

PERMEABILITÀ DEL TERRENO

Programma della lezione

1. Permeabilità del terreno
2. Teorema di Bernoulli e gradiente idraulico
3. Legge di Darcy
4. Coefficiente di permeabilità
5. Determinazione del coefficiente di permeabilità

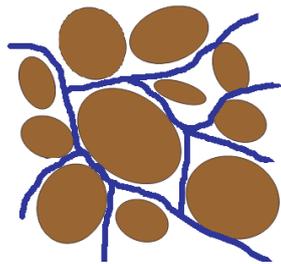
1. Permeabilità del terreno

E' una delle più importanti proprietà d'interesse geotecnico.

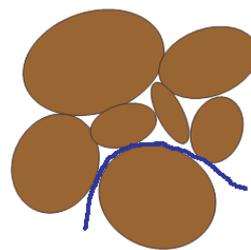
Il suolo è un assemblaggio di particelle solide con vuoti interconnessi attraverso i quali l'acqua può defluire da un punto ad energia maggiore verso un altro ad energia minore.

Misura di una proprietà fisica del terreno → capacità del terreno di essere attraversato dall'acqua in un dato intervallo di tempo.

L'acqua che viene a contatto con la superficie del terreno tende ad infiltrarsi nel sottosuolo per effetto della gravità e va a riempire, parzialmente o completamente, i vuoti presenti.



Alta permeabilità



Bassa permeabilità

Importante per:

- progettazione degli impianti di irrigazione
- gestione dei comprensori di irrigazione
- qualità dei suoli in relazione alle pratiche agronomiche.

Si tratta di descrivere in termini macroscopici ciò che regola il movimento dell'acqua all'interno dell'intricato sistema dei pori del terreno → Poiché è estremamente difficile lo studio analitico del moto del fluido che percorre il terreno, è opportuno sostituire al classico

sistema disperso rappresentativo del terreno agrario un modello di sistema poroso, permeabile ed omogeneo → Teorema di Bernoulli e gradiente idraulico.

2. Il gradiente idraulico

I moti di filtrazione di un fluido avvengono tra due punti (uno ad energia maggiore e l'altro ad energia minore).

L'energia in ciascun punto → **energia cinetica** (legata alla velocità del fluido) + **energia potenziale** (legata alla posizione del punto nel campo gravitazionale e alla pressione del fluido).

E' comune esprimere l'energia in termini di "carico" o "altezza" (energia per unità di peso) e definire come:

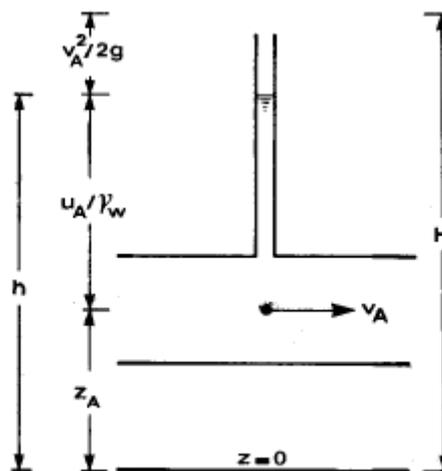
altezza geometrica, z , la distanza verticale del punto da un piano orizzontale di riferimento arbitrario ($z=0$)

altezza di pressione (piezometrica), $\frac{u}{\gamma_w}$, l'altezza di risalita dell'acqua rispetto al punto, per effetto della sua pressione u ($\gamma_w = \rho g$)

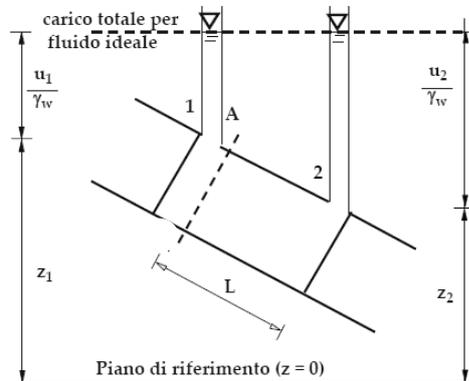
altezza di velocità (altezza d'arresto), $\frac{v^2}{2g}$, l'energia dovuta alla velocità delle particelle di fluido.

Carico totale o altezza totale → $H = z + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g}$

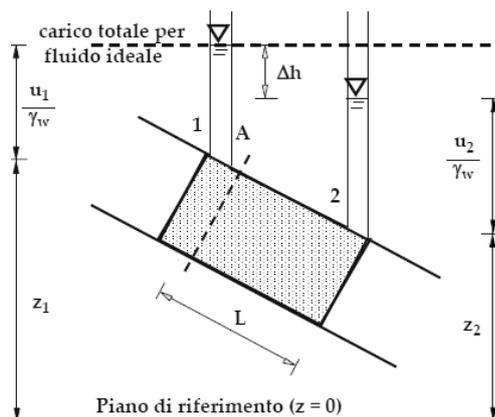
Carico piezometrico → $h = z + \frac{u}{\gamma_w}$



In virtù del teorema di Bernoulli, per un fluido perfetto e incompressibile soggetto all'azione della gravità, il carico totale è costante lungo una data traiettoria (tubo di flusso).



Se nel tubo di flusso viene inserito un campione di terreno dotato di sufficiente permeabilità nella zona tra due piezometri, si osserva che nei due piezometri l'acqua risale a quote diverse → perdita di carico.



Potendo ritenere trascurabili le perdite di carico dovute al flusso dell'acqua in assenza del terreno ed essendo la velocità media nelle due sezioni costante (per il principio di conservazione della massa), la differenza di altezza d'acqua nei due piezometri Δh → è una misura della perdita di energia totale dovuta al flusso dell'acqua nel terreno → dell'energia spesa dall'acqua per vincere la resistenza al moto opposta dal terreno.

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \left(\frac{p_1}{\gamma_w} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma_w} + z_2 \right)$$

Nei terreni, la velocità di flusso, e quindi la relativa altezza, è generalmente trascurabile → il carico piezometrico può essere ritenuto rappresentativo dell'energia totale nel punto analizzato.

$i = \frac{\Delta h}{L}$ → gradiente idraulico → perdita di carico per unità di lunghezza del percorso.

3. La legge di Darcy

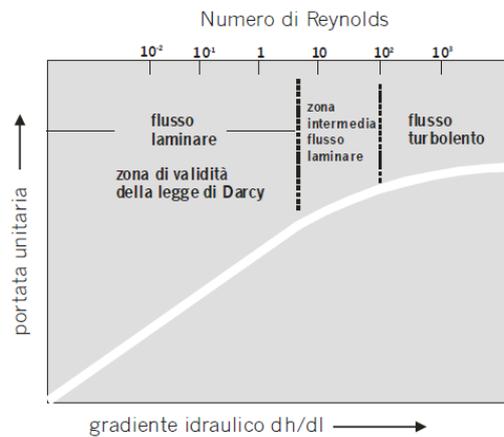
Descrive un legame tra le caratteristiche del moto (velocità), le proprietà del terreno e la perdita di carico → descrive il moto di filtrazione in mezzi saturi.

Si parte da un modello di sistema poroso, permeabile ed omogeneo nell'ipotesi di validità della legge del moto laminare, di fluido ideale e non comprimibile.

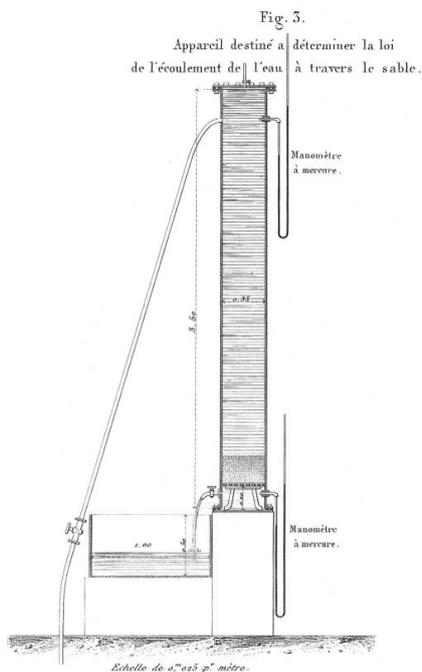
Campo di validità

- Regime di moto laminare (no turbolento)
- Condizioni di saturazione

Sulla base del numero di Reynolds (parametro adimensionale) → $Re_d = \frac{\rho V d}{\mu}$ (d, diametro degli elementi caratterizzanti il mezzo poroso).



Henry Darcy (1856), nell'ambito di uno studio sull'acquedotto di Digione, descrive un esperimento di laboratorio sul flusso monodimensionale dell'acqua attraverso strati orizzontali di sabbia (in condizioni di moto laminare).



Osserva che la portata (Q) per unità di superficie (A) è direttamente proporzionale alla perdita di carico (Δh) e inversamente proporzionale alla lunghezza del percorso considerato (L).

$$\frac{Q}{A} \propto \frac{\Delta h}{L}$$

Definisce la **velocità apparente** di filtrazione v come:

$$\frac{Q}{A} = v = -k \frac{\Delta h}{L}$$

In termini differenziali:

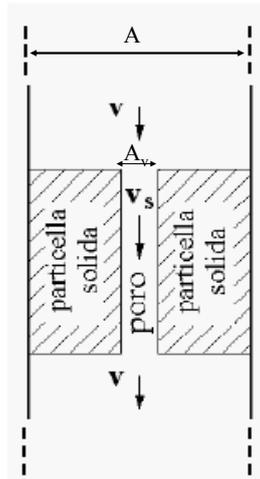
$$v_x = -k \frac{dh}{dx}$$

k → **coefficiente di permeabilità** (o conducibilità idraulica del mezzo poroso) → ha le dimensioni di una velocità (m/s).

3.1 Velocità apparente e velocità reale di filtrazione

Nella relazione $Q = vA$ v è definita velocità apparente.

La velocità reale v_r dell'acqua nei pori è maggiore poiché l'area della sezione attraversata effettivamente dall'acqua (A_v , area dei vuoti) è inferiore ad A .



$$Q = vA = v_r A_v$$

$$A = A_v + A_s \quad A_s = \text{area particelle solide}$$

$$Q = v(A_v + A_s) = A_v v_r \rightarrow v_r = \frac{v(A_v + A_s)}{A_v} = \frac{v(A_v + A_s)L}{A_v L} = \frac{v(V_v + V_s)}{V_v} \rightarrow$$

$$v_r = v \left[\frac{1 + \left(\frac{V_v}{V_s} \right)}{\frac{V_v}{V_s}} \right] = v \left(\frac{1 + e}{e} \right) = \frac{v}{n} \rightarrow v = v_r n$$

Dove n = porosità

4. Il coefficiente di permeabilità k (o conducibilità idraulica del mezzo poroso)

Esprime la resistenza viscosa e frizionale di un fluido in un mezzo poroso.

E' funzione:

- della proprietà del fluido (densità ρ e viscosità μ)
- delle caratteristiche del mezzo poroso (permeabilità intrinseca, k_p).

$$k = \frac{\rho_g}{\mu} k_p$$

Se ci si limita a considerare come fluido interstiziale l'acqua (densità e viscosità poco variabile, salvo gli strati più superficiali o situazioni particolari) si può assumere il coefficiente di permeabilità dipendente solo dalle caratteristiche del terreno.

Il campo di variazione è grande

k (m/s)	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
GRADO DI PERMEABILITÀ	alto			medio		basso		molto basso		impermeabile		
DRENAGGIO	buono					povero			praticamente impermeabile			
TIPO DI TERRENO	ghiaia pulita		sabbia pulita e miscele di sabbia e ghiaia pulita			sabbia fine, limi organici e inorganici, miscele di sabbia, limo e argilla, depositi di argilla stratificati			terreni impermeabili argille omogenee sotto la zona alterata dagli agenti atmosferici			
						terreni impermeabili modificati dagli effetti della vegetazione e del tempo						

Per i terreni a grana grossa (particelle approssimativamente di forma sub sferica), k è influenzato prevalentemente dalla granulometria e dall'indice dei vuoti.

Per i terreni a grana fine sono importanti la composizione mineralogica e la struttura perché determinano il tipo di interazione elettrochimica che si stabilisce tra particelle di terreno e molecole d'acqua.

Sulle caratteristiche delle interfacce liquido-solido ha notevole importanza la composizione ionica della soluzione disperdente ed in parte anche la temperatura: se il terreno è rigonfiabile si verifica una conseguente variazione della dimensione dei pori.

La permeabilità di un terreno dipende anche dalle caratteristiche macrostrutturali come discontinuità e fessurazioni.

4.1 Permeabilità di depositi stratificati

Deposito di terreno costituito da n ($1 \rightarrow n$) strati orizzontali saturi

$k_{(1 \rightarrow n)}$ coefficienti di permeabilità

$H_{(1 \rightarrow n)}$ spessori corrispondenti

$H = \sum H_i$ spessore totale del deposito

Filtrazione orizzontale (in parallelo)

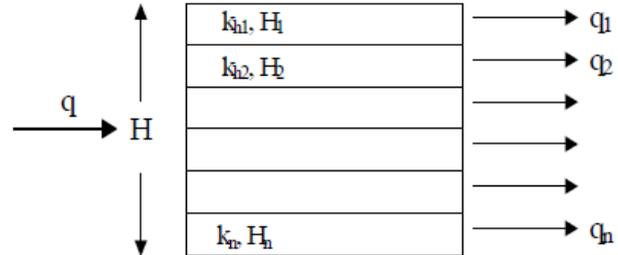
Il gradiente idraulico i è lo stesso per tutti gli strati.

La velocità di filtrazione per ogni strato:

$$v_1 = k_{h1}i \quad ; \quad v_2 = k_{h2}i \quad ; \quad \rightarrow n$$

La portata di filtrazione per ogni strato:

$$q_1 = v_1 H_1 \quad ; \quad q_2 = v_2 H_2 \quad ; \quad \rightarrow n$$



$$Q = \sum q_i = vH \quad \text{dove } v \text{ è la velocità media e } H \text{ lo spessore totale}$$

Secondo la legge di Darcy $\rightarrow v = k_H i$ dove k_H è il coefficiente di permeabilità medio.

$$\rightarrow k_H = \frac{v}{i} = \frac{\sum q_i}{Hi} = \frac{\sum v_i H_i}{Hi} = \frac{\sum k_{hi} H_i}{H}$$

Filtrazione perpendicolare (in serie)

Per il principio di conservazione della massa e in caso di fluido incomprimibile, la portata che attraversa ogni strato è la stessa.

Essendo uguale l'area attraversata \rightarrow è uguale anche la velocità di filtrazione:

$$v = k_{v1}i_1 = k_{v2}i_2 \quad \rightarrow n$$

Per Darcy:

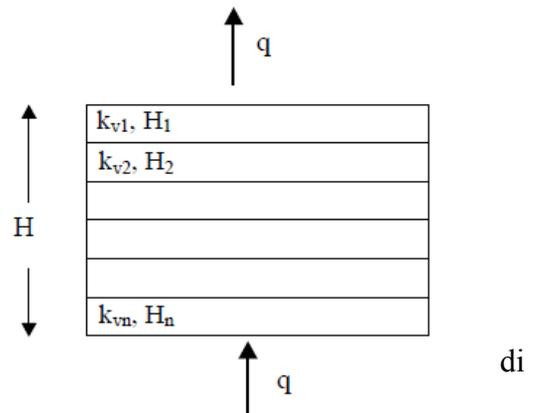
$$v = k_v i_m = k_v \left(\frac{h}{H} \right)$$

k_v = coefficiente di permeabilità medio

i_m = gradiente idraulico medio

h = perdita di carico totale (somma delle perdite carico in ciascuno strato)

H = percorso di filtrazione



$$h = \sum h_i = \sum H_i i_i = \sum H_i \frac{v}{k_{vi}} = v \sum \frac{H_i}{k_{vi}} \rightarrow$$

$$k_v = \frac{H}{\sum \frac{H_i}{k_{vi}}}$$

5. Determinazione della permeabilità

- Mediante correlazioni (tramite relazioni empiriche che legano k ad alcuni parametri come la dimensione dei grani e il coefficiente di uniformità, per i terreni a grana grossa).
- Sperimentalmente (in laboratorio o in sito).

5.1 Misura sperimentale della permeabilità di un terreno in laboratorio

Permeametro a carico costante (per $k > 10^{-5}$ m/s)

Permeametro a carico variabile (per $10^{-8} < k < 10^{-5}$ m/s)

Prova edometrica (per $k < 10^{-8}$ m/s)

Ogni metodo di misura presenta un campo di applicazione ottimale all'interno di un certo intervallo di variazione di k .

5.1.2 Permeametro a carico costante

Standard ASTM D 2434

Scopo → metodo per la determinazione del coefficiente di permeabilità (a carico costante) in condizione di moto laminare e per suoli granulari (non più del 10% deve passare attraverso un setaccio caratterizzato da pori di 75 μm).

Condizioni fondamentali per effettuare il test:

- continuità del flusso, non ci devono essere cambiamenti di volume durante il test
- saturazione con acqua e assenza di bolle nei vuoti
- flusso in moto stazionario senza cambiamenti nel valore del gradiente idraulico
- proporzionalità diretta tra velocità del flusso e gradiente idraulico (no principio di moto turbolento).

Condizioni operative (procedura)

Livellare il campione di terreno posizionando il disco poroso (superiore) e ruotandolo gentilmente. Misurare $H_1 - H_2$ dopo aver compresso leggermente la molla. Posizionare il piatto contro la molla e assicurarla sulla sommità del permeametro (tenuta stagna).

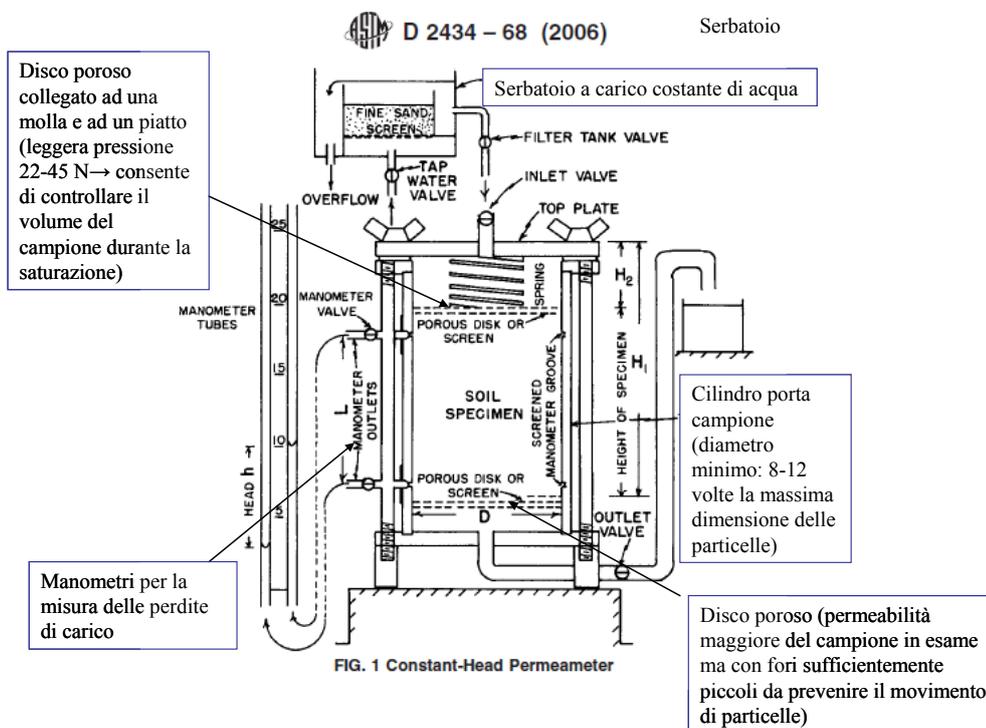
Utilizzare una pompa da vuoto (sotto i 50 cm Hg per 15 min) al fine di rimuovere l'aria che aderisce alle particelle del suolo e dagli spazi vuoti. Sotto vuoto completo, seguire l'evacuazione dell'acqua dal basso verso l'alto (saturazione). Al termine del processo di saturazione, chiudere la valvola di evacuazione (outlet) e disconnettere la pompa da vuoto.

Riempire il tubo di ingresso (inlet tube) con l'acqua proveniente dal serbatoio aprendo leggermente la valvola (filter tank valve); connettere il tubo di ingresso sulla sommità del permeametro

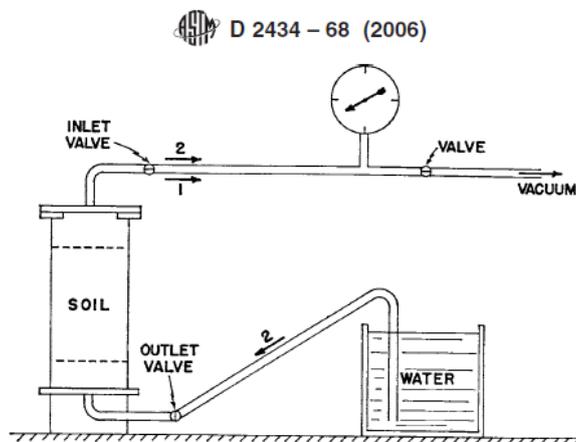
Aprire leggermente la valvola di ingresso (inlet valve) e attendere una condizione di stabilità (senza apprezzabili cambiamenti nella lettura dei manometri).

Misurare i seguenti parametri: t (tempo), h (differenza in livello nei manometri), Q (quantità di flusso), T (temperatura dell'acqua).

Al termine del test, scaricare il campione e ispezionarlo per verificarne l'omogeneità.

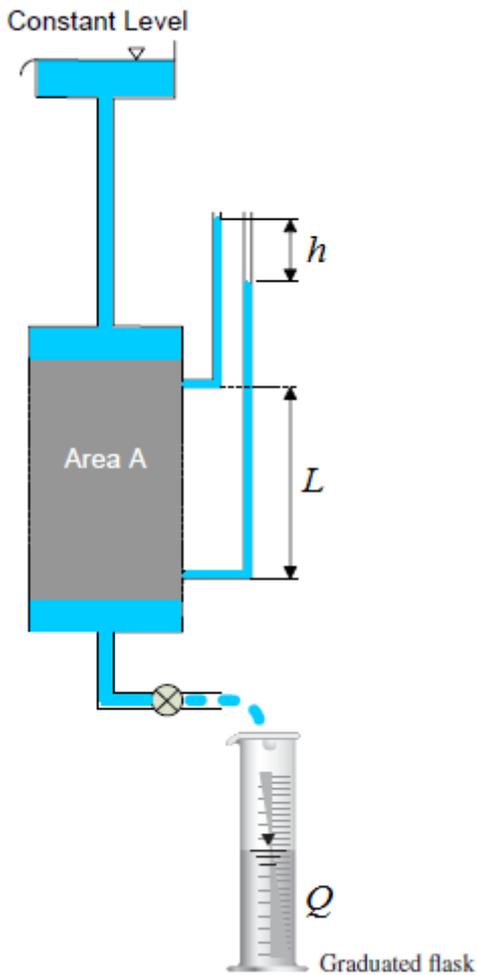


Permeametro a carico costante



Sistema di evacuazione e di saturazione

Calcolo



$$k = QL / Ath$$

k = coefficiente di permeabilità

Q = quantità di acqua evacuata

L = distanza tra i manometri (manometer outlets)

A = area della sezione del campione

T = tempo totale

h = differenza (in altezza) tra i livelli di acqua nei due manometri (head)

5.1.3 Permeametro a carico variabile

Quando la permeabilità del terreno è inferiore a 10^{-5} m/s, la portata è di difficile misurazione.

La quantità di acqua che fluisce è determinata attraverso la misura della riduzione dell'altezza di carico, Δh , in un tubo di piccolo diametro collegato al cilindro che contiene il campione.

$k \rightarrow$ è calcolato in base alla velocità di discesa del livello dell'acqua nel tubo fermo restando il livello dell'acqua nel cilindro.

Trascurando la compressibilità dell'acqua, per il principio di conservazione della massa, la quantità di acqua che scorre nel tubicino si suppone sia pari a quella che attraversa il campione.

Se il livello dell'acqua si abbassa di una quantità dh nel tempo dt , la quantità di acqua che scorre nel tubicino nel tempo $(-a \cdot dh)$ è uguale a quella che attraversa il campione $(v \cdot A \cdot dt)$

Calcolo

Per la legge di Darcy:

$$k \cdot i \cdot A \cdot dt = -a \cdot dh$$

$$k \cdot \frac{h}{L} \cdot A \cdot dt = -a \cdot dh$$

Separando le variabili e integrando

$$a \cdot \int_{h_1}^{h_0} \frac{1}{h} dh = k \cdot \frac{A}{L} \cdot \int_{t_0}^{t_1} dt \rightarrow$$

$$a \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} = k \cdot \frac{A}{L} (t_1 - t_0) \rightarrow$$

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot (t_1 - t_0)} \ln \frac{h_0}{h_1} = 2.3 \frac{a \cdot L}{A \cdot (t_1 - t_0)} \log_{10} \frac{h_0}{h_1}$$

