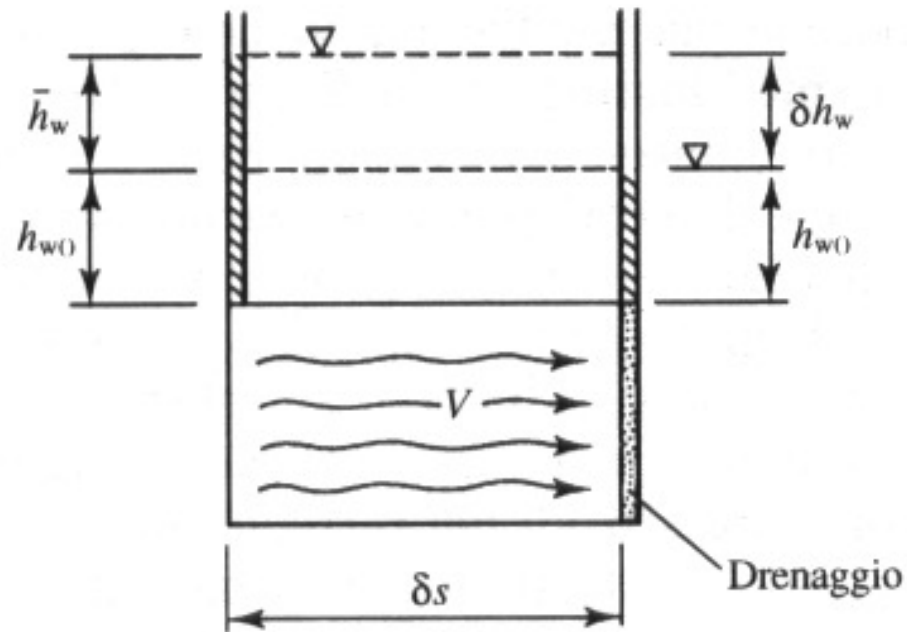


STABILITA' DEI PENDII E OPERE DI SOSTEGNO

prof. ing. Nunziante Squeglia

3. Moti di Filtrazione nei Terreni

FILTRAZIONE IN UN MEZZO POROSO



$$v = -k \cdot i = -k \cdot \frac{\delta h_w}{\delta s}$$

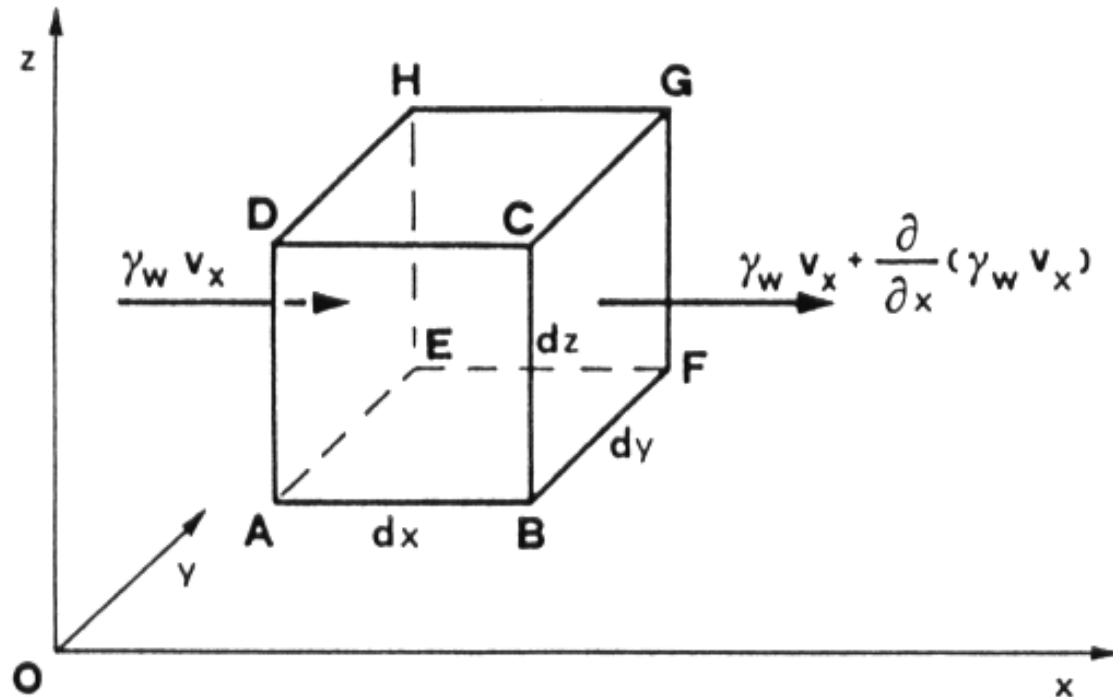
Vedi Geotecnica

COEFFICIENTE DI PERMEABILITÀ

Dimensioni delle particelle	k (m/s)
Ghiaia	$> 10^{-2}$
Sabbia	$10^{-2} - 10^{-5}$
Limo	$10^{-5} - 10^{-8}$
Argilla	$< 10^{-8}$

Vedi Geotecnica

FLUSSO DI MASSA IN UN VOLUME ELEMENTARE



$$F = \left[\gamma_w v_x + \frac{\partial(\gamma_w v_x)}{\partial x} dx \right] dy \cdot dz - \gamma_w v_x dy \cdot dz = \frac{\partial(\gamma_w v_x)}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz$$

Vedi Geotecnica

In assenza di variazione di massa nel volume elementare

$$\frac{\partial(\gamma_w v_x)}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz + \frac{\partial(\gamma_w v_y)}{\partial y} dx \cdot dy \cdot dz + \frac{\partial(\gamma_w v_z)}{\partial z} dx \cdot dy \cdot dz = 0$$

Se il fluido è ipotizzato incompressibile, γ_w è costante

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Vedi Geotecnica

La legge di Darcy prevede che:

$$v_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}; \quad v_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y}; \quad v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Se il mezzo è omogeneo ed isotropo, k è costante

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Vedi Geotecnica

SOLUZIONE DEL MOTO DI FILTRAZIONE IN REGIME PERMANENTE

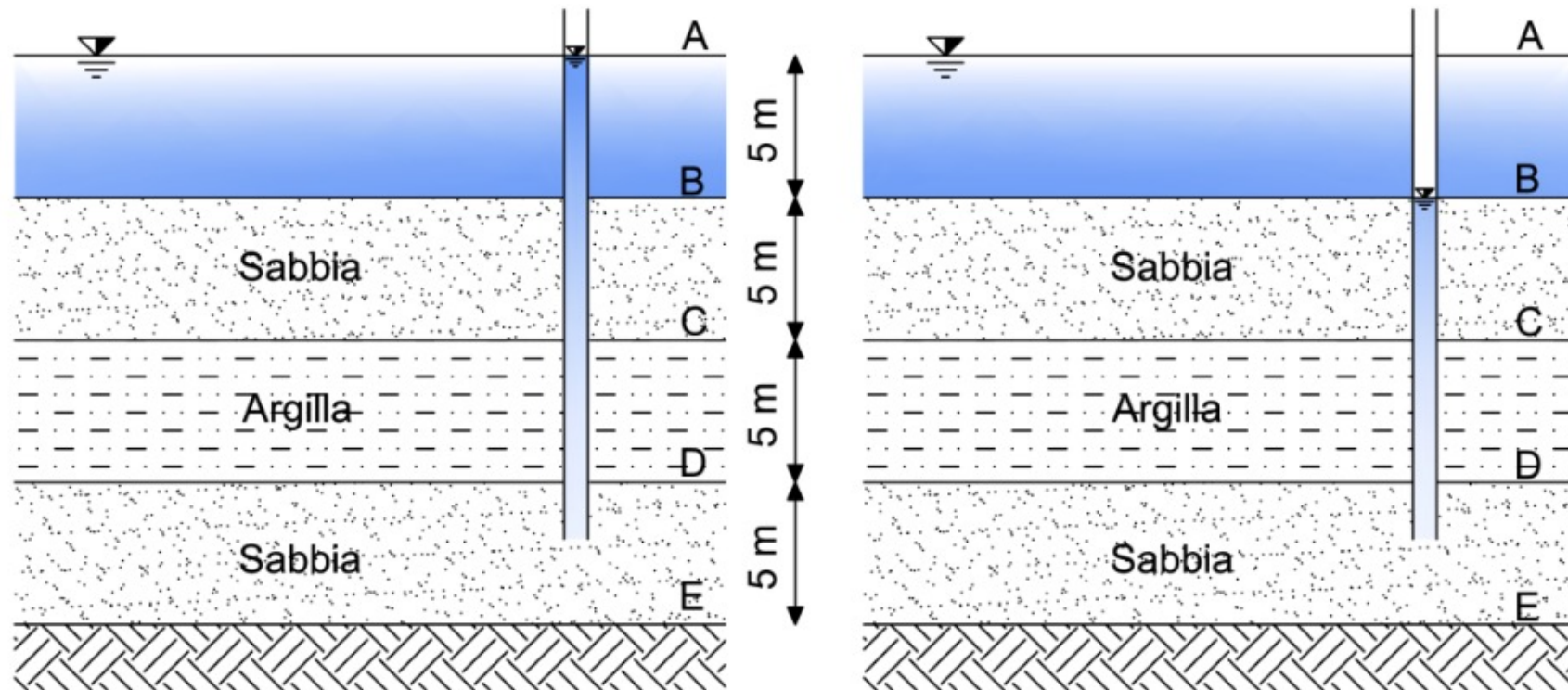
- caso monodimensionale (sifonamento, sollevamento fondo scavo)
- caso bidimensionale:
 - integrazione numerica (metodo delle differenze finite)
 - soluzione grafica (rete idrodinamica a maglie quadre)

Vedi Geotecnica

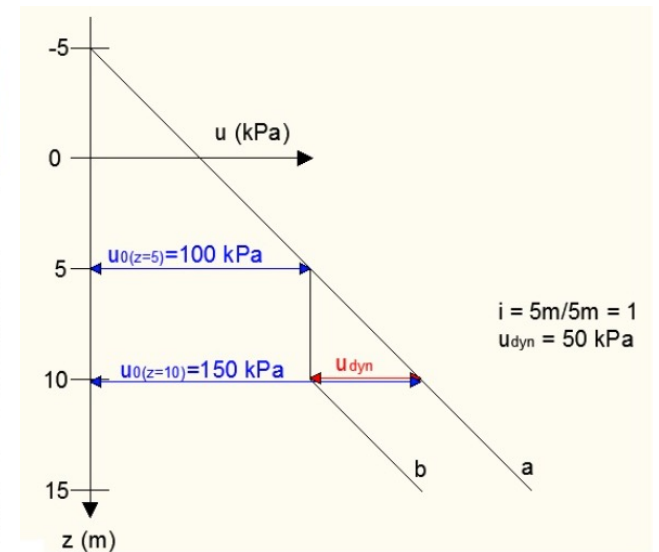
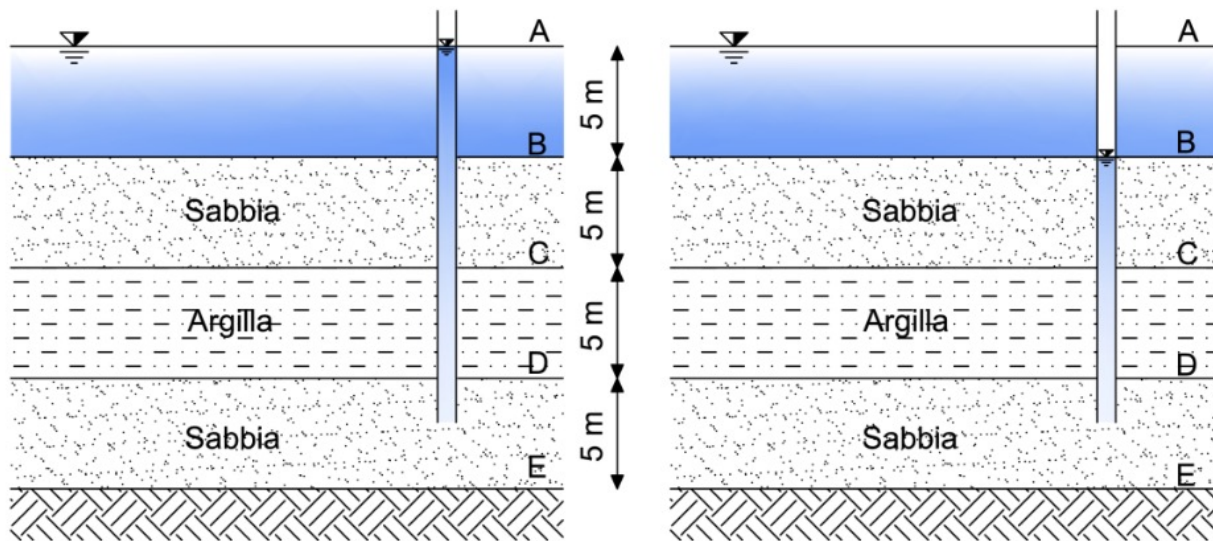
SOLUZIONE DEL MOTO DI FILTRAZIONE IN REGIME PERMANENTE

- caso monodimensionale (sifonamento, sollevamento fondo scavo)
- **caso bidimensionale confinato:**
 - integrazione numerica (metodo delle differenze finite)**
 - soluzione grafica (rete idrodinamica a maglie quadre)**
- **caso bidimensionale non confinato**
 - soluzione grafica (rete idrodinamica a maglie quadre)**
 - integrazione numerica**

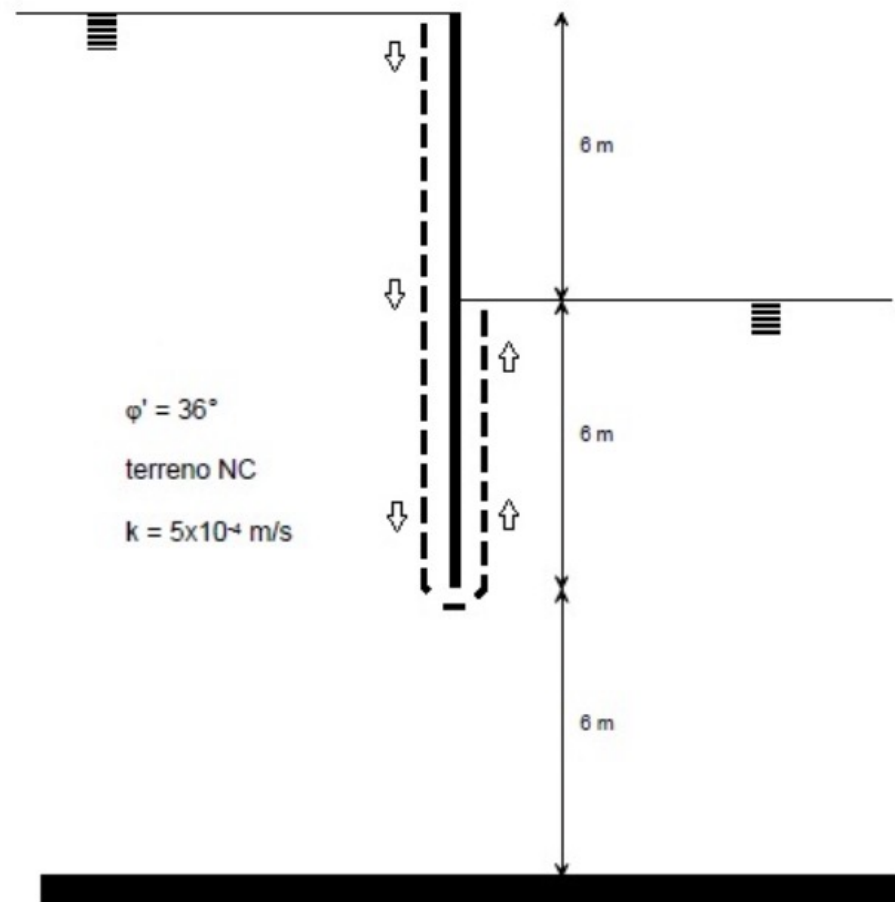
CASO MONODIMENSIONALE (Ripasso...)



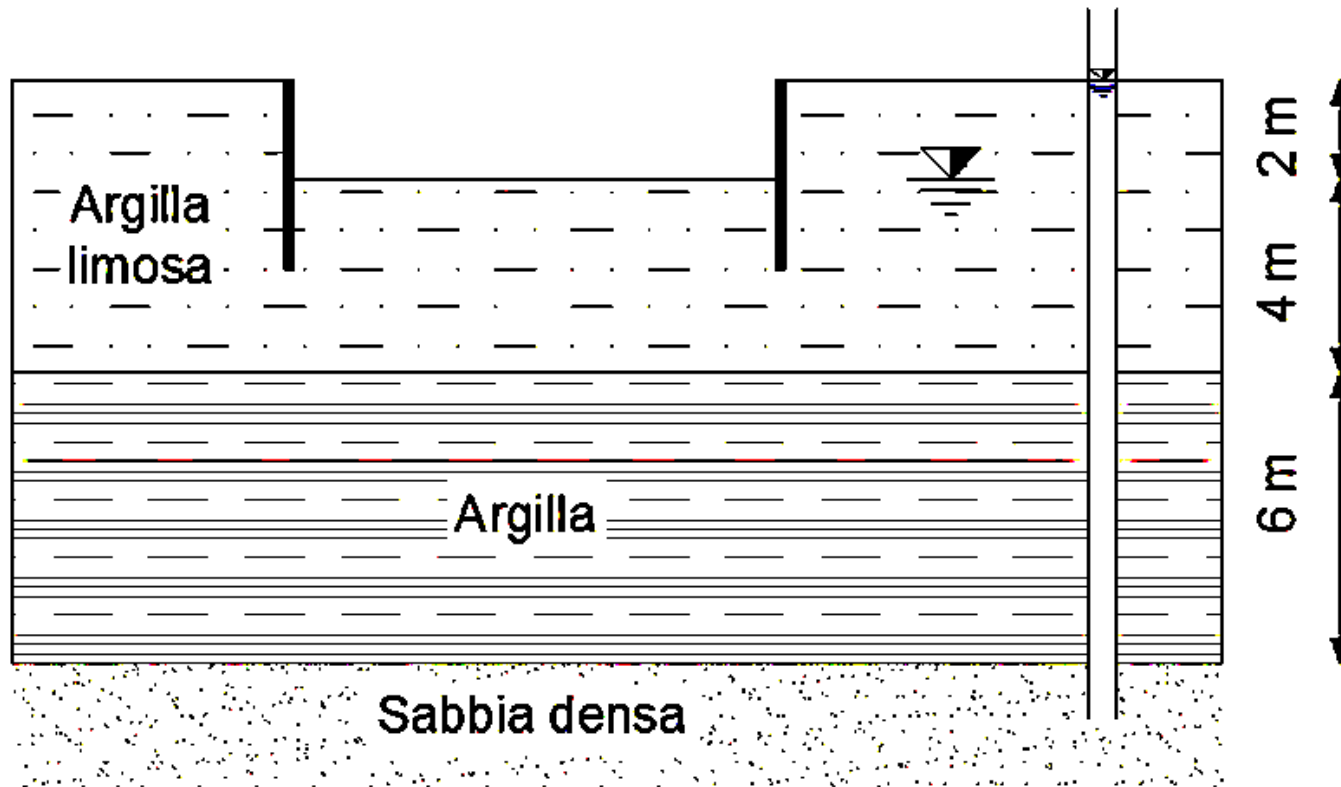
CASO MONODIMENSIONALE (Ripasso...)



CASO MONODIMENSIONALE - Sifonamento (Ripasso...)

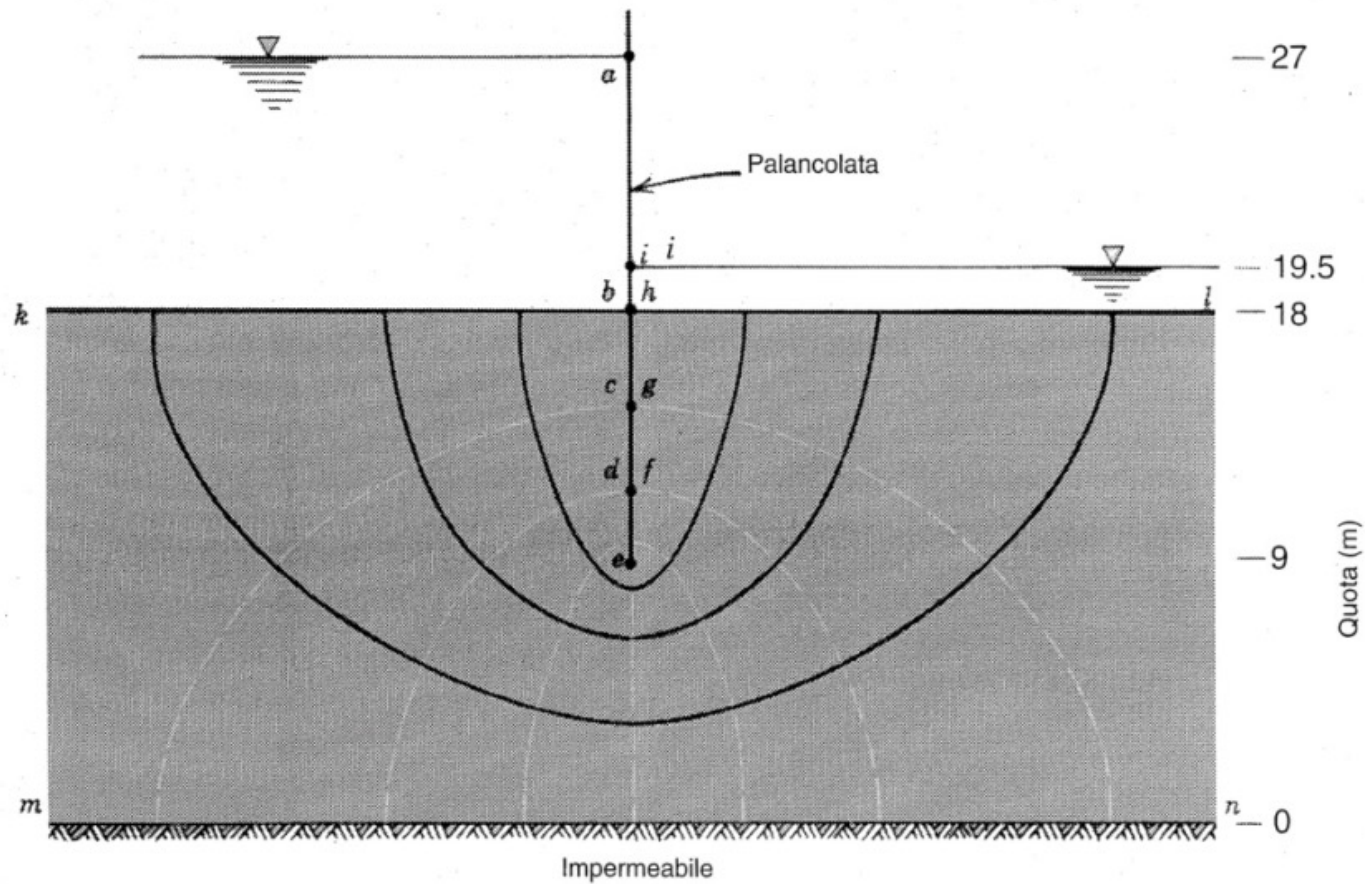


CASO MONODIMENSIONALE – Sollevamento f.s. (Ripasso...)



CASO BIDIMENSIONALE – Confinato

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right) = 0$$



CASO BIDIMENSIONALE – Confinato

Soluzione numerica mediante integrazione alle differenze finite

1. Individuazione di un reticolo di integrazione
2. Individuazione dei contorni e delle condizioni al contorno
3. Scrittura delle equazioni nei punti interni al dominio
4. Scrittura delle equazioni nei punti del contorno
5. Assemblaggio delle matrici e soluzione del sistema di eq.

CASO BIDIMENSIONALE – Confinato

Soluzione mediante integrazione **GRAFICA**

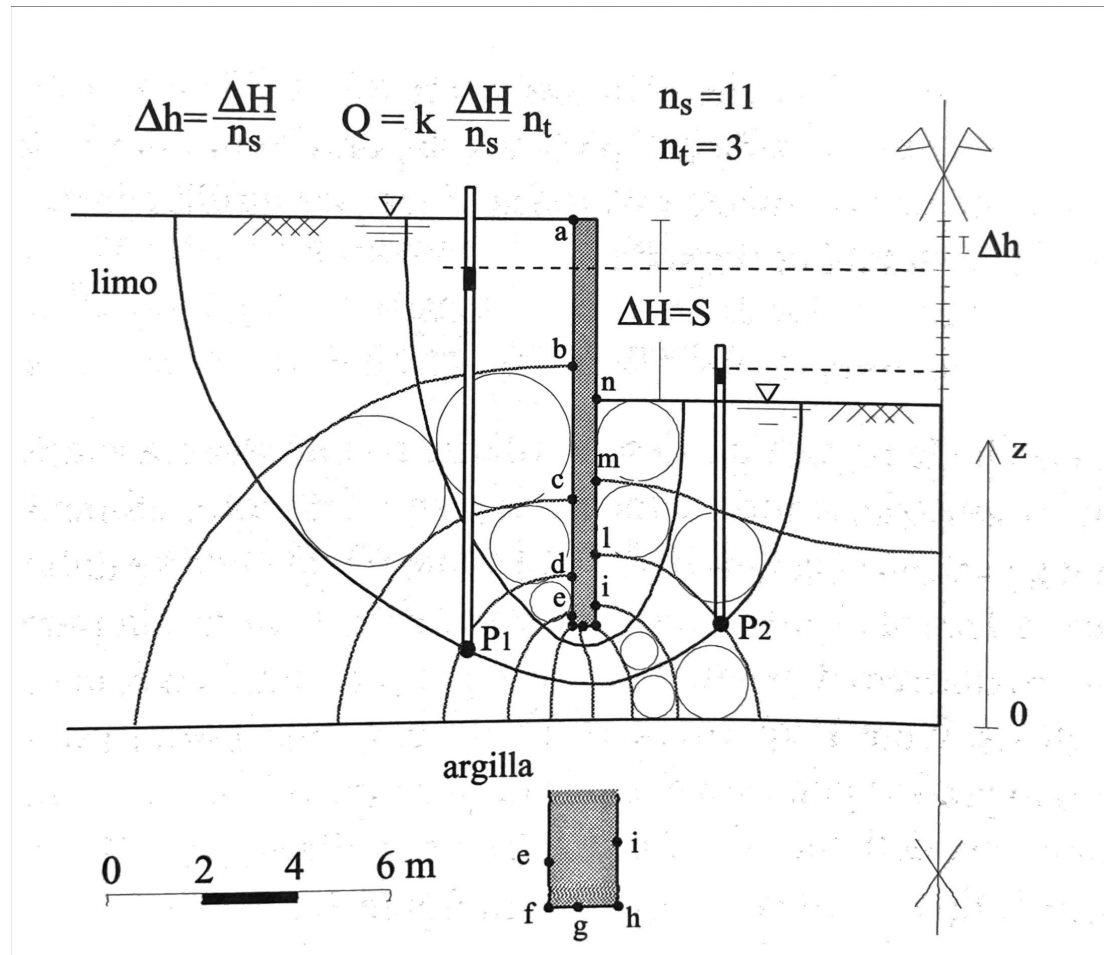
1. L'equazione di Laplace ammette l'esistenza di due famiglie di curve: le linee isopieziche o equipotenziali e le linee di flusso (mezzo isotropo);
2. L'intersezione delle linee di differente famiglia forma angoli retti;
3. Le linee appartenenti alla stessa famiglia non si incontrano in alcun punto del dominio;
4. Il rapporto tra le dimensioni medie delle «maglie» è costante

Proprietà delle reti idrodinamiche a maglie quadre.

Cambiamenti all'interfaccia tra due materiali a diversa permeabilità.

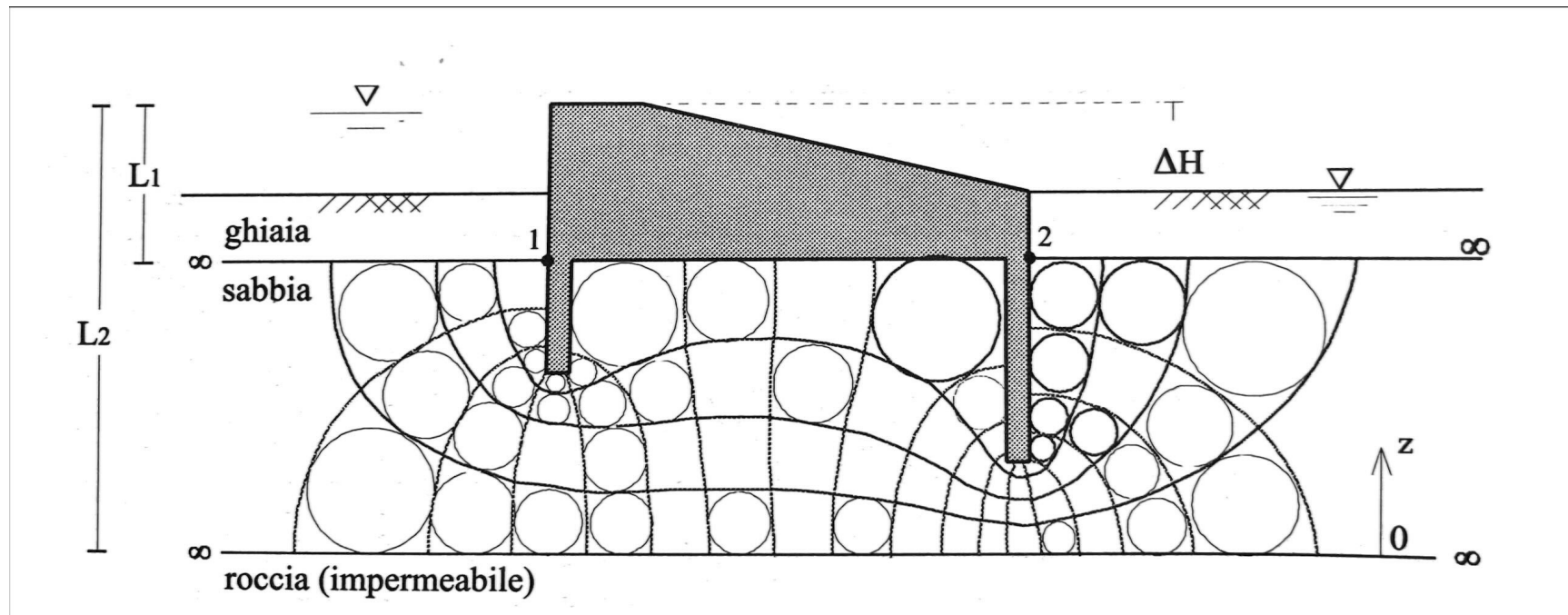
CASO BIDIMENSIONALE – Confinato

Soluzione grafica



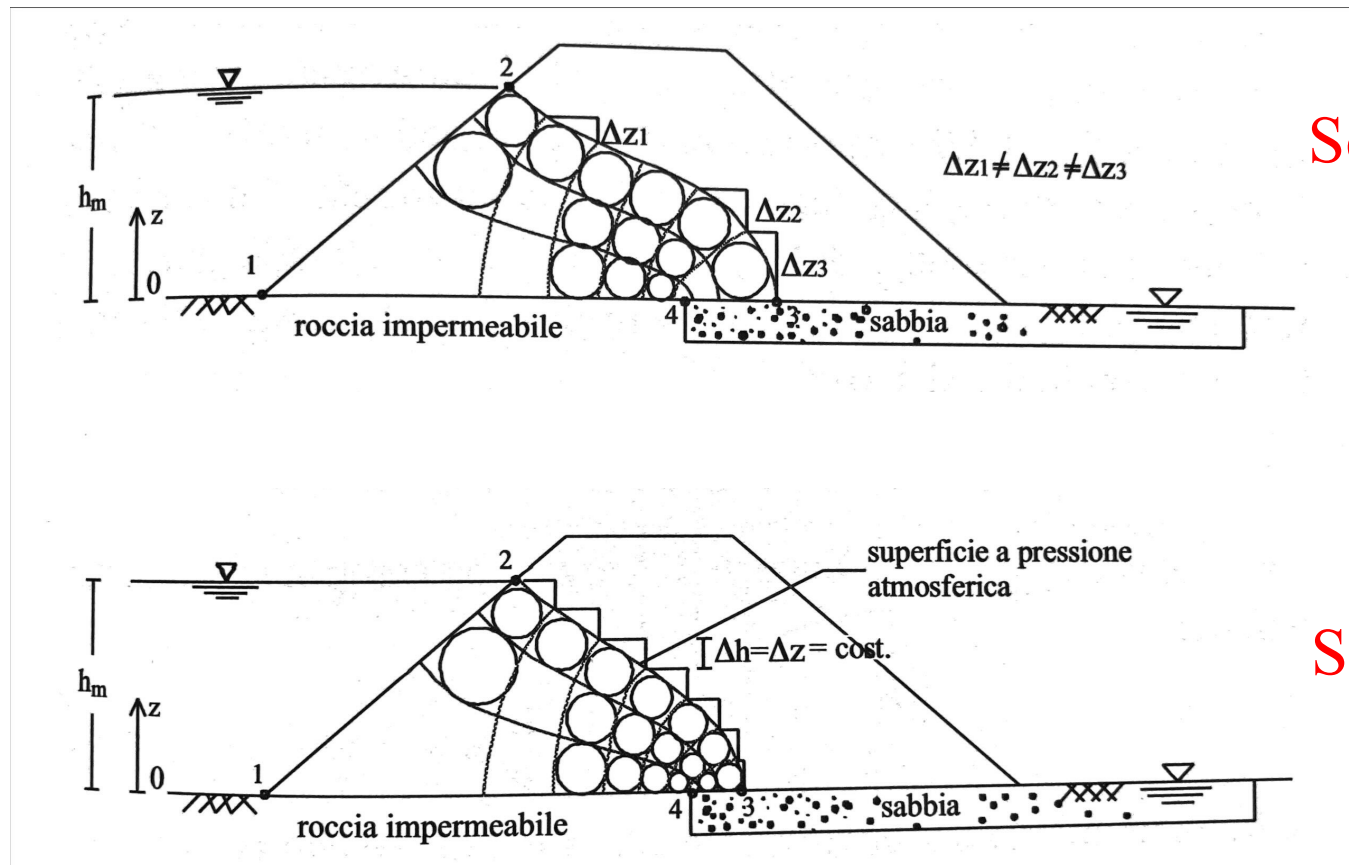
CASO BIDIMENSIONALE – Confinato

Soluzione grafica



CASO BIDIMENSIONALE – Non confinato

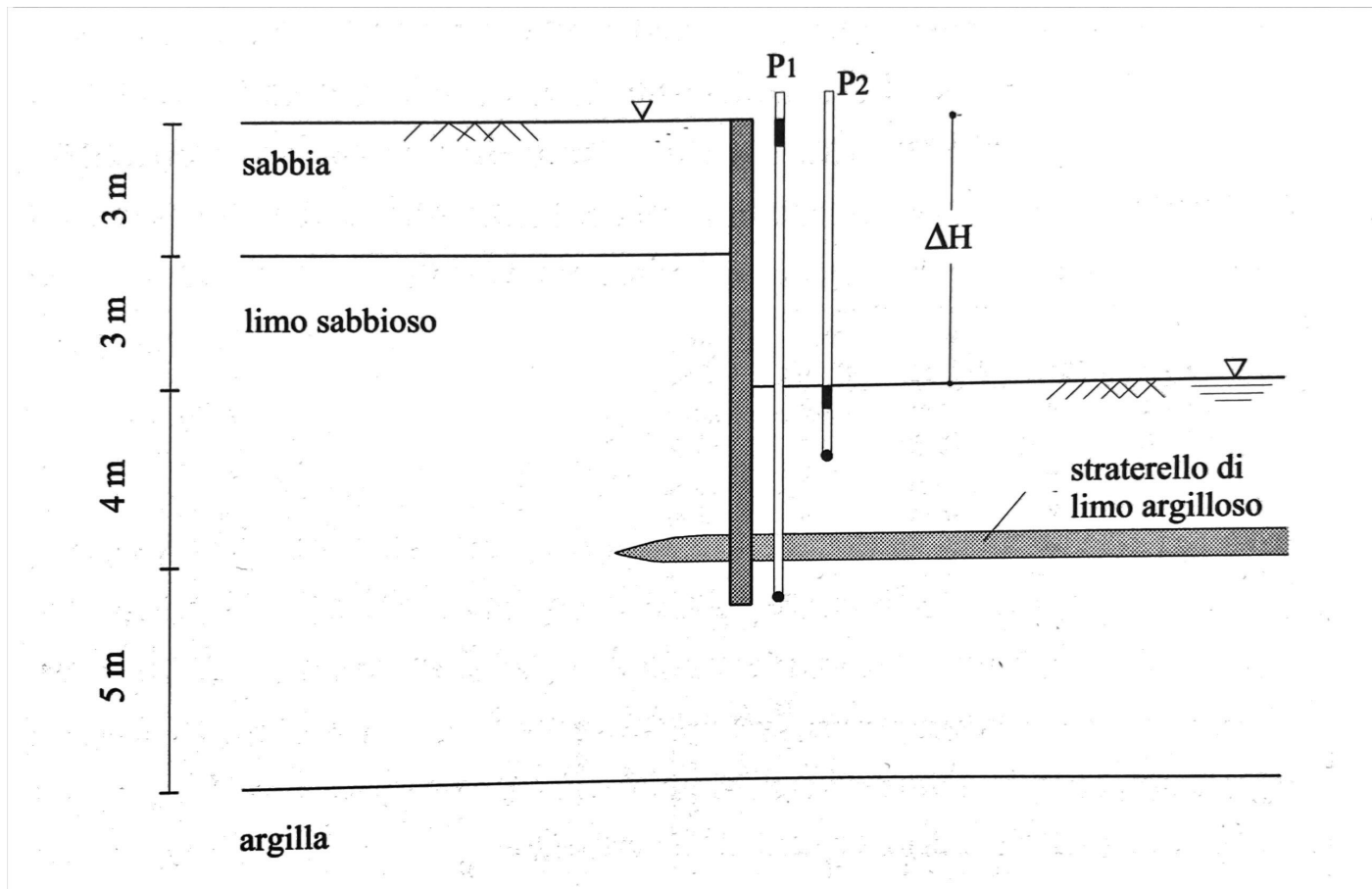
Soluzione grafica (anche la linea $u=0$ è una linea di flusso)



Scelta errata

Scelta corretta

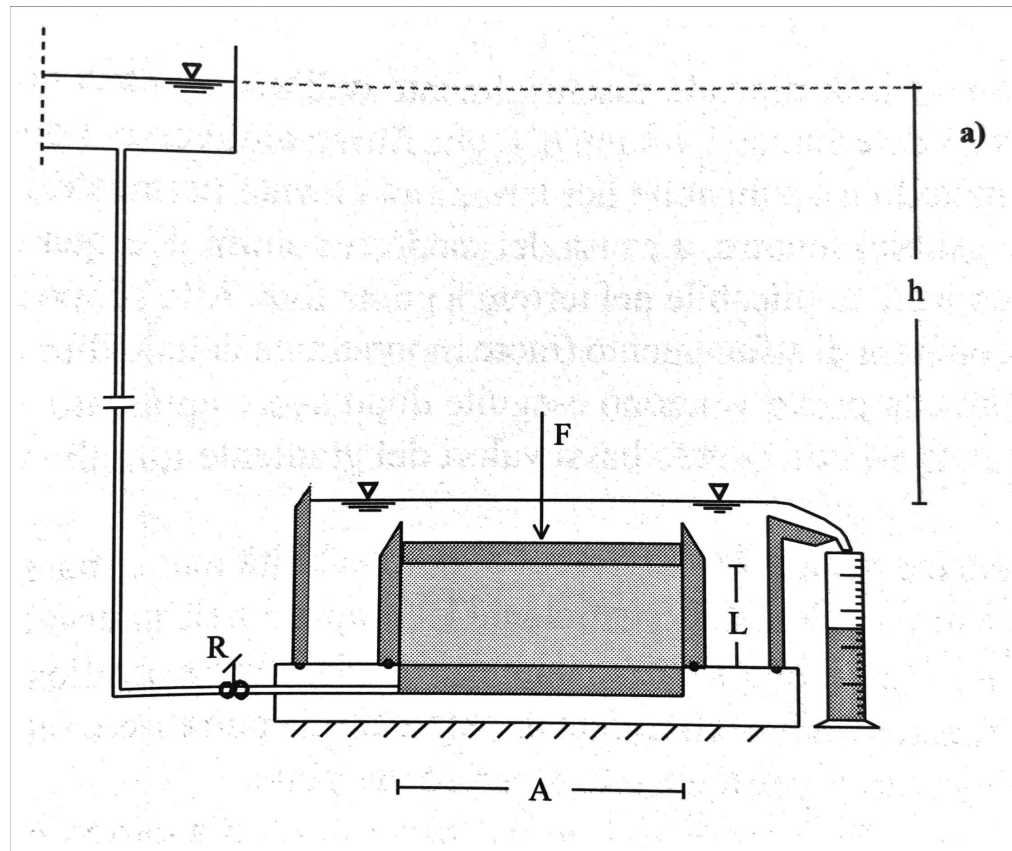
IMPORTANZA DEI DETTAGLI STRATIGRAFICI



DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA PERMEABILITA'

Prove di laboratorio

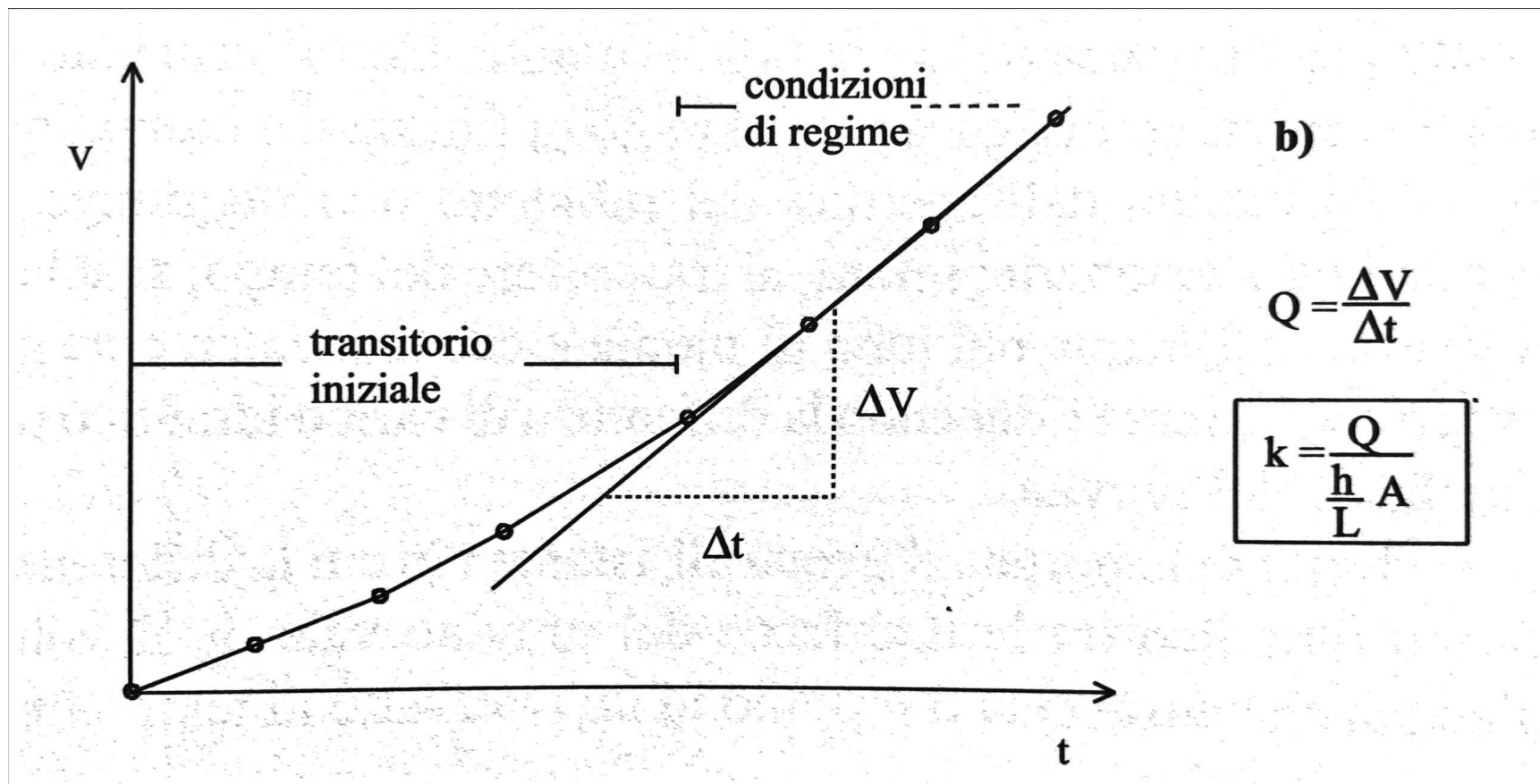
Prova a carico costante (in edometro): schema



DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA PERMEABILITA'

Prove di laboratorio

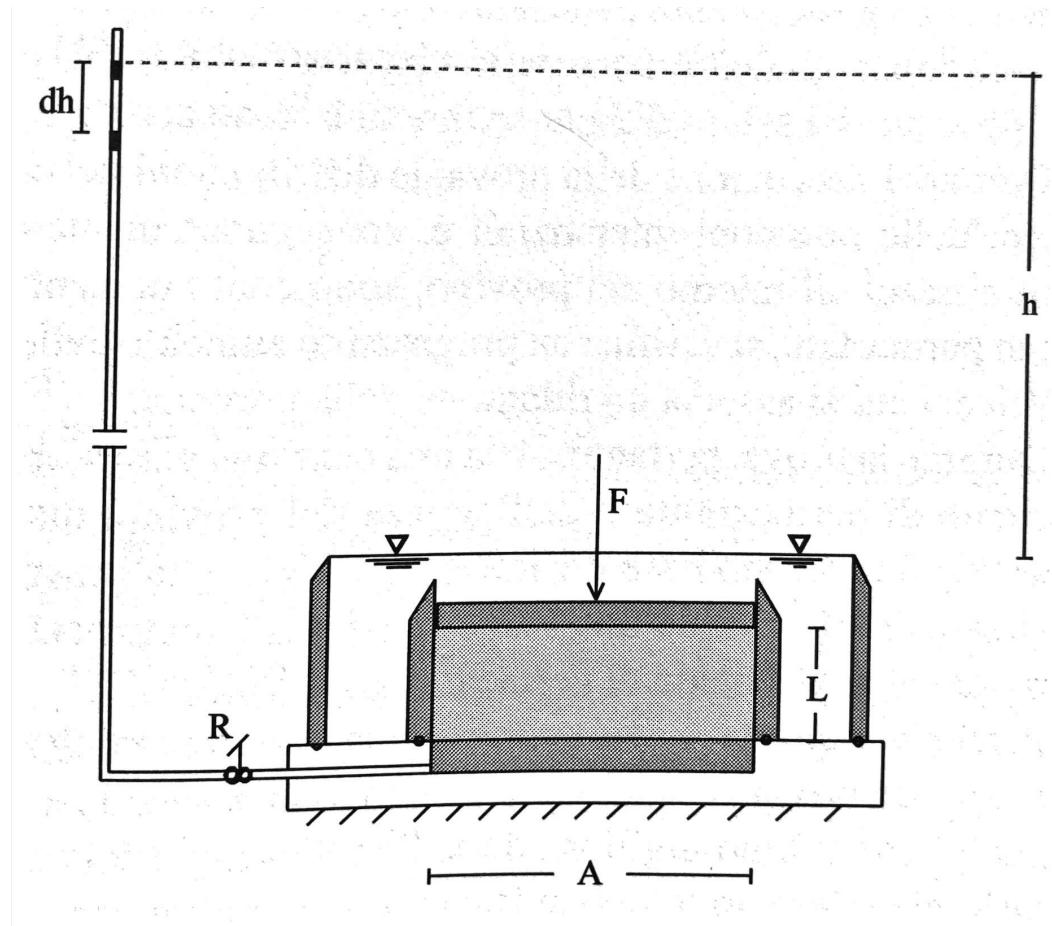
Prova a carico costante (in edometro): dati e interpretazione



DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA PERMEABILITA'

Prove di laboratorio

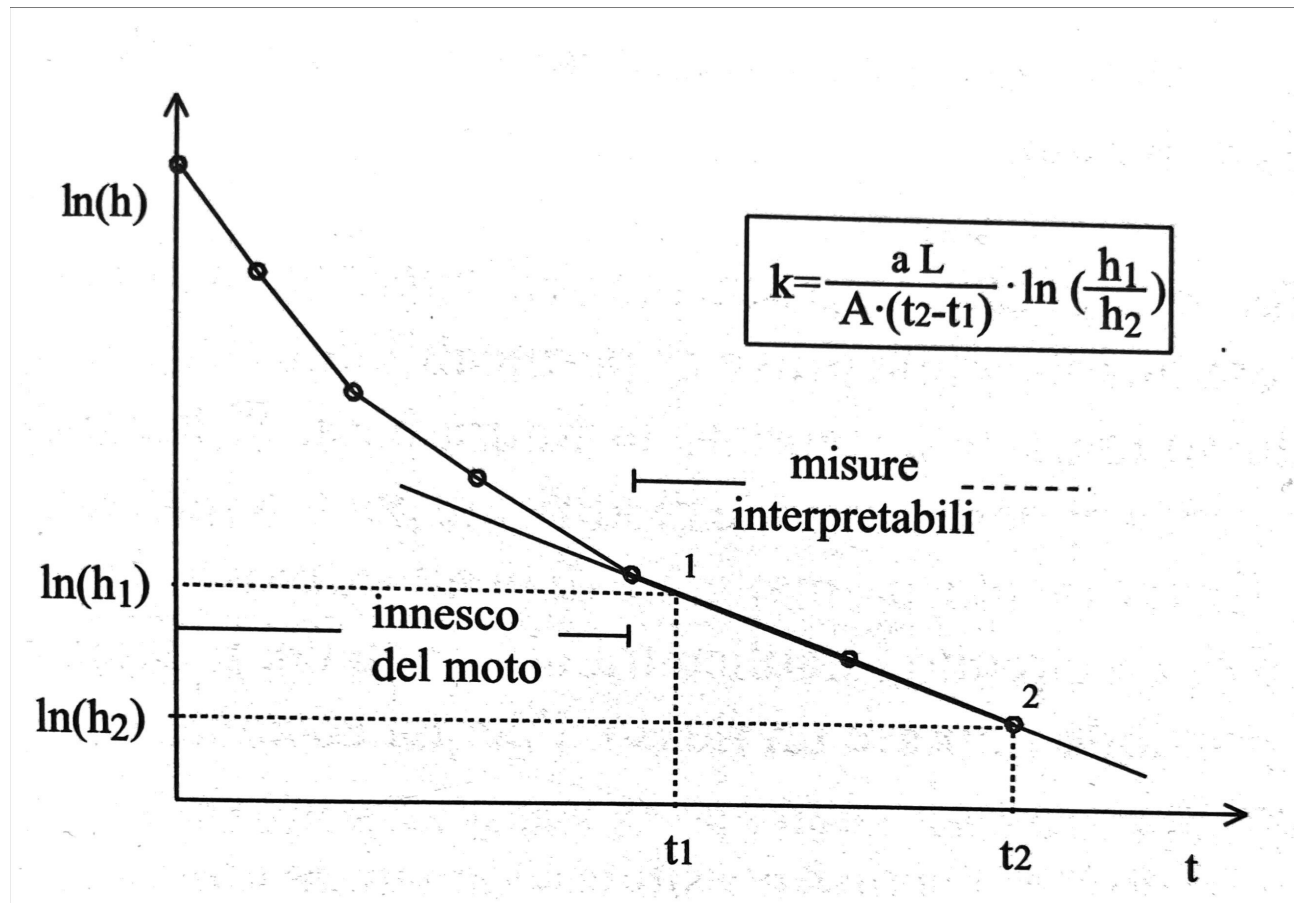
Prova a carico variabile (in edometro): schema



DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA PERMEABILITA'

Prove di laboratorio

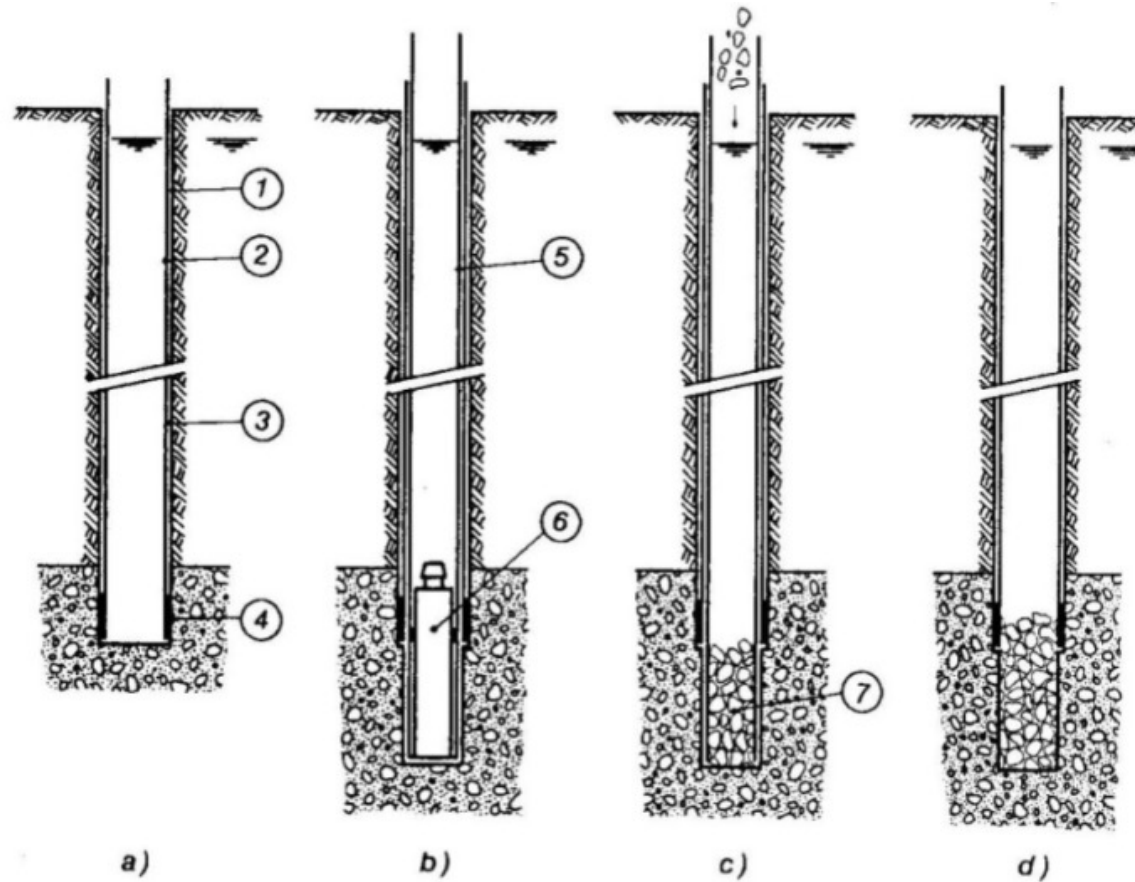
Prova a carico variabile (in edometro): dati e interpretazione



DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA PERMEABILITA'

Prove in sito

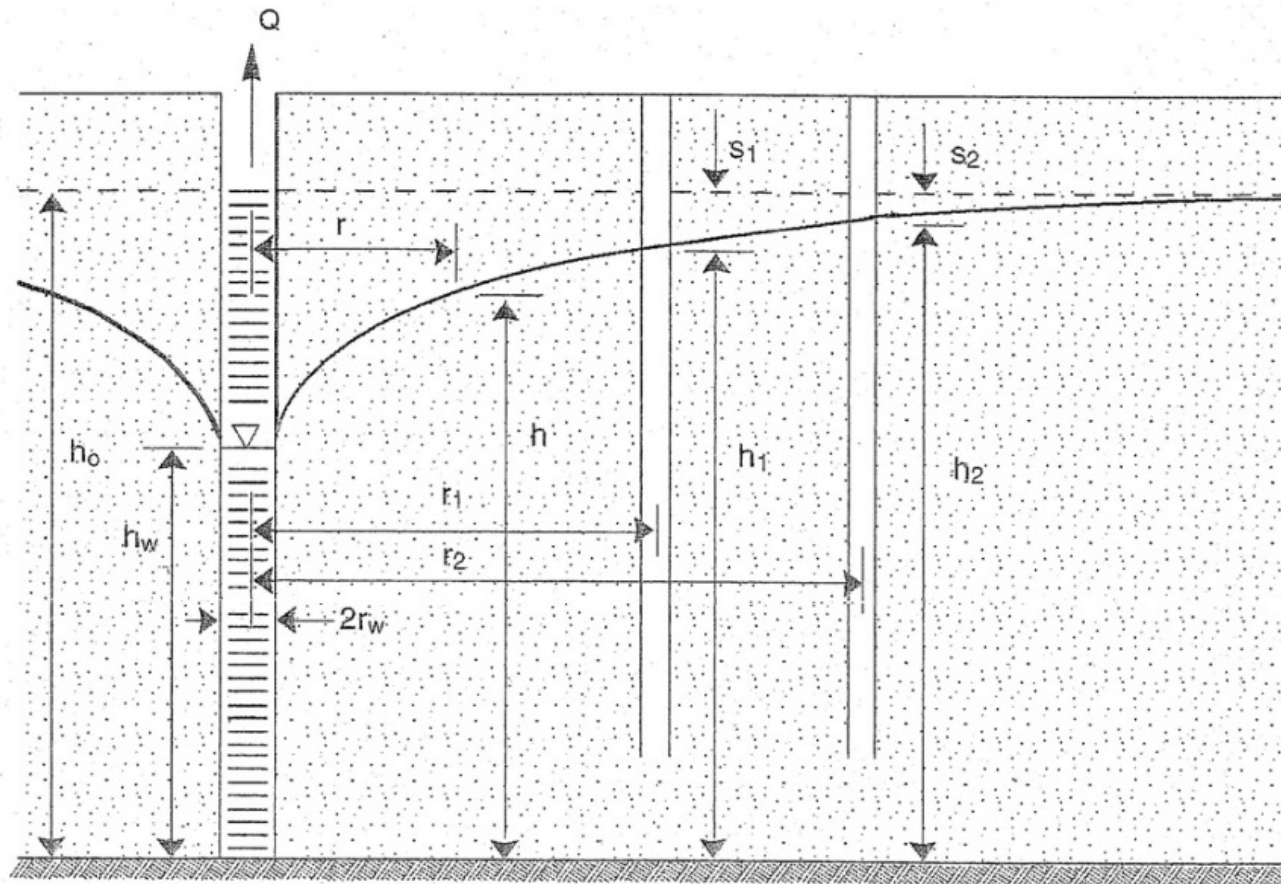
Prove tipo Lefranc



DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA PERMEABILITA'

Prove in sito

Prove di pompaggio in acquifero non confinato



**MOTO DI FILTRAZIONE A VOLUME
VARIABILE IN REGIME TRANSITORIO
(CONSOLIDAZIONE)**

Caso monodimensionale

Vedi Geotecnica

Ipotesi alla base della teoria della consolidazione

1. Il flusso e le deformazioni sono monodimensionali
 2. La fase liquida è incompressibile
 3. Il mezzo poroso è saturo
 4. La fase solida è incompressibile
 5. La legge di Darcy è valida
 6. La permeabilità è costante
7. Lo scheletro solido è elastico lineare
8. Si è nell'ipotesi di piccole deformazioni

Vedi Geotecnica

Condizione di conservazione della massa

$$\frac{\partial(\gamma_w v_z)}{\partial z} dz \cdot dx \cdot dy = - \frac{\partial(\gamma_w V_v)}{\partial t}$$

La variazione di volume dei vuoti è data da:

$$\frac{\partial(V_v)}{\partial t} = - \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} dx \cdot dy \cdot dz = - \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial t} dx \cdot dy \cdot dz$$

Vedi Geotecnica

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial t}$$

Per le ipotesi fatte:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = -k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2}; \quad \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial t} = \frac{1}{E_a} \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial t}$$

Vedi Geotecnica

$$\frac{\partial \bar{\sigma}'_z}{\partial t} = \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial t} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = - \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$$

Quindi:

$$\frac{\partial \varepsilon_z}{\partial t} = - \frac{1}{E_{ed}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$$

Vedi Geotecnica

Equazione della consolidazione monodimensionale

$$\frac{k \cdot E_{ed}}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$$

altrimenti scritta come:

$$c_v \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$$

con

$$c_v = \frac{k \cdot E_{ed}}{\gamma_w}$$

Coefficiente di consolidazione

Ponendo:

$$Z = \frac{z}{H}; \quad T = \frac{c_v t}{H^2}$$

H = “percorso di filtrazione”, cioè la distanza tra un contorno drenante ed uno impermeabile

$$\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial Z^2} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial T}$$

Vedi Geotecnica

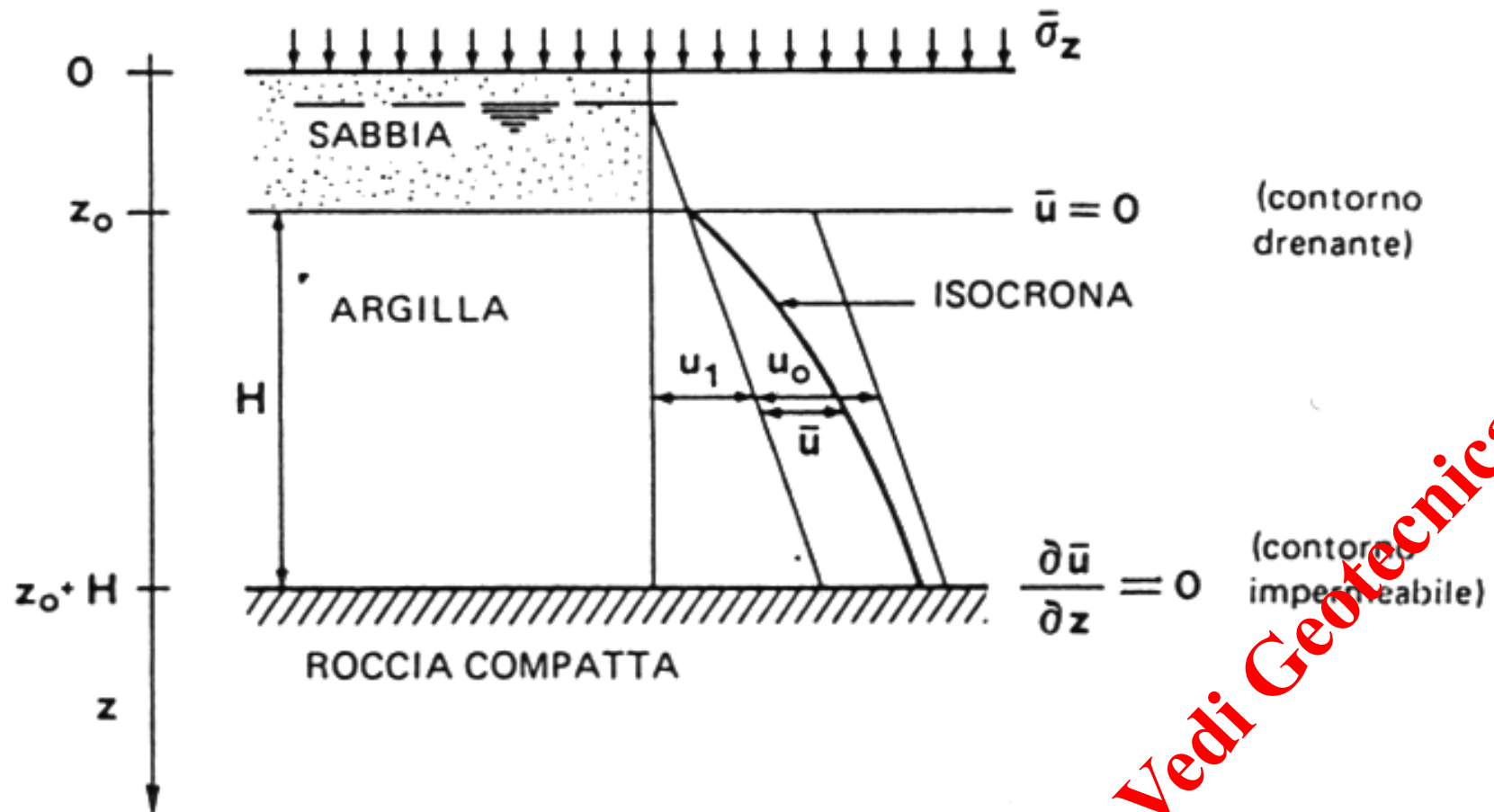
Soluzione dell'equazione differenziale

$$\bar{u}(Z, T) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2\bar{u}_0}{M} \text{sen}(MZ) \cdot e^{-M^2 T}$$

con $M = \frac{\pi}{2}(2m+1)$

Vedi Geotecnica

Schema della consolidazione monodimensionale



Grado di consolidazione

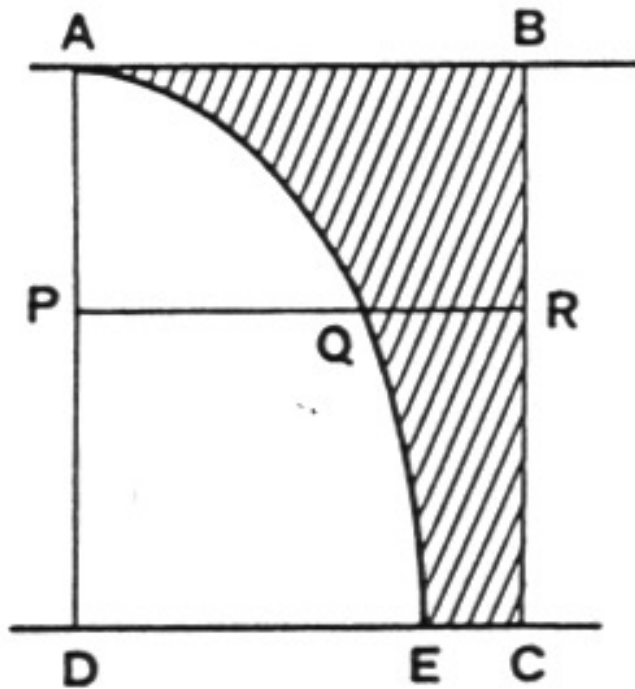
$$U(z, t) = 1 - \frac{\bar{u}(z, t)}{\bar{u}_0(z)} = \frac{\bar{u}_0(z) - \bar{u}(z, t)}{\bar{u}_0(z)}$$

Grado di consolidazione medio

$$\bar{U}(t) = 1 - \frac{\int_{z_0}^{z_0+H} \bar{u}(z, t) \cdot dz}{\int_{z_0}^{z_0+H} \bar{u}_0(z) \cdot dz} = \frac{\int_{z_0}^{z_0+H} [\bar{u}_0(z) - \bar{u}(z, t)] \cdot dz}{\int_{z_0}^{z_0+H} \bar{u}_0(z) \cdot dz}$$

Vedi Geotecnica

Interpretazione geometrica del Grado di Consolidazione

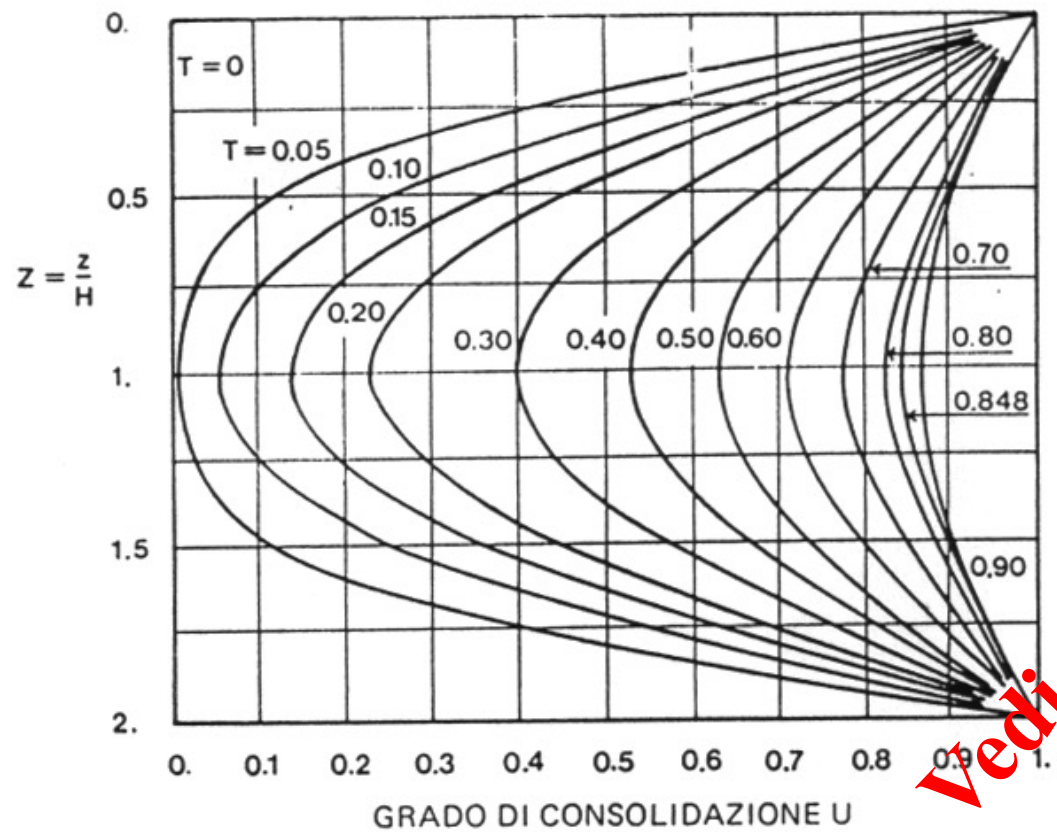


$$U = \frac{\overline{QR}}{\overline{PR}}$$

$$\bar{U} = \frac{ABCEA}{ABCD}$$

Vedi Geotecnica

Variazione del grado di consolidazione



Espressione del Grado di Consolidazione medio per
isocrona iniziale rettangolare

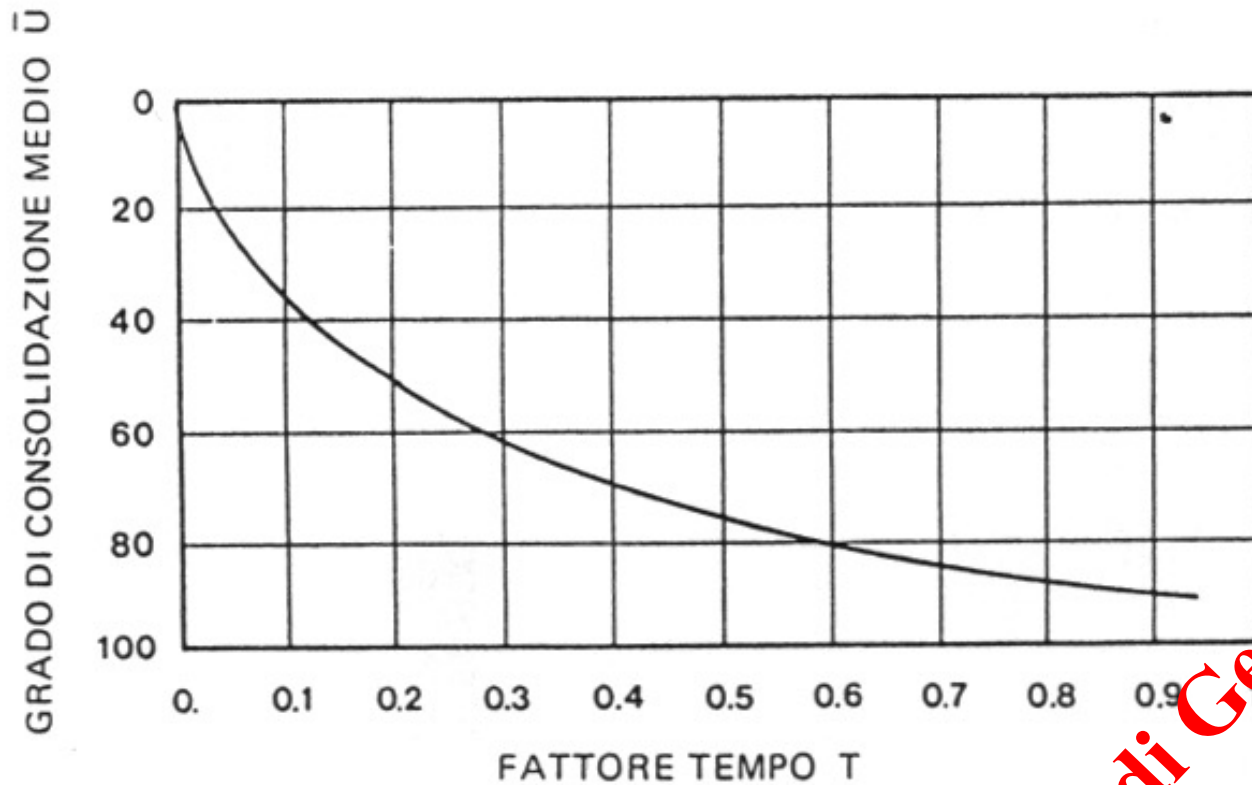
$$\bar{U}(T) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T}$$

Espressione approssimata (Sivaram e Swamee, 1977)

$$T = \frac{\pi \bar{U}^2}{4 [1 - \bar{U}^{5.6}]^{0.357}}$$

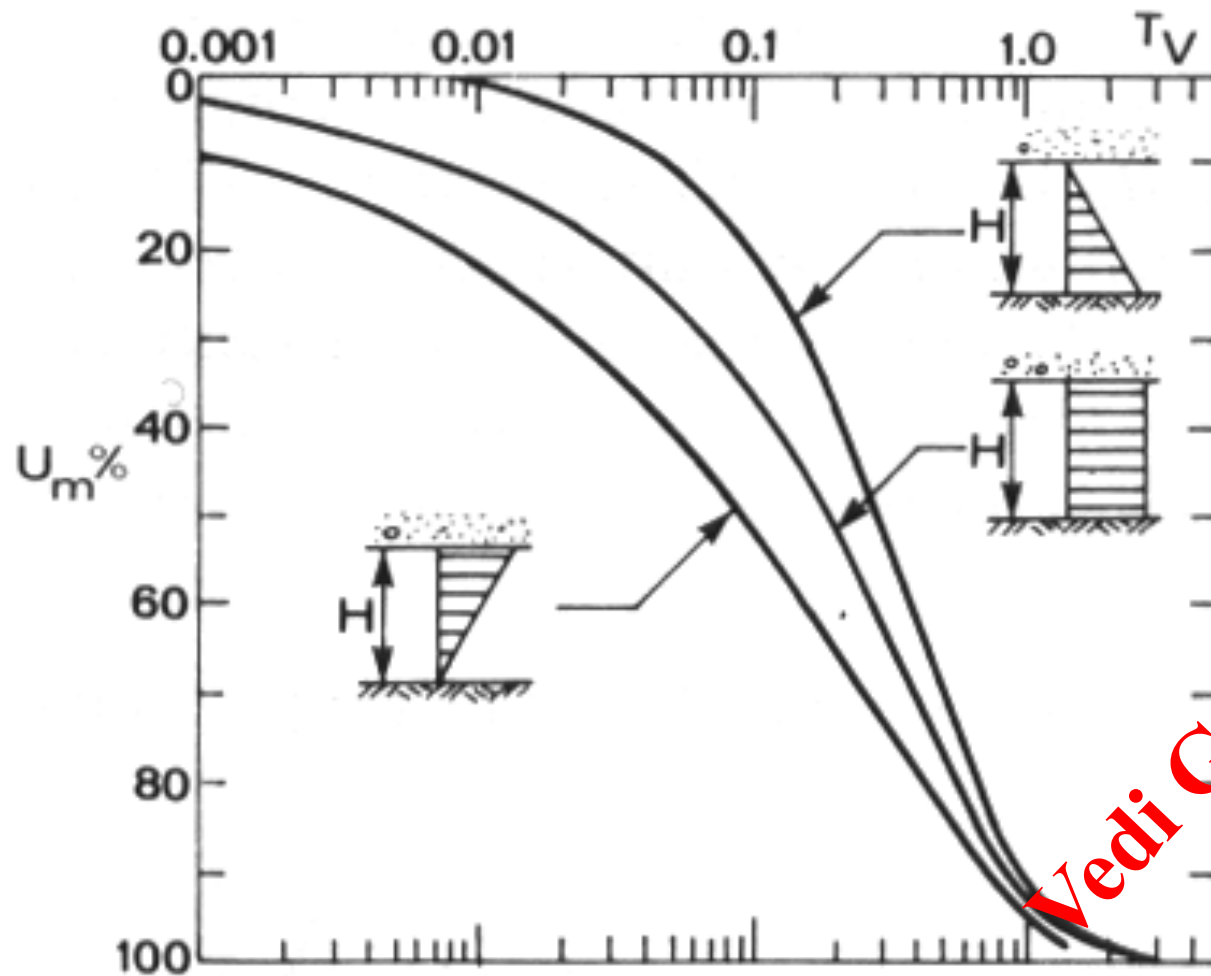
Vedi Geotecnica

Variazione del grado medio di consolidazione



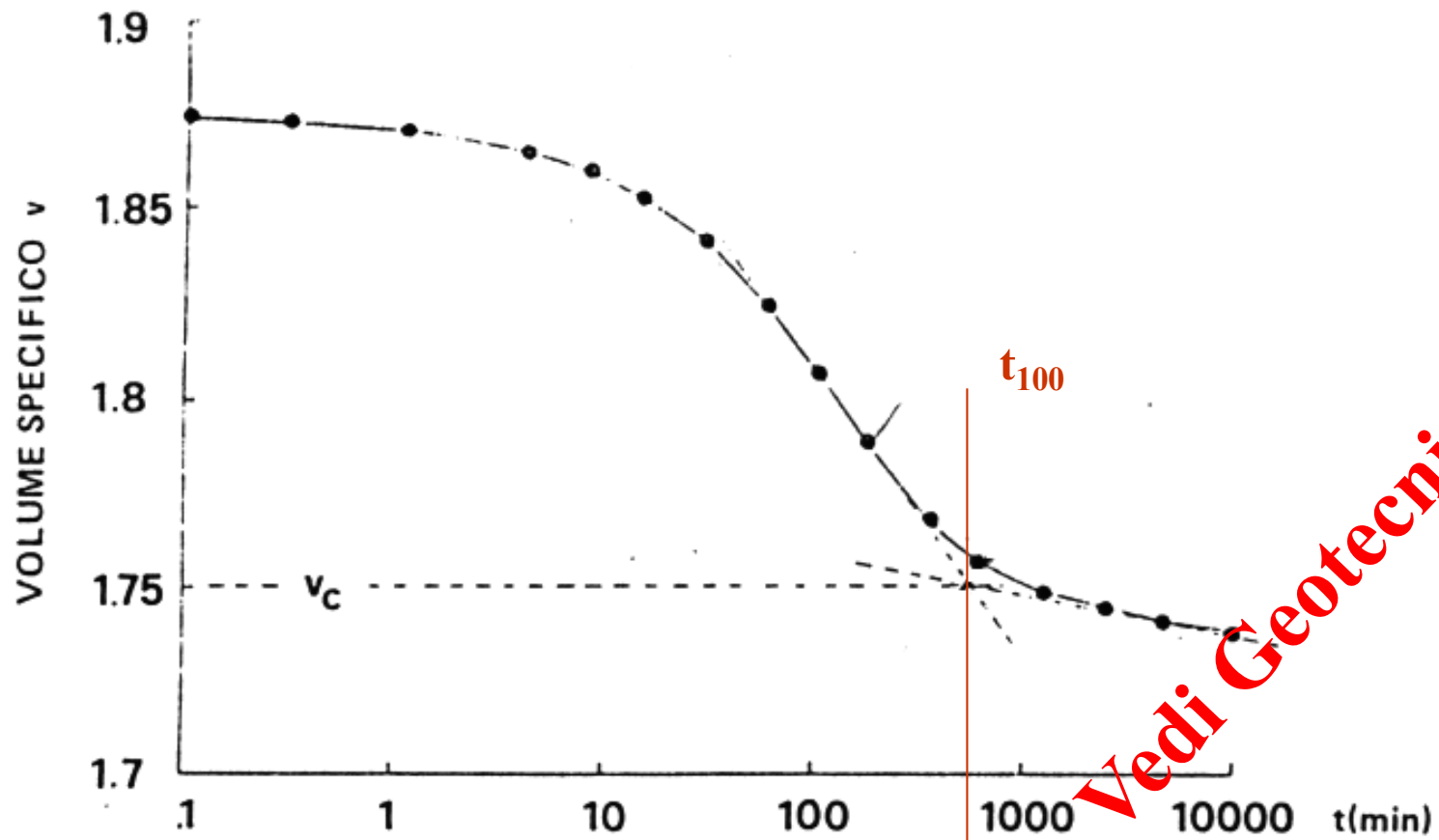
Vedi Geotecnica

Grado medio di consolidazione per diverse isocrone iniziali



Vedi Geotecnica

COMPRESSIONE EDOMETRICA Curva di consolidazione



Vedi Geotecnica

RINFRESCHIAMOCI LA MEMORIA SU:

- **Determinazione del parametro c_v**
- **Previsione dei tempi di consolidazione**

METODI PER ACCELERARE IL PROCESSO DI CONSOLIDAZIONE

- **Applicazione di un precarico**
- **Installazione di dreni verticali**

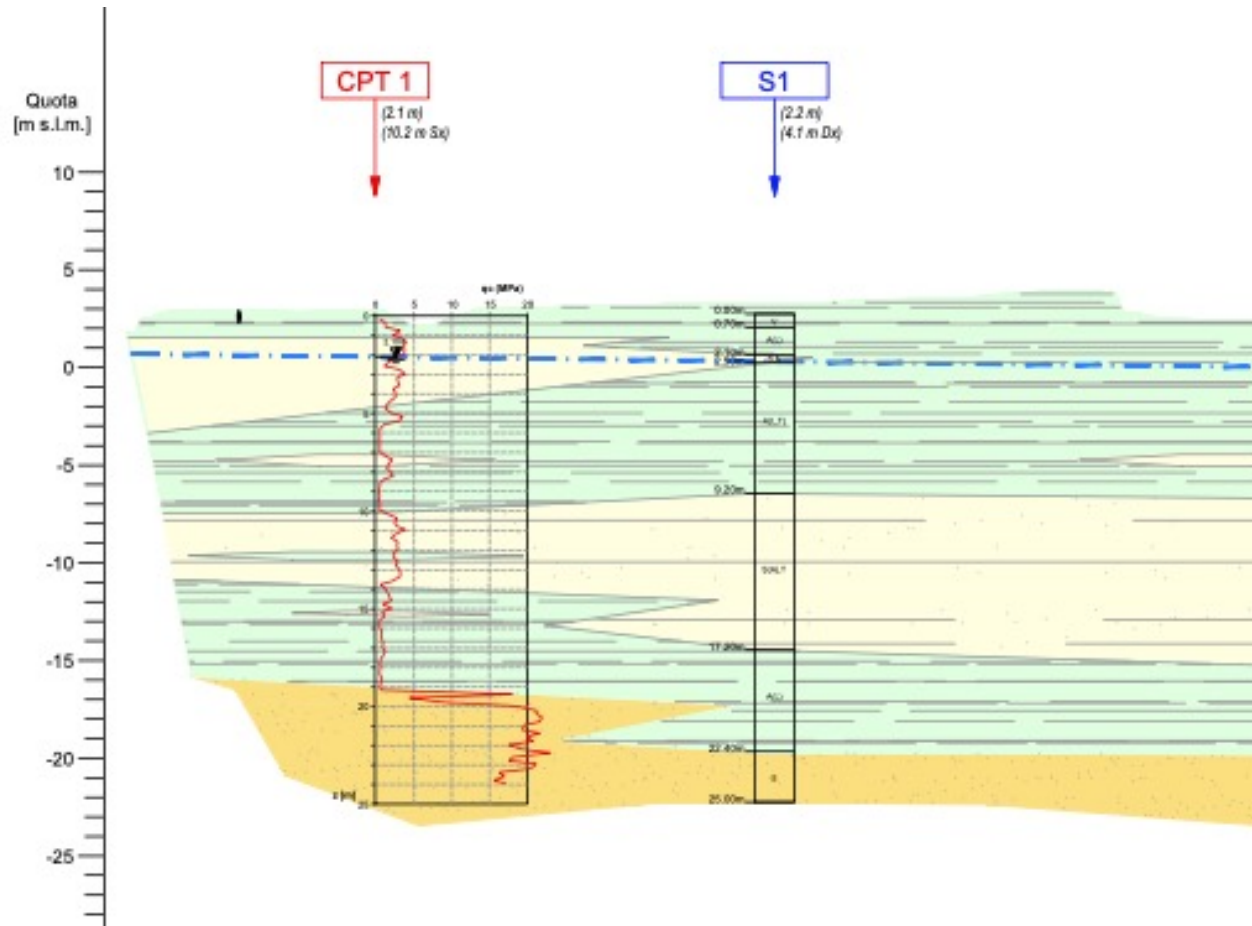
Applicazione di un precarico

Obiettivo progettuale: dimensionamento del precarico

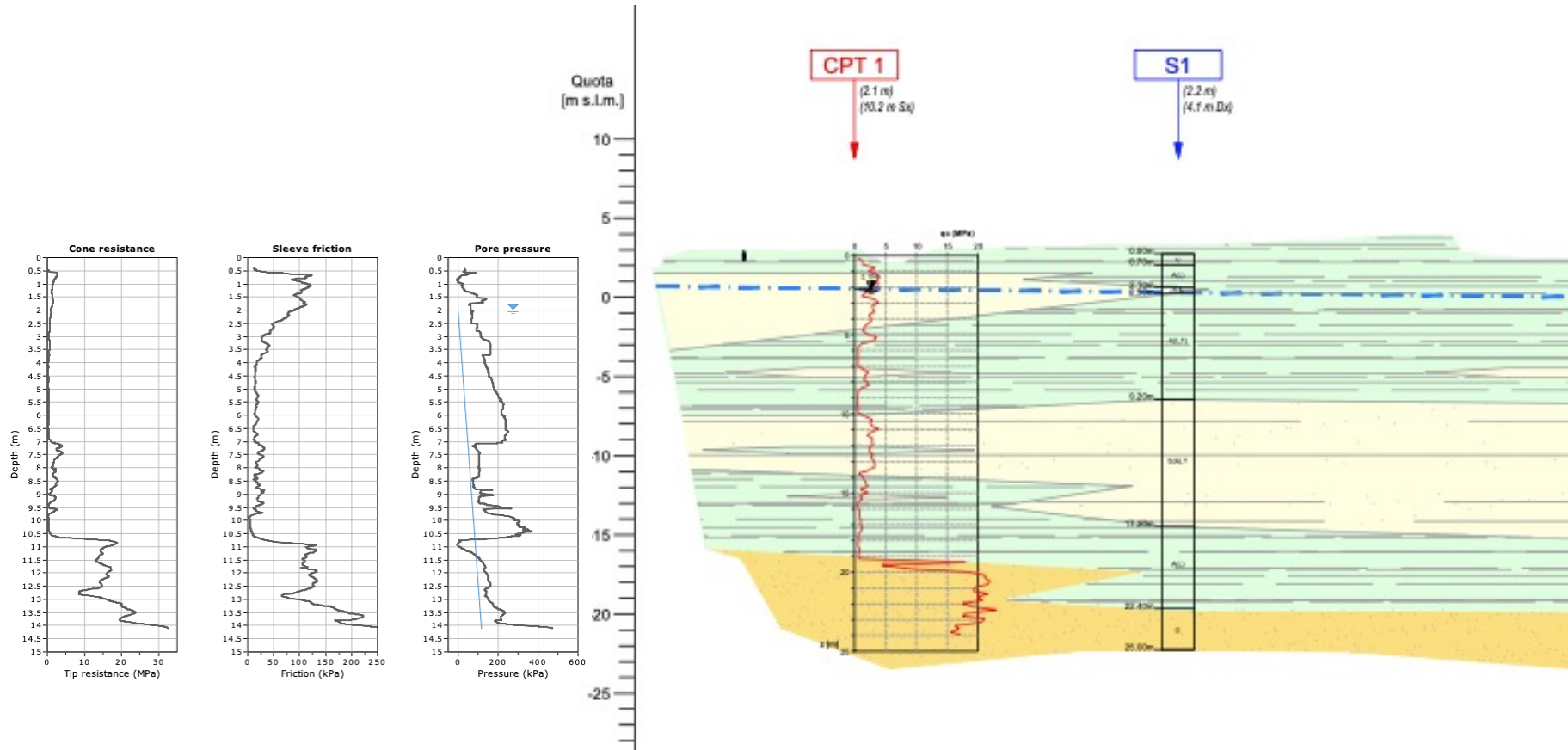
Principio: la velocità di consolidazione non dipende dal carico

Necessità di un sistema di monitoraggio dei cedimenti e delle pressioni neutre

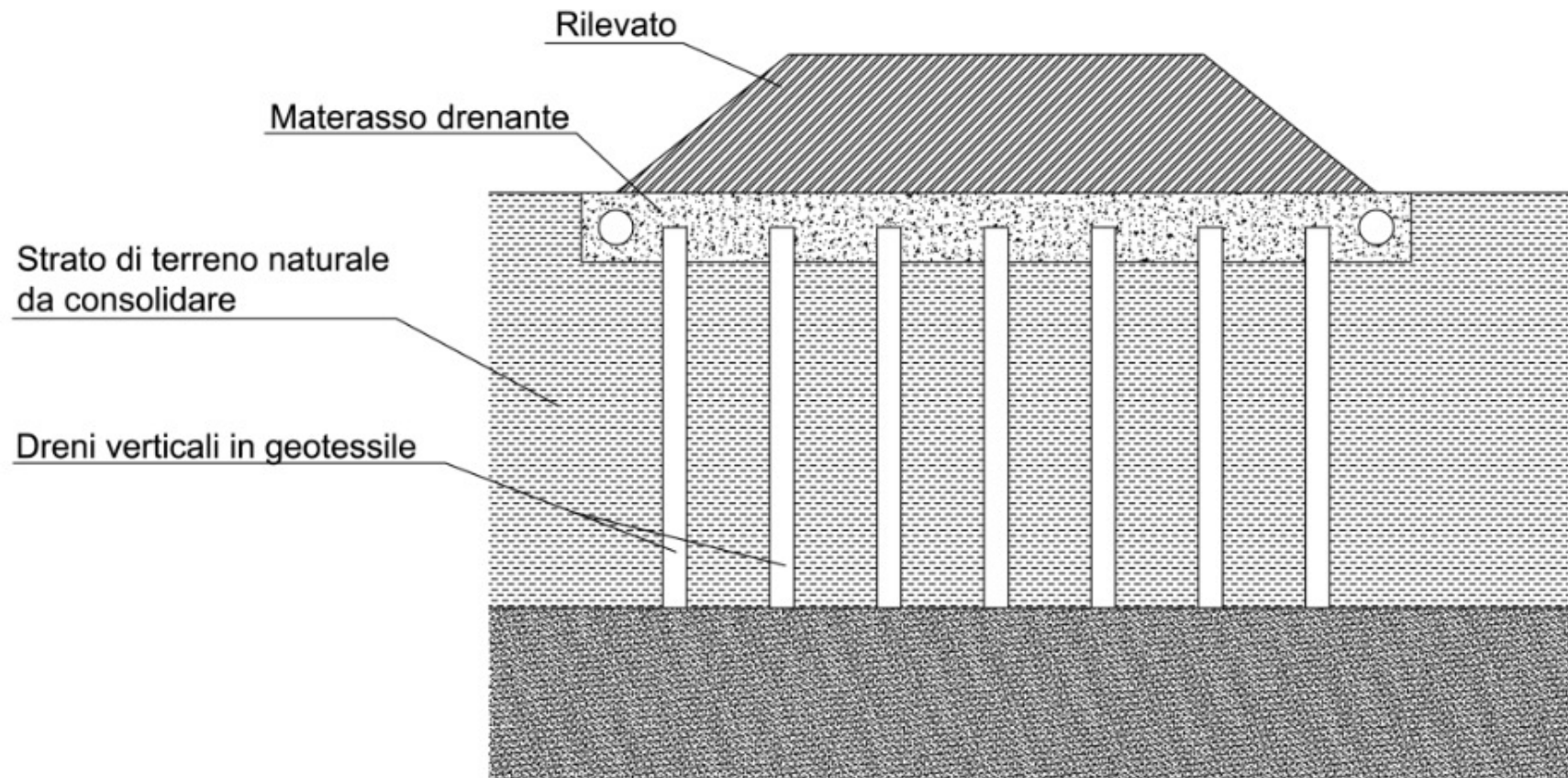
Discussione su un caso reale



Discussione su un caso reale

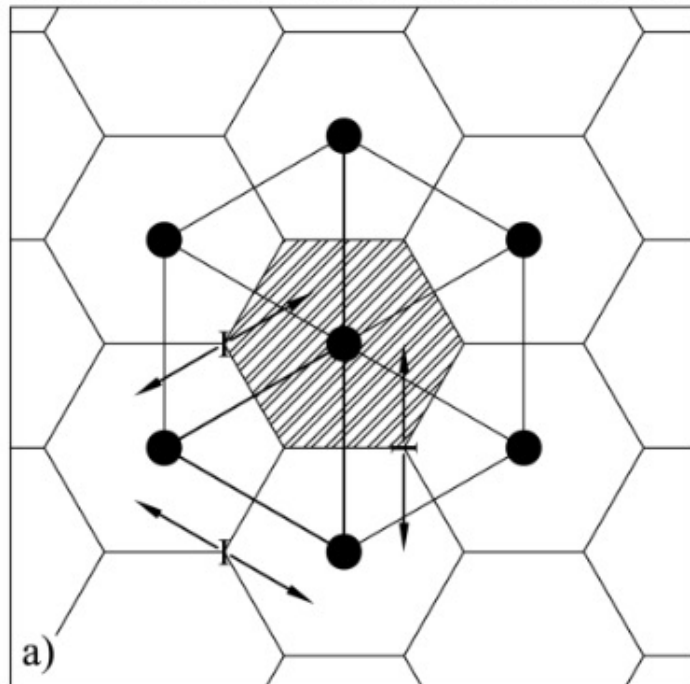


DRENI PER LA RIDUZIONE DEI TEMPI DI CONSOLIDAZIONE

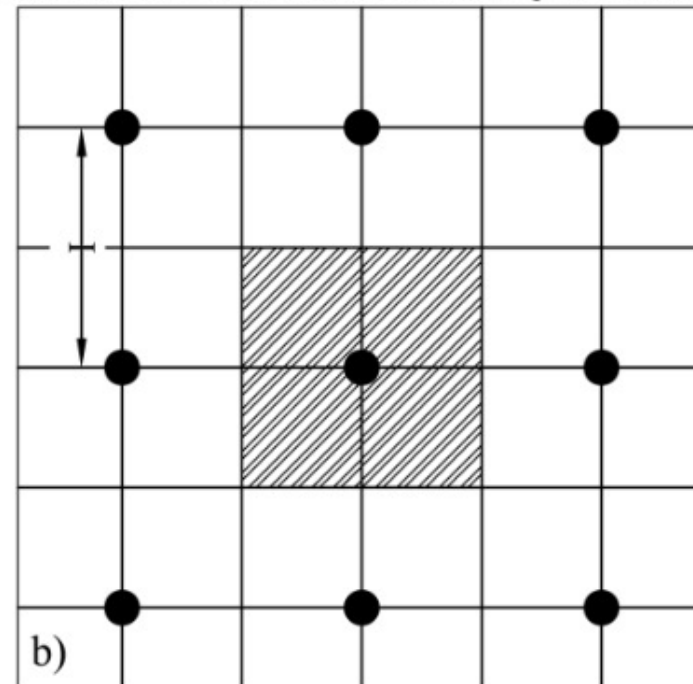


DRENI PER LA RIDUZIONE DEI TEMPI DI CONSOLIDAZIONE (disposizione dei dreni)

DISPOSIZIONE A MAGLIA TRIANGOLARE



DISPOSIZIONE A MAGLIA QUADRATA



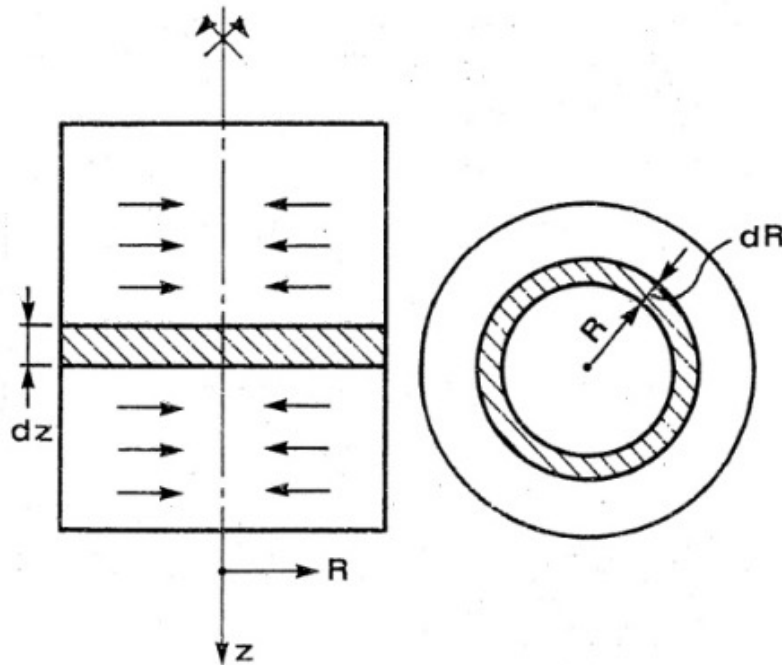
**DRENI PER LA RIDUZIONE
DEI TEMPI DI CONSOLIDAZIONE
(installazione dei dreni)**



**DRENI PER LA RIDUZIONE
DEI TEMPI DI CONSOLIDAZIONE
(installazione dei dreni)**



DRENI PER LA RIDUZIONE DEI TEMPI DI CONSOLIDAZIONE



$$c_h \left(\frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial R} + \frac{\partial^2 u}{\partial R^2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t}$$

Coefficiente di
consolidazione

$$c_h = \frac{K_h}{\gamma_w \cdot m_v}$$

DRENI PER LA RIDUZIONE DEI TEMPI DI CONSOLIDAZIONE

Metodo di installazione	Diametro usuale (cm)	Interasse usuale (m)
Infissione o vibroinfissione di un tubo con punta a perdere	40 ÷ 50	1,5 ÷ 6,0
Trivellazione	40 ÷ 50	1,5 ÷ 6,0
Getto d'acqua (<i>jetting</i>)	20 ÷ 30	1,5 ÷ 5,0
<i>Sandwick</i> (sabbia in una calza di iuta)	6 ÷ 8	1,2 ÷ 3,6

Tab. 8.7. Dreni in sabbia

DRENI PER LA RIDUZIONE DEI TEMPI DI CONSOLIDAZIONE

Dreno	Dimensioni		Materiali		Permeab. filtro (cm/s)	Diametro equivalente (cm)
	Largh. (cm)	Spess. (cm)	Anima	Filtro		
Kjellman	10	0,35	Cartone	Cartone	1×10^{-5}	6,6
Mebra	9,5	0,32	Polietilene	Carta trattata	6×10^{-7}	6,3
Geodrain	9,5	0,40	Polietilene	Carta trattata	6×10^{-7}	6,3
Colbond	30	0,40	Poliestere non tessuto		3×10^{-2}	19,4
Alidrain	10	0,70	Plastica	Cellulosa	3×10^{-4}	6,8
Castle Drain Boards	9,4	0,26	Polyolefin	Tessuto non tessuto	2×10^{-2}	6,2

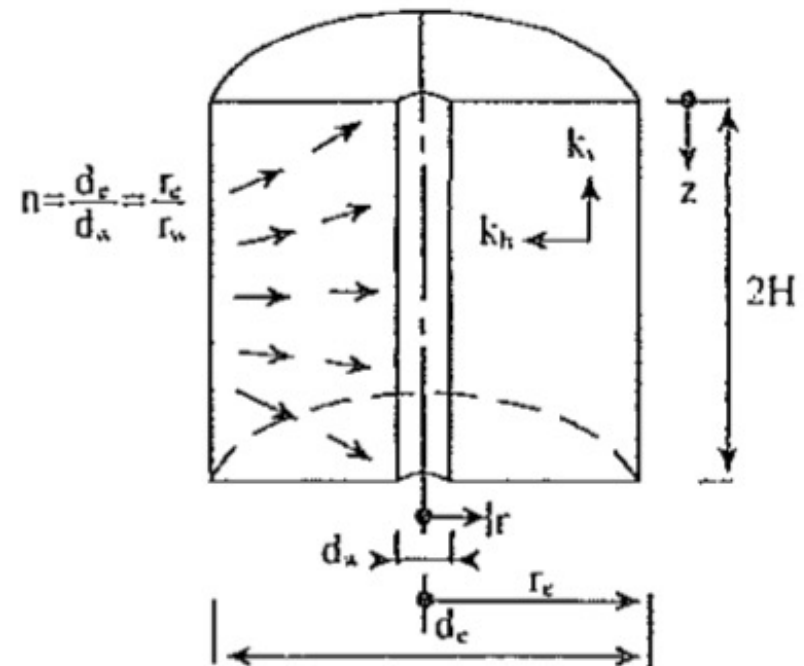
Tab. 8.8. Dreni prefabbricati

**DRENI PER LA RIDUZIONE
DEI TEMPI DI CONSOLIDAZIONE**
soluzione

$$C_h \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$T_h = \frac{C_h t}{d_e^2}$$

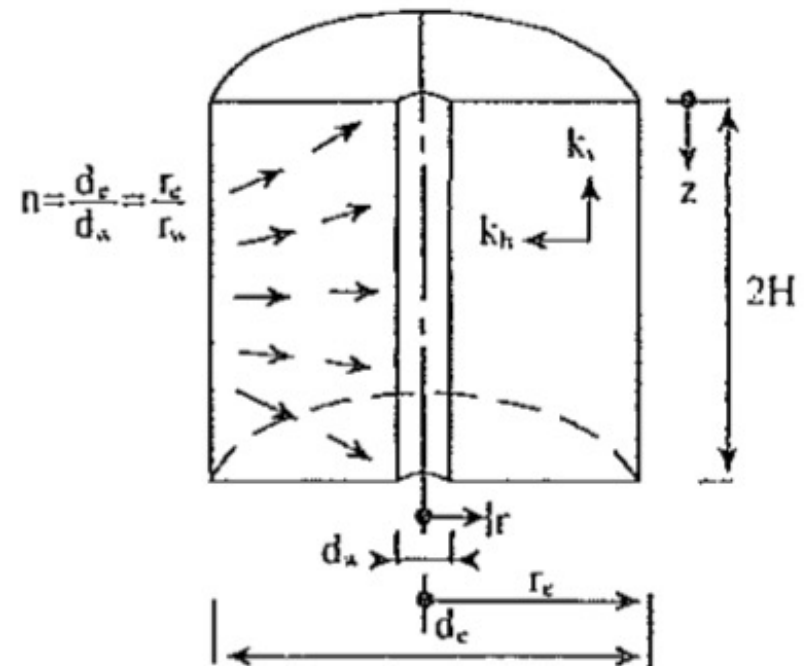
$$U_h = 1 - \exp \left(-\frac{8}{F} T_h \right)$$



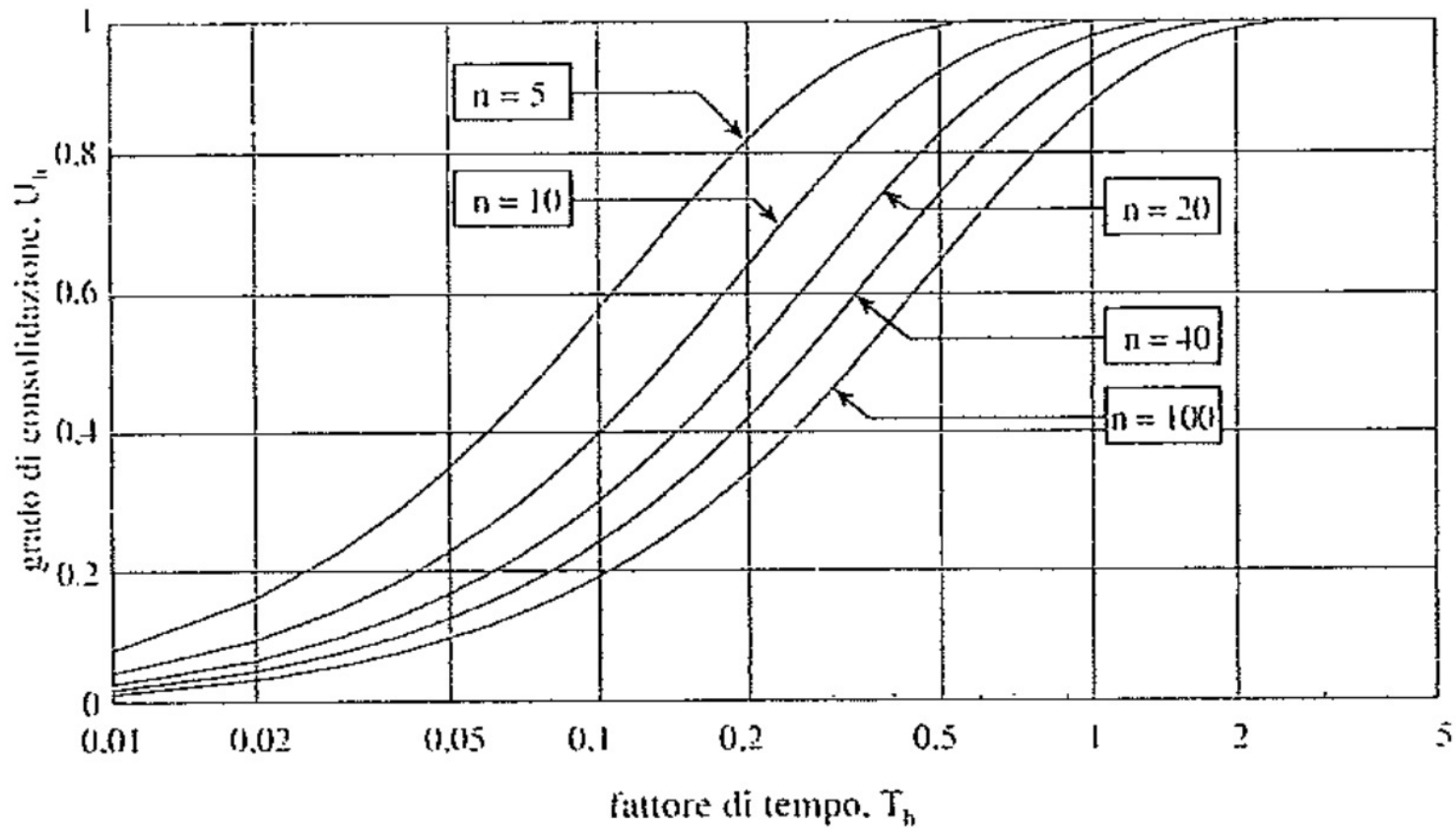
DRENI PER LA RIDUZIONE DEI TEMPI DI CONSOLIDAZIONE soluzione

$$F = \frac{n^2}{n^2-1} \ln n - \frac{3n^2-1}{4n^2}$$

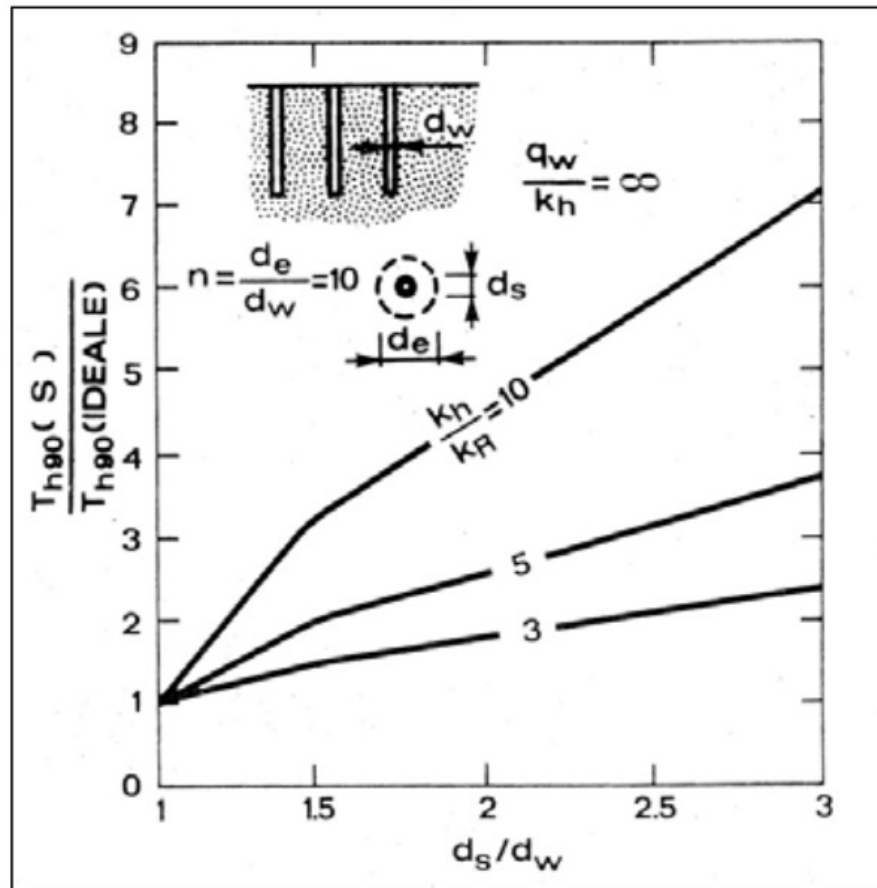
$$n = \frac{d_e}{d_n}$$



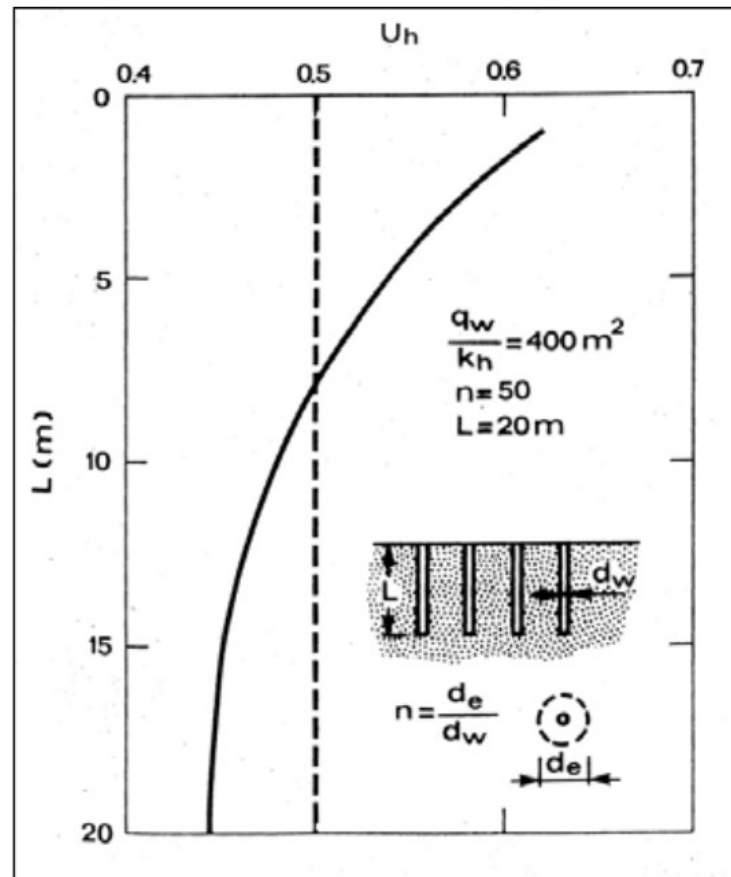
DRENI PER LA RIDUZIONE DEI TEMPI DI CONSOLIDAZIONE



DRENI PER LA RIDUZIONE DEI TEMPI DI CONSOLIDAZIONE Effetto del rimaneggiamento



DRENI PER LA RIDUZIONE DEI TEMPI DI CONSOLIDAZIONE Effetto della resistenza idraulica del dreno



Installazione di dreni

Obiettivo progettuale: dimensionamento dell'interasse

Principio: la velocità di consolidazione dipende dal percorso di drenaggio

Necessità di un sistema di monitoraggio dei cedimenti e delle pressioni neutre