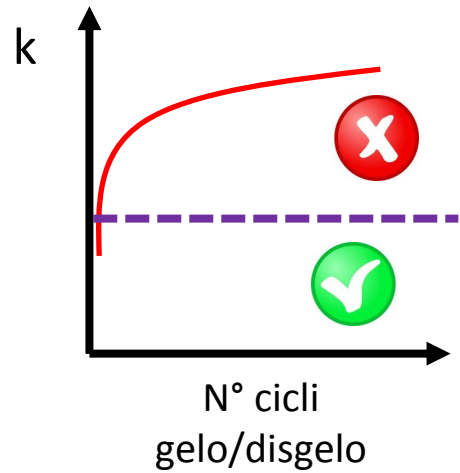
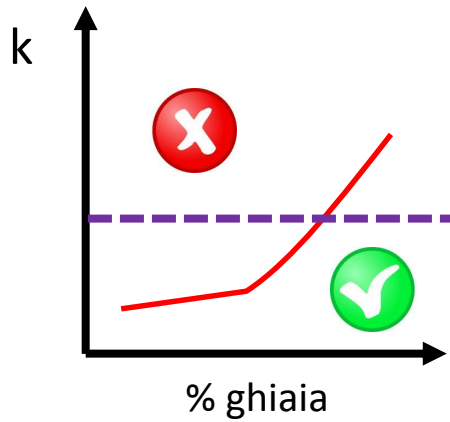
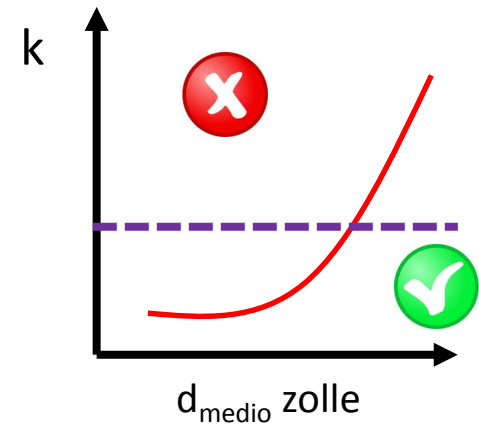
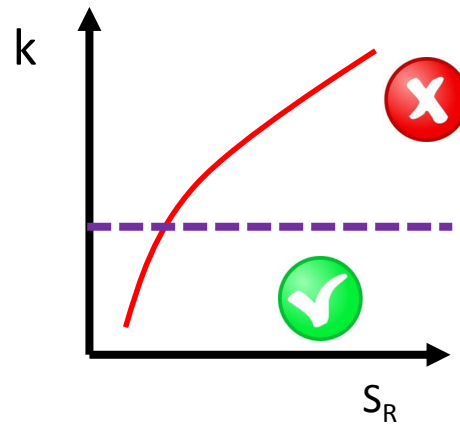
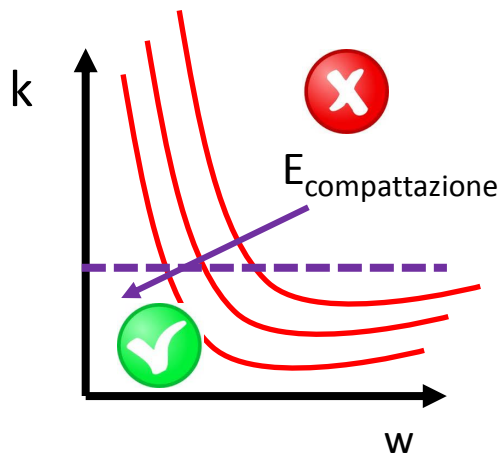


Effetto su k del grado di essiccazione

I fenomeni di essiccazione e di fessurazione che si verificano in uno strato d'argilla compattata possono portare all'aumento della conducibilità idraulica complessiva anche di 2-3 ordini di grandezza.

Lo strato argilloso deve pertanto essere mantenuto umido attraverso lo spruzzo di acqua o di sigillanti bituminosi, la successiva copertura con geomembrana o con altro terreno.





La norma incredibilmente non specifica alcunché su come si debba determinare k , valore numericamente piccolissimo.

- **tipologia di prova (laboratorio o in situ)**
- **tipologia di provino (forma e dimensione)**
- **energia di compattazione (Proctor st/mod)**
- **stato di tensione da applicare al provino (isotropo o anisotropo)**
- **fluido permeante (acqua naturale, distillata, demineralizzata, percolato artificiale o naturale, concentrazione di un eventuale inquinante)**
- **gradiente idraulico di prova**
- **tempi minimi di prova**
- **numero minimo di prove**
- **nulla di nulla**

1-normativa vigente

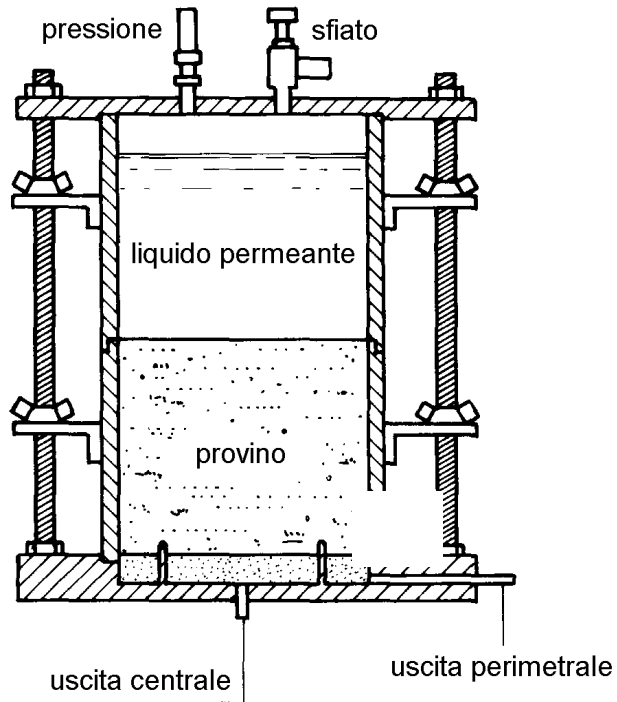
2-fattori che influenzano k

3-prove permeabilità LAB/SITU

4-proposte e conclusioni

Prove di permeabilità in laboratorio

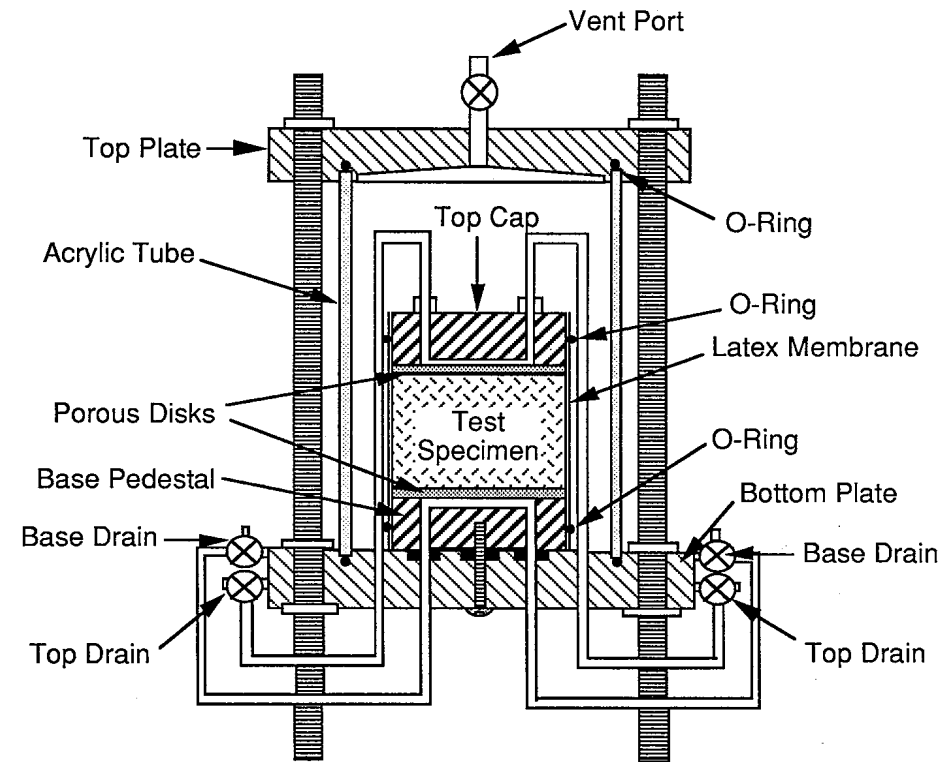
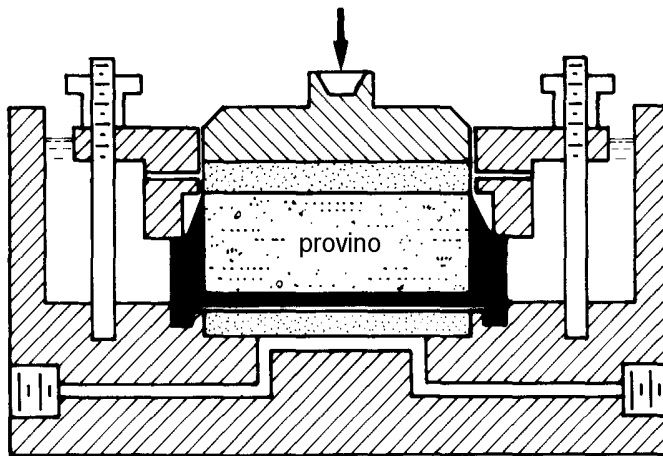
Permeametri a parete fissa



$$k = \frac{Q \cdot L}{h \cdot A \cdot t}$$

Permeametro a parete flessibile

Permeametro a parete fissa



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

$$k = \frac{Q \cdot L}{h \cdot A \cdot t}$$

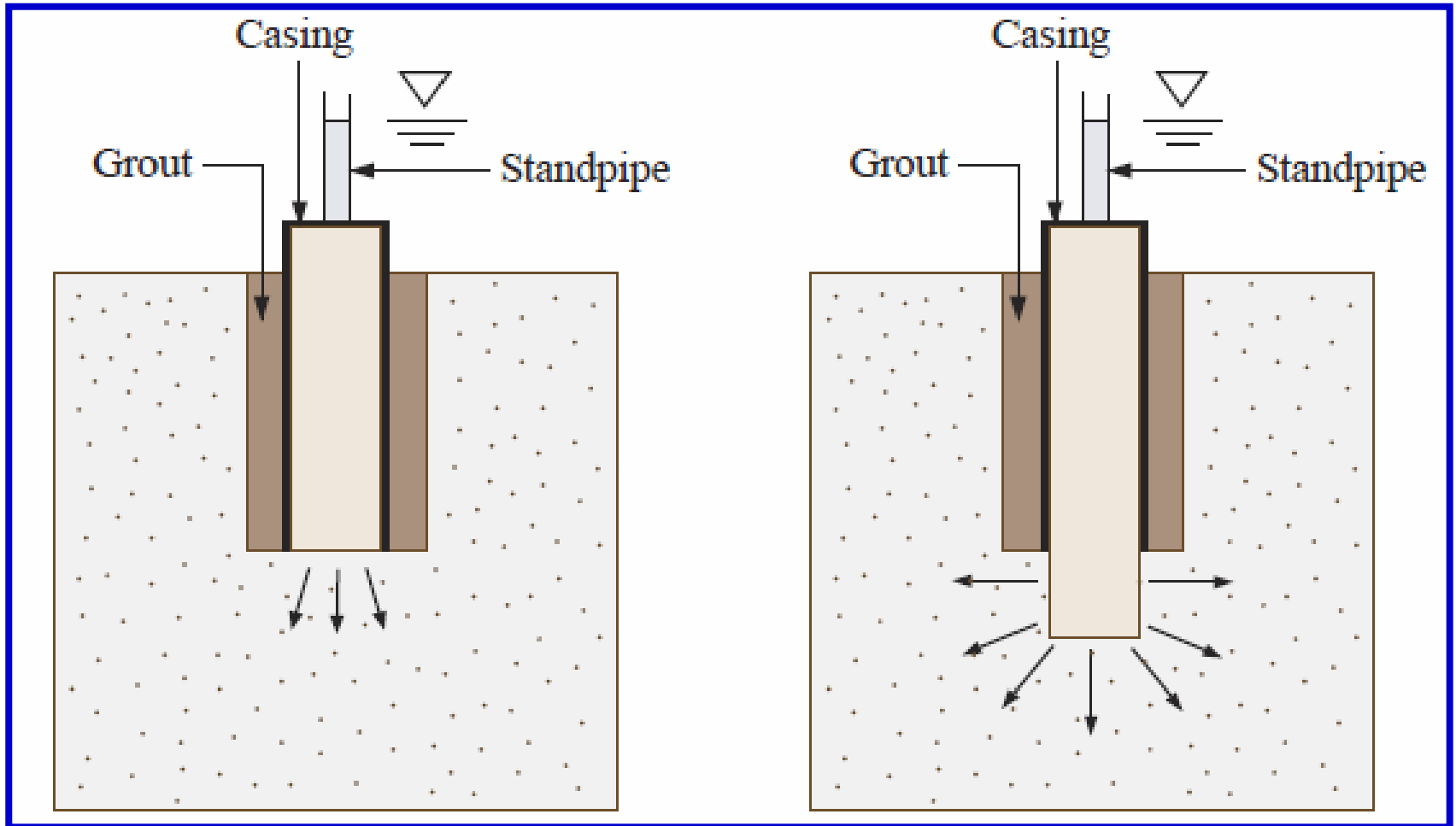
APPARECCHIATURA	VANTAGGI	SVANTAGGI
fustella compattazione	✓ prova semplice ed economica	✓ parziale saturazione ✓ misura ritiro/rigonfiamento non possibile ✓ controllo incompleto livello tensionale ✓ possibile filtrazione laterale
fustella doppio anello	✓ controllo filtrazione laterale	✓ come sopra
cella edometrica	✓ provino indisturbato ✓ controllo tensione verticale ✓ controllo deformazioni verticali	✓ possibile filtrazione laterale ✓ difficoltà applicare livelli tensionali ridotti ✓ difficoltà confezionamento provini ✓ limitato spessore del provino
cella triassiale	✓ controllo del livello tensionale ✓ controllo delle portate d'acqua ✓ controllo deformazioni provino ✓ limitata filtrazione laterale	✓ prova complessa e costosa ✓ difficoltà confezionamento del provino

FATTORE	CAUSA	ERRORE POTENZIALE
Gradiente idraulico di prova	mantenuto elevato per un sufficiente passaggio di acqua in tempi brevi	✓ non rappresentativo condizioni in situ ✓ migrazione fine
migrazione/orientazione delle particelle	gradienti elevati	✓ sottostima di k
saturazione	pressione con sistema aria compressa può causare aria in soluzione	✓ diminuzione di k per aria presente
diffusione attraverso la membrana	in presenza di gradienti di concentrazione chimica	✓ composizione chimica del permeante non rappresentativa delle condizioni in posto
rapporto H/ϕ provino	dimensione del provino	✓ k diminuisce all'aumentare del rapporto L/ϕ
durata della prova	generalmente troppo breve	✓ sovrastima di k

Prove di permeabilità in situ

1. **Boutwell permeameter test (ASTM 6391-11);**
2. **Sealed Double-Ring Infiltrometer test (SDRI) (ASTM D5093-15);**
3. **Guelph permeameter (ASTM D 5126).**

Prova di permeabilità con permeametro di Boutwell



FASE 1

FASE 2

Prova di permeabilità con permeametro di Boutwell

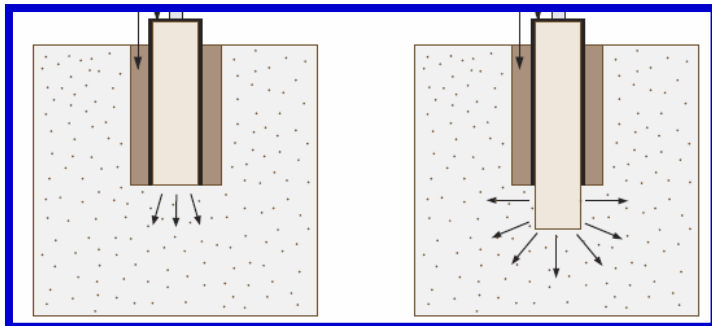
$$K_1 = R_T \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{11 \cdot D \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)$$

$R_T = 2.2902 (0.9842 T)/T^{0.1702}$ with temperature T in °C

$$K_2 = R_T \cdot \frac{A}{B} \cdot \ln\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)$$

$$A = d^2 \cdot \ln\left(\frac{L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{D}\right)^2}\right)$$

$$B = 8 \cdot L \cdot (t_2 - t_1) \cdot \left(1 - 0.56 \cdot e^{-1.57 \cdot L/D}\right)$$

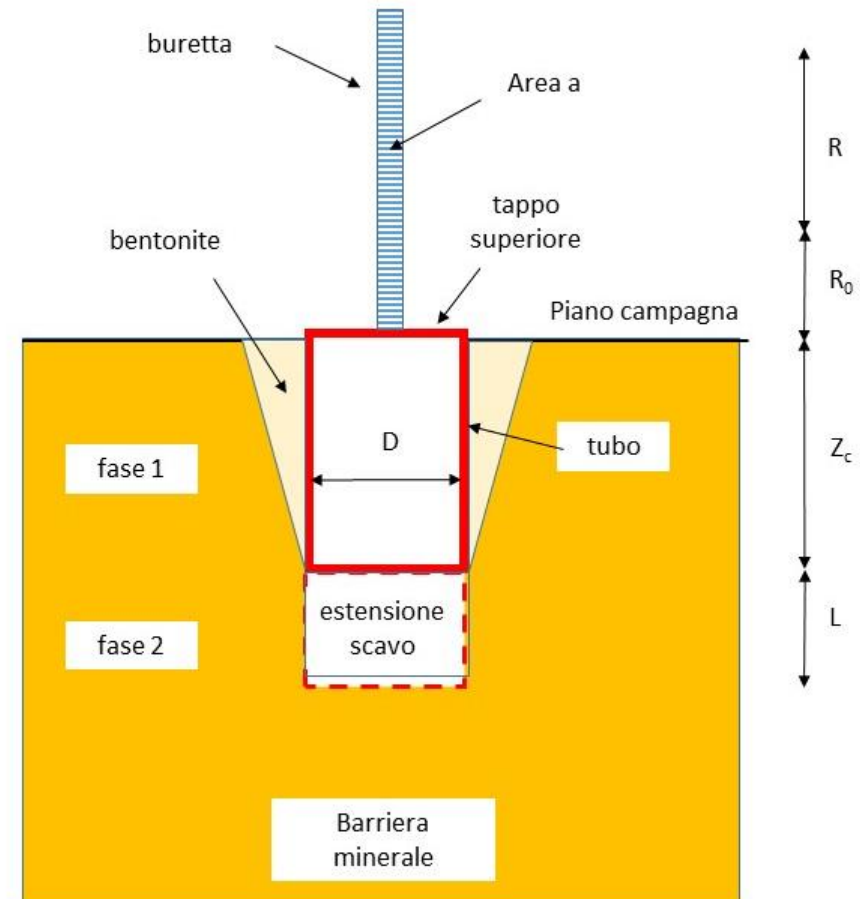


$D = 10 \text{ cm}$

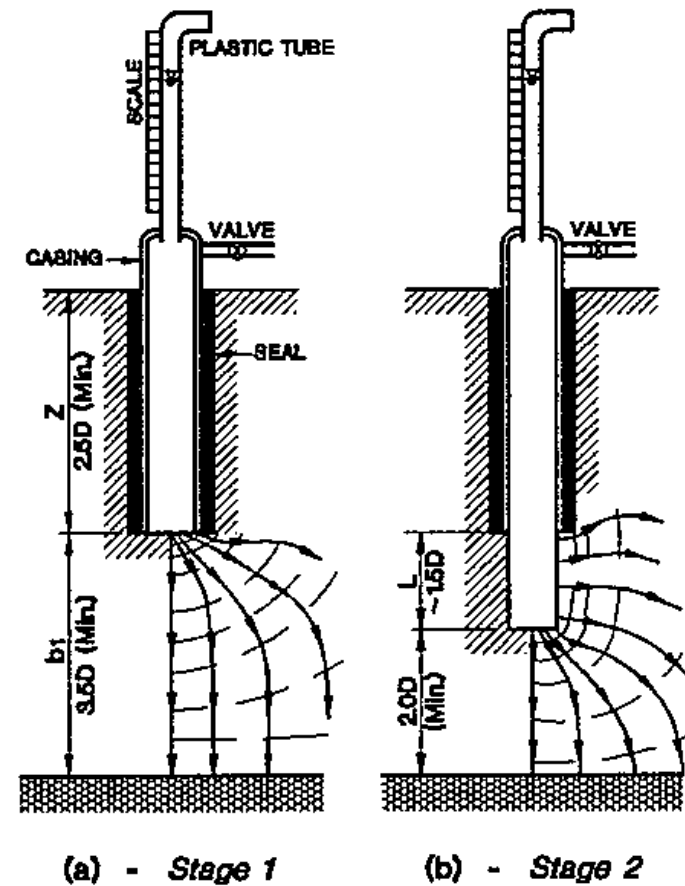
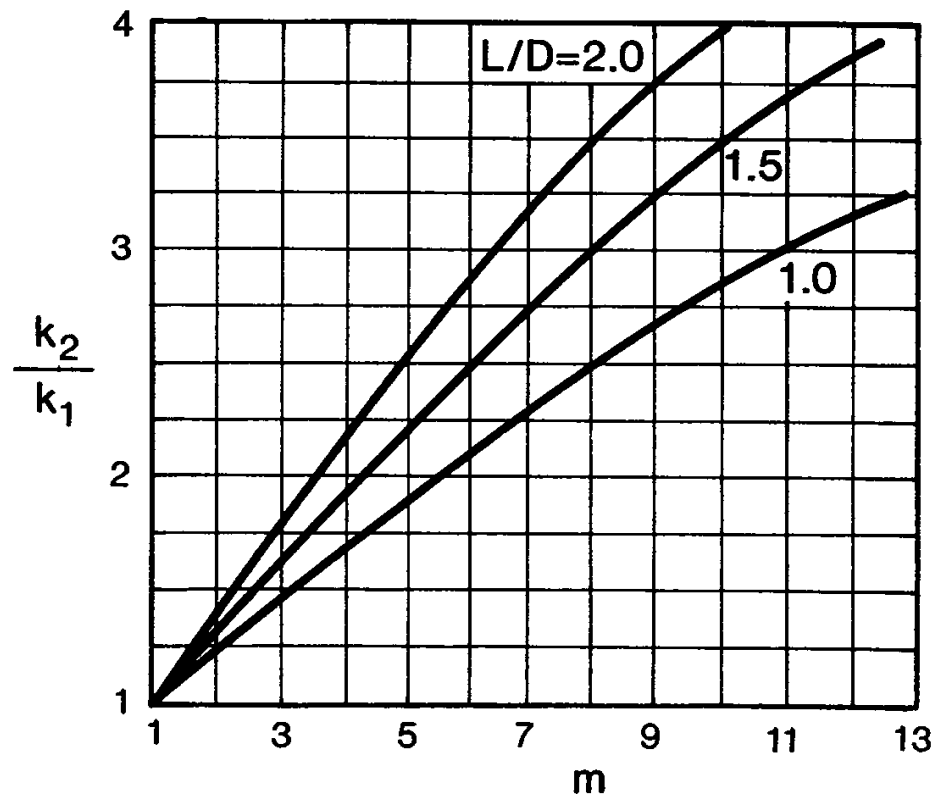
$L = 15 \text{ cm}$

$Z_c = 25 \div 30 \text{ cm}$

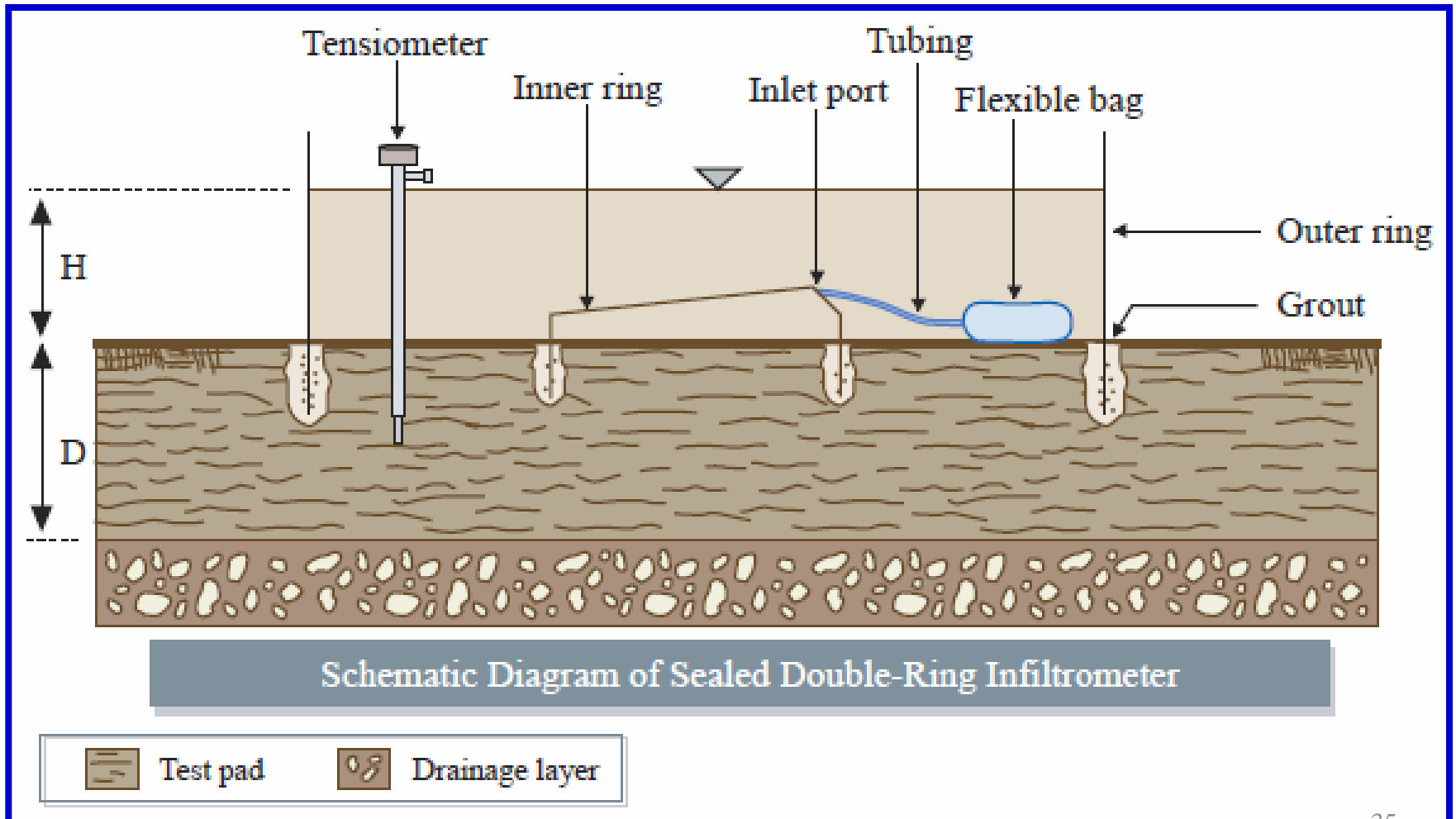
$T = 4 \div 14 \text{ gg/fase}$



$$k_h = m^2 \cdot k_1$$



Prova di permeabilità con infiltrometro chiuso a doppio anello



Prova di permeabilità con infiltrometro chiuso a doppio anello

L'anello interno ha area A ($\phi_{\text{ext}} = 3 \text{ m}$ $\phi_{\text{int}} = 1.5 \text{ m}$).

L'infiltrazione di una quantità d'acqua Q , nel tempo t , nello strato compattato di argilla determina un pari svuotamento della sacca.

$q = Q/(A \times t) = \text{velocità di infiltrazione}$

$k = q/i$

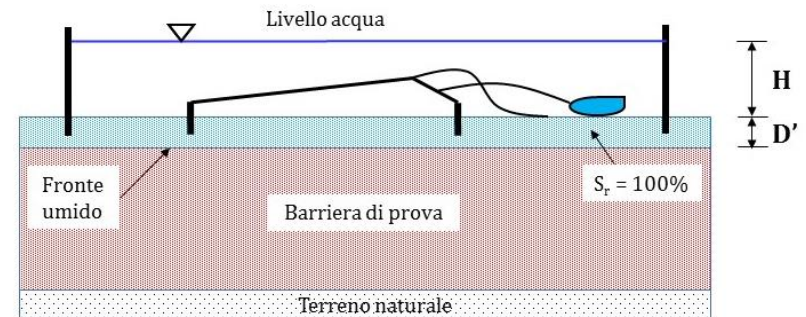
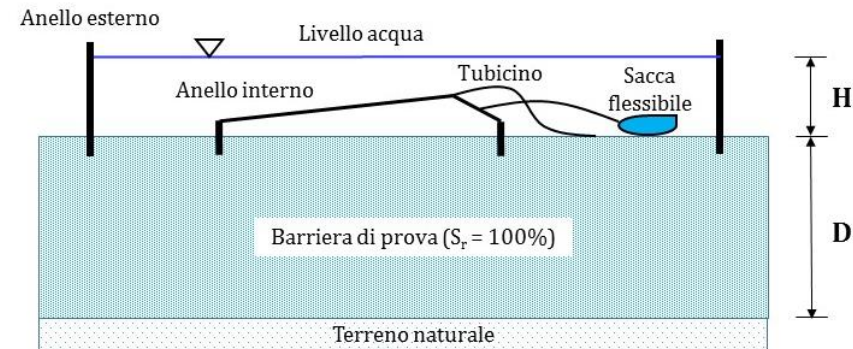
Il gradiente idraulico " i " viene calcolato come segue:

$$i = (H + D)/D$$

con D = spessore totale della barriera (fornisce valori conservativi con i basso e k alto)

$$i = (H + D')/D'$$

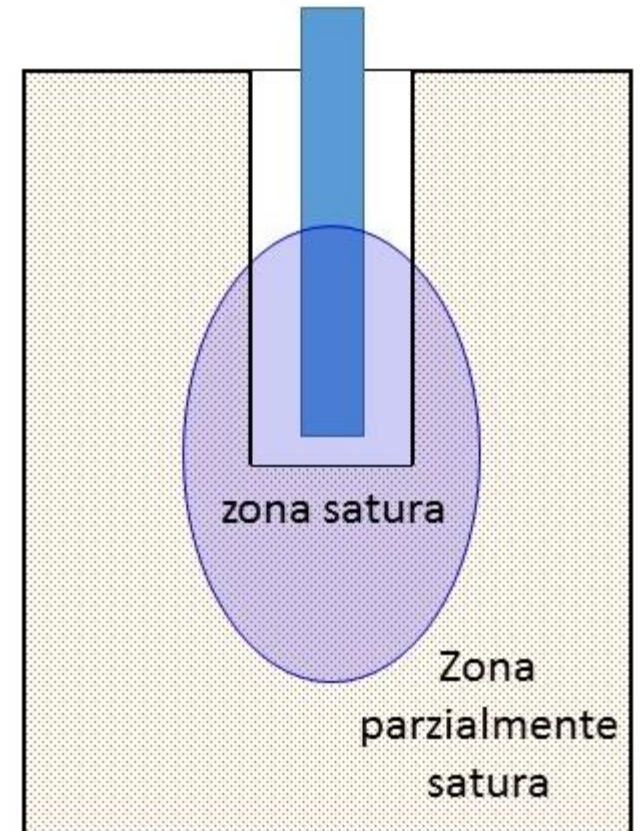
con D' = profondità del fronte umido determinato con tensiometri o con misure visive



Prova di permeabilità con permeametro di Guelph



Permeametro Guelph



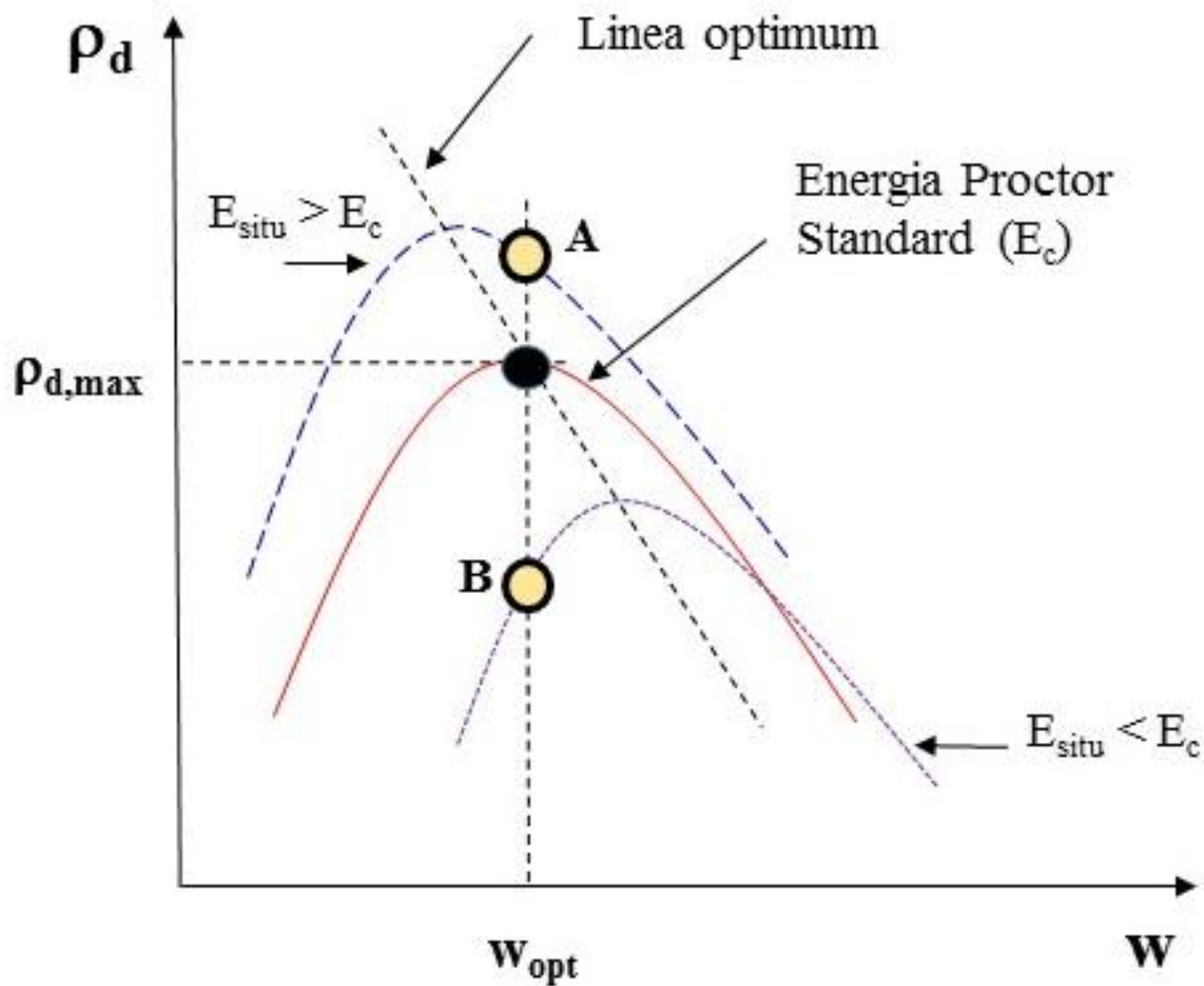
Permeametro	Vantaggi	Svantaggi
Boutwell	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apparecchiatura poco costosa 2. Installazione facile 3. k_v e k_H possono essere determinati 4. eseguibile anche su pendio 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coinvolge un piccolo volume di barriera 2. Non si tiene in conto della saturazione parziale della barriera 3. Tempi di prova lunghi per terreni con $k_v \approx 10^{-10}$ m/s
Infiltrometro a doppio anello chiuso (SDRI)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apparecchiatura dal costo moderato 2. k_v può essere determinato 3. Adatto a terreni con $k_v \approx 10^{-10}$ m/s 4. Coinvolge un grande volume di barriera 5. Filtrazione verticale dall'anello interno 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tempi di prova lunghi per terreni con $k_v \approx 10^{-10}$ m/s 2. Deve essere stimato lo spessore del fronte umido 3. Non eseguibile su pendio
Guelph	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apparecchiatura dal costo moderato 2. Tempi di prova contenuti 3. Può essere valutata l'uniformità della compattazione 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Può essere stimato solo un k medio 2. Coinvolge un piccolo volume di barriera 3. Le eterogeneità della barriera condizionano il risultato finale 4. Più adatto per terreni con $k_v < 10^{-8}$ m/s

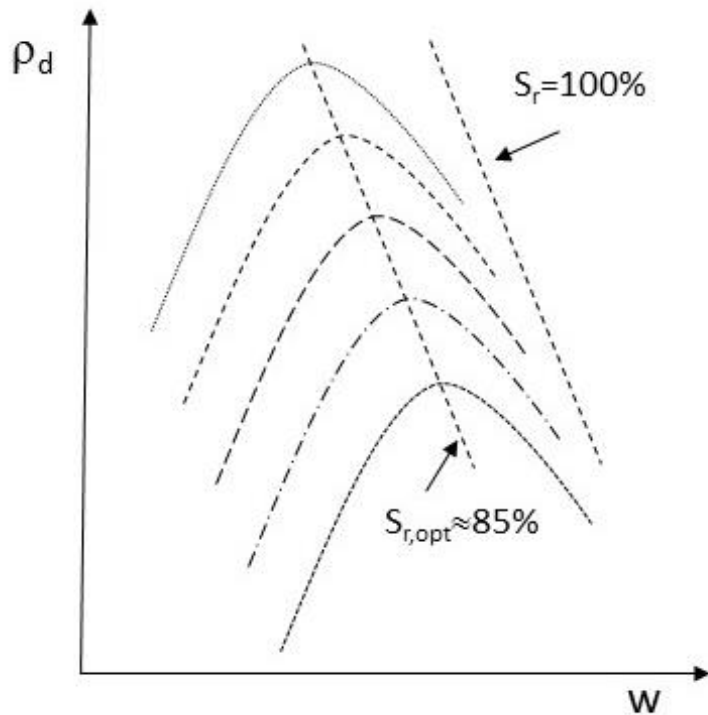
1-normativa vigente

2-fattori che influenzano k

3-prove permeabilità LAB/SITU

4-proposte e conclusioni

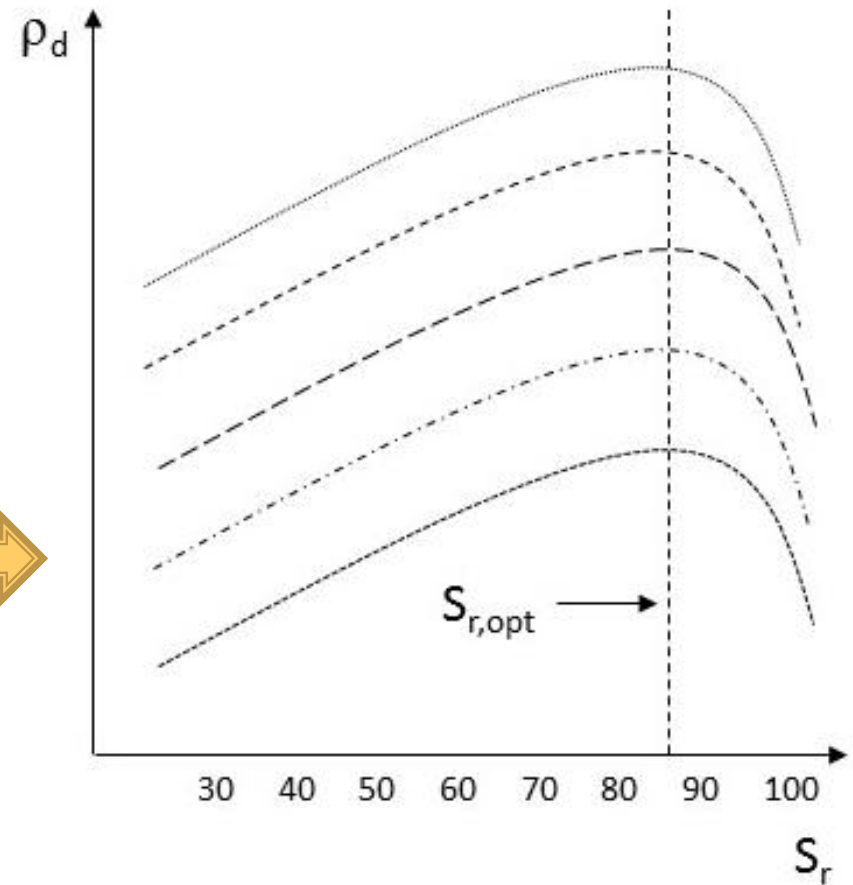




Interpretazione classica della
**densità secca in funzione del
contenuto d'acqua**

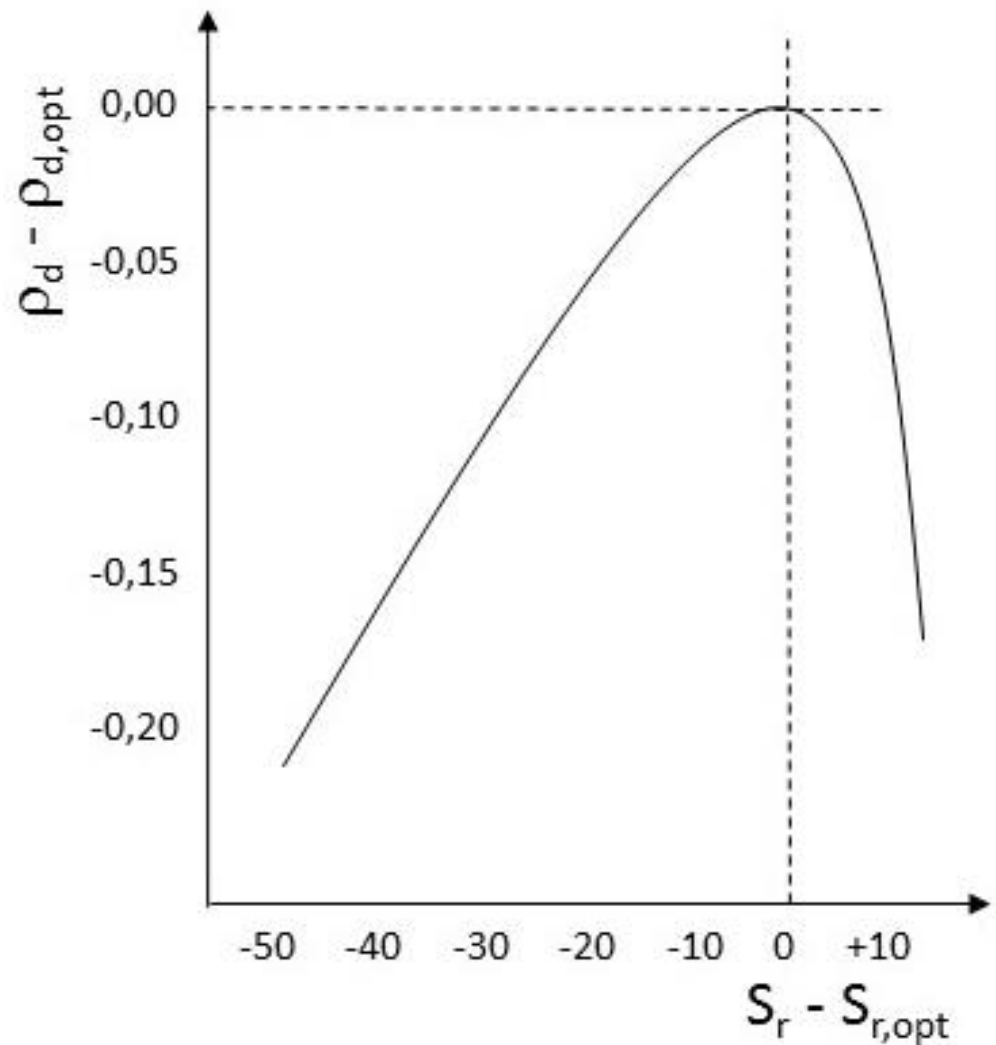
**densità secca in funzione del
grado di saturazione**

i picchi di densità secca vengono
conseguiti in corrispondenza del
grado di saturazione registrato
all'optimum



Normalizzazione della densità secca e del grado di saturazione – le curve tendono a sovrapporsi (indipendentemente dall'energia di compattazione impiegata) in particolare in prossimità dell'optimum.

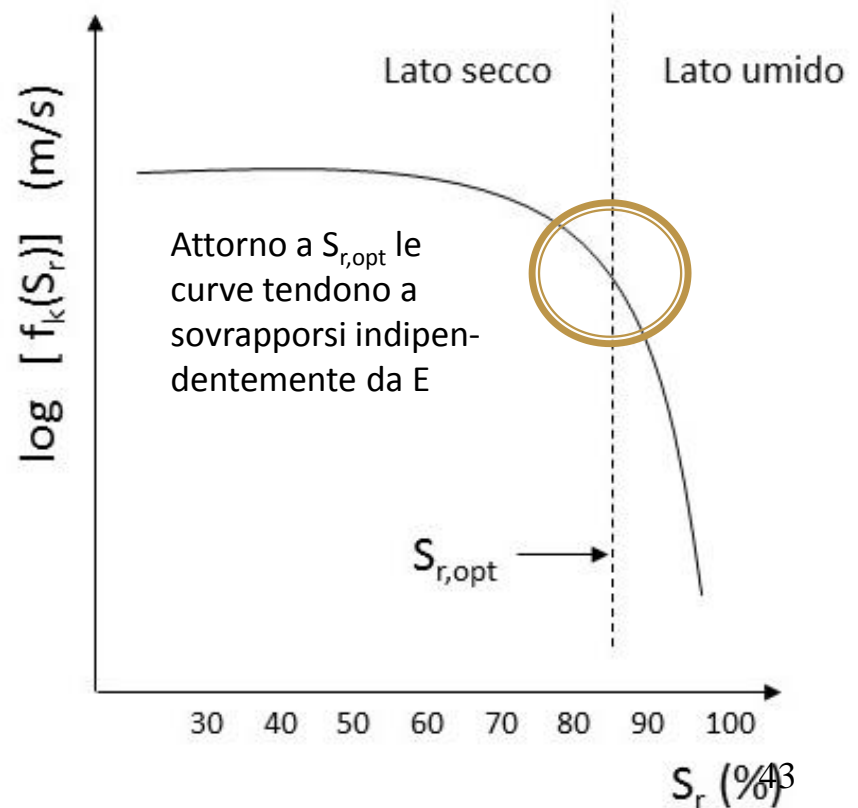
Questa non dipendenza dall'energia di compattazione risulta particolarmente interessante in quanto **l'energia impiegata in situ differisce più o meno da quella impiegata in laboratorio** con le prove Proctor standard e modificata

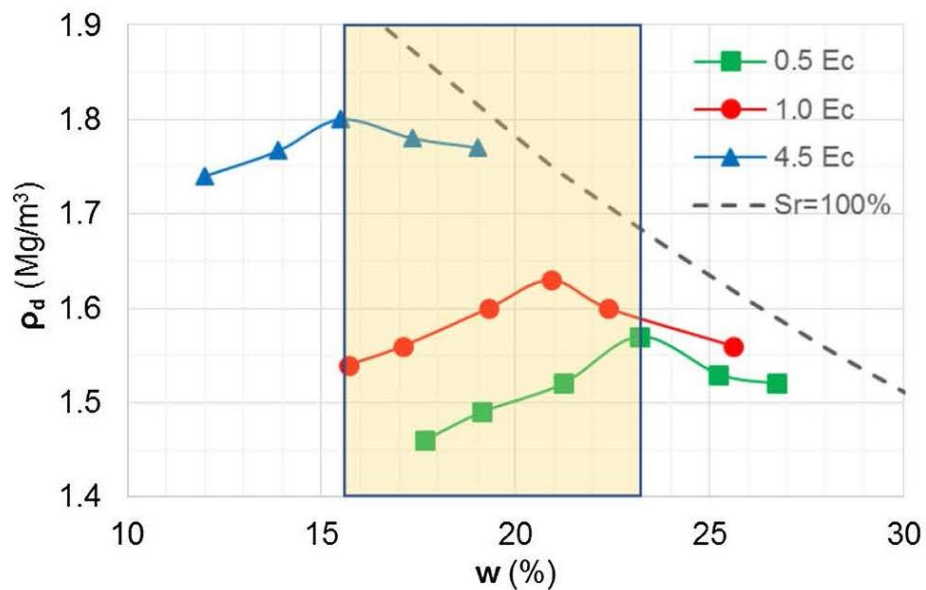


$$\log k = \alpha [\rho_{d,\max, 1 \text{ Ec}} - \rho_d] / \rho_w + \log f_k(S_r),$$

$$f_k(S_r) = \frac{k}{10^\alpha [\rho_{d,\max, 1 \text{ Ec}} - \rho_d] / \rho_w}.$$

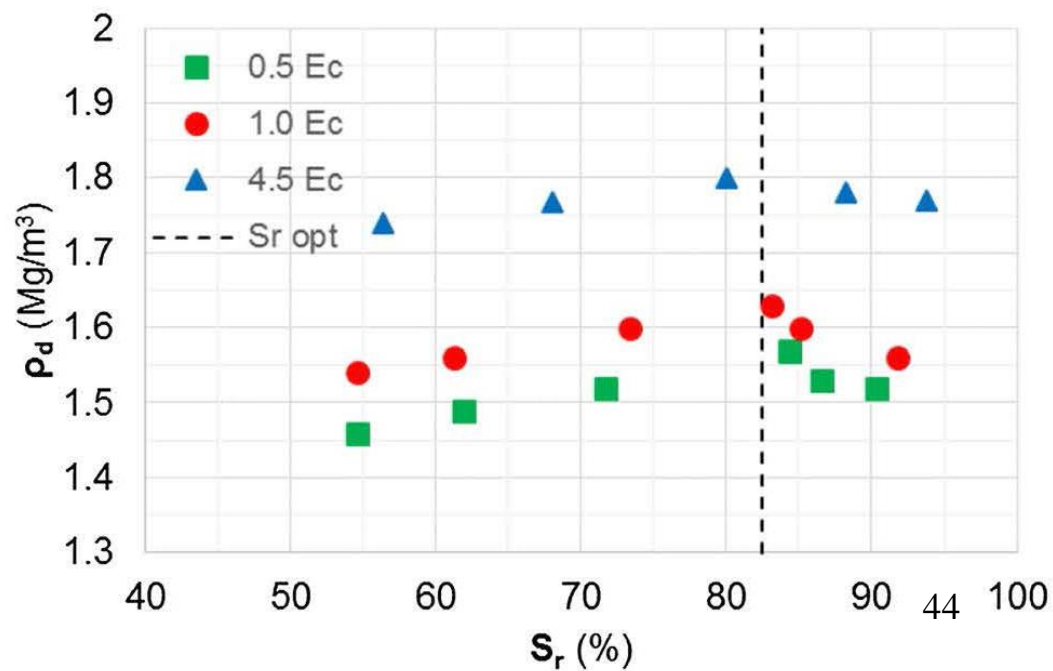
Tatsuoka, 2013

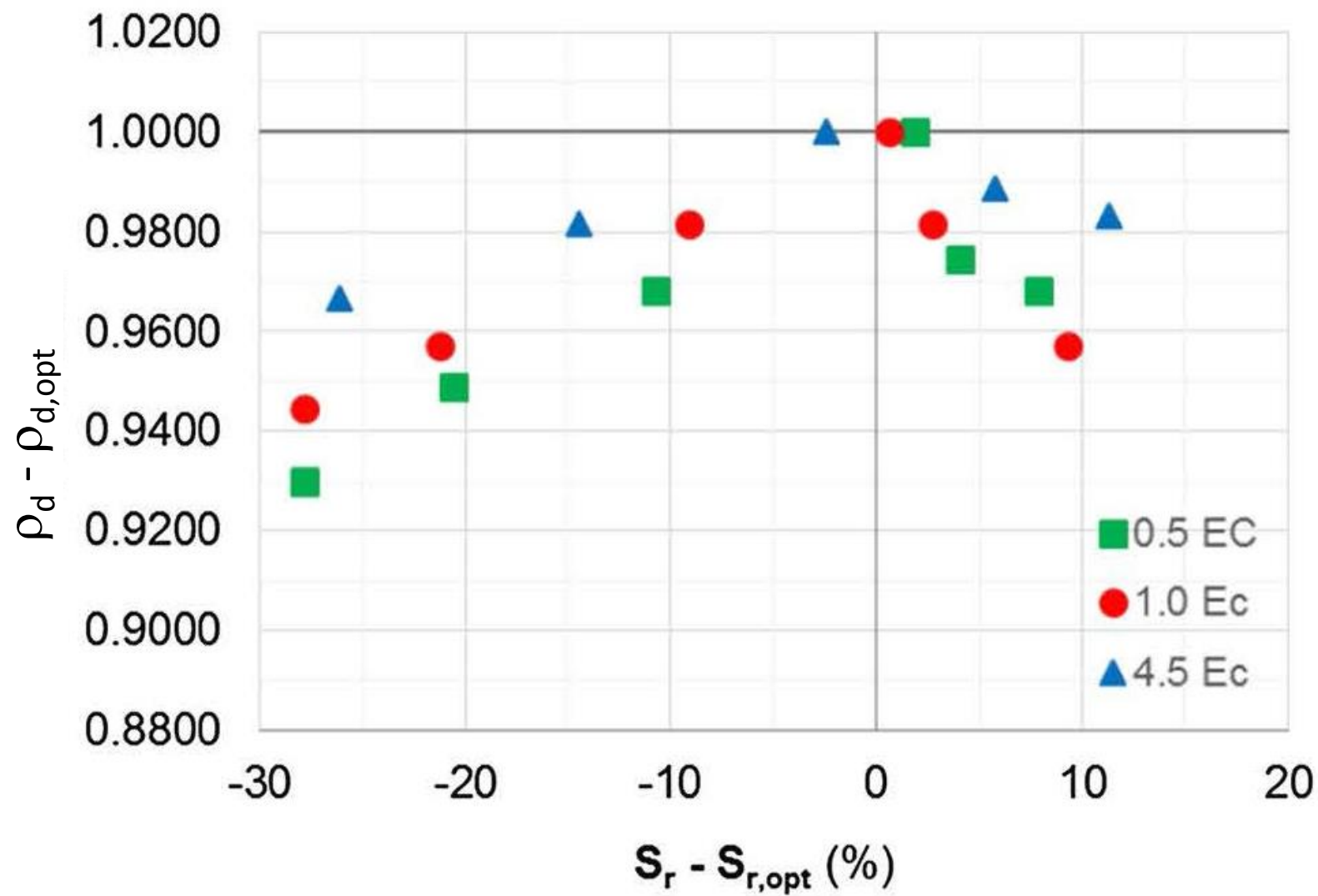




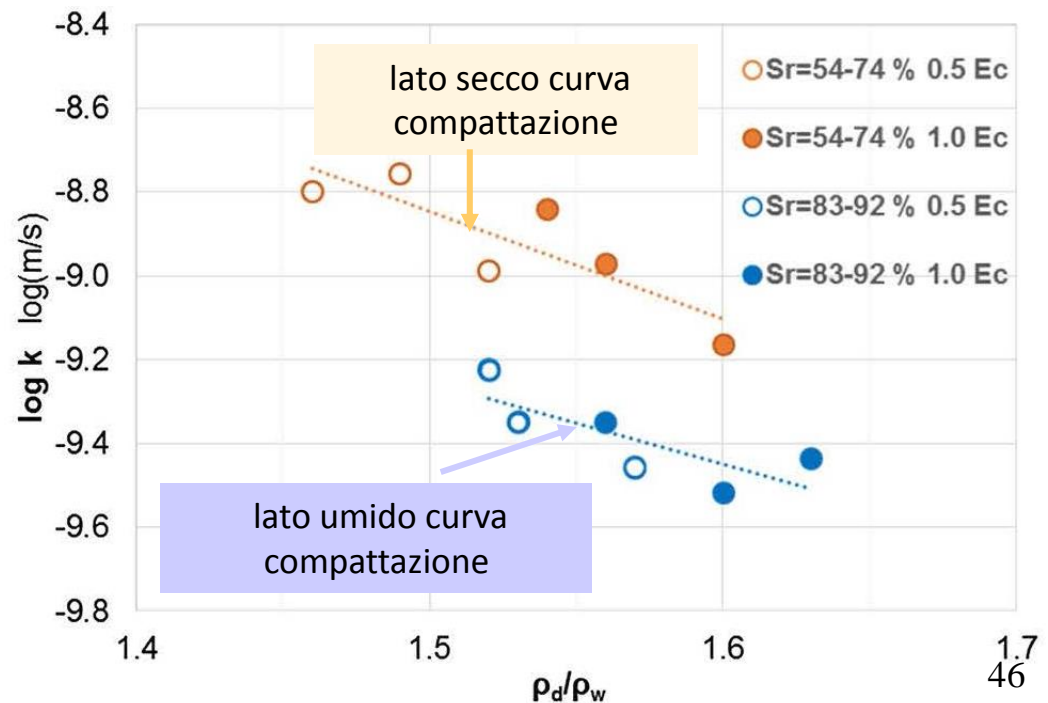
**Densità secca in
funzione del
contenuto d'acqua**

**Densità secca in
funzione del grado
di saturazione**





- ✓ k determinato con prove di permeabilità a carico costante in laboratorio
- ✓ Diagramma che correla k con w , ρ_d , S_r , $E_{1.0}$ standard e $E_{0.5}$ ridotta
- ✓ Due andamenti distinti per differenti S_r - lineari su scala semilogaritmica
- ✓ Curva superiore si riferisce a $S_r = 54 \div 74\%$ (lato SX curva di compattazione w vs. ρ_d) mentre la curva inferiore a $S_r = 83 \div 92\%$ (lato DX)
- ✓ Pendenza delle due curve molto simile
- ✓ Effetto energia trascurabile sul k medio, mentre quello S_r è rilevante



$$\log k = \alpha [\rho_{d,\max, 1 \text{ Ec}} - \rho_d] / \rho_w + \log f_k(S_r)$$

Tatsuoka, 2013

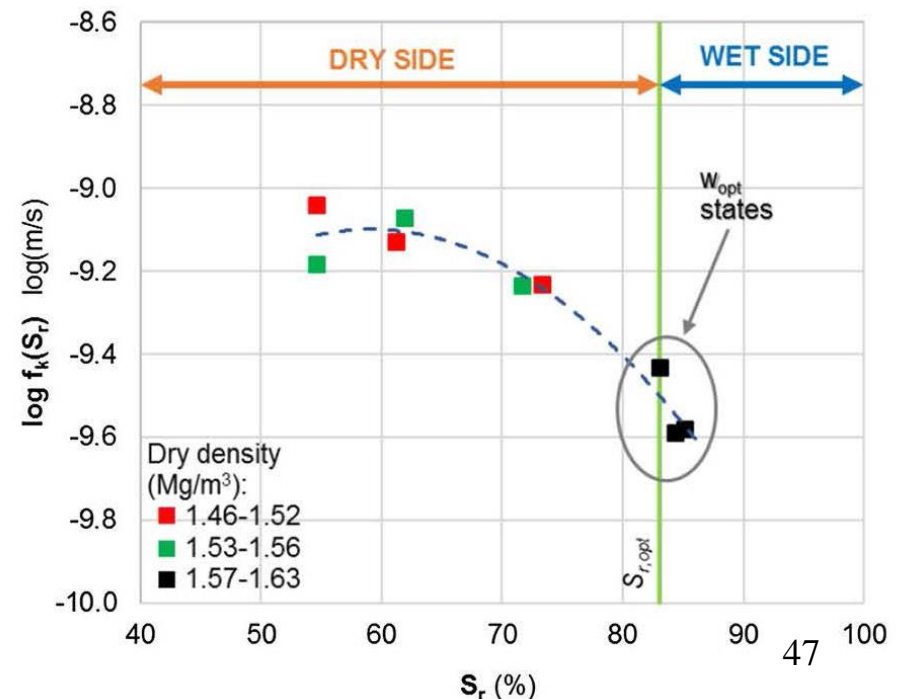
$$f_k(S_r) = \frac{k}{10^{\alpha [\rho_{d,\max, 1 \text{ Ec}} - \rho_d] / \rho_w}}$$

Relazione tra k , $\rho_{d,\text{situ}}$, $S_{r,\text{opt}}$



$$\log k = 2.26 [1.63 - \rho_d] / 1 + \log f_k(S_r)$$

$$k = 3.68 \times 10^{-10} \times 10^{2.26 [(1.63) - \rho_d] / 1}$$



Per neutralizzare l'effetto dell'energia di compattazione, i dati vengono analizzati in termini di grado di saturazione S_r e densità secca ρ_d , ottenendo una relazione analitica tra S_r , ρ_d e k . Questa fase preliminare può essere conclusa con un campo prova studiando procedura di costruzione, gli effetti del numero di passate di rullo, dimensione delle zolle, numero di strati compattati ecc..

La fase di costruzione si sviluppa attraverso la compattazione della barriera minerale in base ai risultati ottenuto durante la precedente fase di progettazione.

La fase di controllo in situ consiste nella determinazione dei parametri di progetto (w , S_r , ρ_d , k). Interpretare adeguatamente questi dati sperimentali è possibile allo stesso tempo per conoscere il livello di compattazione effettivo e la esatta posizione (lato asciutto o bagnato o OWC) sulla compattazione curva ($w - \rho_d$) ma specialmente per controllare la k attraverso la relazione analitica tra il coefficiente k e gli altri parametri menzionati (S_r , ρ_d) ottenuto in fase di progettazione.

Utilizzando il proposto approccio non ci sarà più bisogno di prove di permeabilità in sito che danneggiano anche porzioni di barriere difficili da riparare.

Design and construction of a compacted clay liner in cover system of a municipal solid waste (MSW) landfill using nonstandard procedures

N. Moraci, S. Busana, G. Cortellazzo, M. Favaretti, M.C. Mandaglio, and M. Schepis

Canadian Geotechnical Journal 55: 1182–1192 (2018)

A New Approach for the Design, Construction and Control of Compacted Mineral Liners of a MSW Landfill Capping

G. Cortellazzo, · M.C. Mandaglio, · S. Busana, · M. Favaretti and · N. Moraci

International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering (2020) 6:49

download: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40891-020-00234-x>

Prof. Ing. Marco Favaretti

Università di Padova Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (I.C.E.A.)

mail: marco.favaretti@unipd.it

website: www.marcofavaretti.net