Princípios y Aplicaciones Del Drenaje
Vol. I - Materiais Preliminares.

Autor.

Cap. 6.

6. Hidráulica Elementar da Água na Zona Saturada.

6.1. Definição da água na zona saturada e água do lençol freático.

<u>Água na zona saturada</u> ⇒ se refere à massa de água de um solo cuja totalidade de poros está saturada de água.

<u>Água do lençol freático</u> ⇒ o lugar geométrico dos pontos da massa de água onde a pressão é igual à pressão atmosférica.

A pressão geralmente se expressa como uma pressão relativa p em relação à pressão atmosférica p_{atm}.

Por definição na capa freática (lençol)

$$p = p_{atm}.$$

Fig. Esquema da pressão da água abaixo da superfície do solo.

	superfície do terreno.	
umidade do solo	Zona não saturada	$p < p_{atm}$.
lençol freático	lençol freático ▽	$p = p_{atm}$.
água freática.	Zona saturada.	$p > p_{atm}$.

capa ou camada impermeável.

Zona não saturada ⇒ Zona de aeração em que os poros dos solos apresentam-se sem saturação da água, ou seja, parte é água e parte é ar.

6.2. Propriedades físicas: Leis básicas

Nos estudos de drenagem do solo interessa:
- a profundidade em que aparece o lençol e a variação de sua profundidade
- movimento da água freática.
- a velocidade de fluxo.

Princípio Físico ⇒ reformulação dos princípios da mecânica.
⇒ a equação da continuidade.
⇒ a equação de estado da água freática.
⇒ as equações dinâmicas do movimento da água.

6.2.1. Densidade da água: (ρ)
⇒ massa por unidade de volume.
⇒ pode variar c/
- pressão
- temperatura
- concentração de sólidos dissolvidos.

$\rho \approx 1.000 \; kg/m^3$ (constante)

6.2.2. Viscosidade da água.

~~Ab~~

Fluxo laminar ⟹ fluxo em que as trajetórias das partículas são paralelas.

⟹ uma capa que se desliza sobre outra exerce um arraste por fricção desta última.

$$\boxed{\text{Fricção} = \text{Viscosidade}}$$

⟹ O efeito total das capas de água, cada qual movendo-se a uma velocidade diferente de uma capa mais próxima se observa como um gradiente de velocidade em direção e perpendicular a linha de movimento.

$$\boxed{\frac{F}{A} = \eta \cdot \frac{dv}{dy}}$$

Força de Empuxo devida à viscosidade.

gradiente de velocidade

η = viscosidade dinâmica do fluido.

$\boxed{\eta \simeq 10^{-3}\ \text{kg/m.s}}$ (água).

A viscosidade cinemática: ν

$$\boxed{\nu = \eta / \rho}$$ (água)

$$\boxed{\nu \simeq 10^{-6}\ m^2/s}$$

Tabela 1. Variação da densidade e da viscosidade c/a temperatura.

6.2.3. Peso Específico: (γ) $g = 9{,}81\ m/s^2$.

$$\gamma = \rho \cdot g.$$

$$\gamma \simeq 9.810\ Kg/m^2 \cdot s^2.$$

6.2.4. Lei de Conservação da Energia.
⇒ Lei fundamental da termodinâmica. ⇒ energia não pode ser criada nem destruída.

Fig. 2. Distribuição da pressão e perda de carga do fluxo de água através de uma coluna de areia.

1) energia cinética por unidade de volume ⇒ $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v$

2) energia potencial por " de " ⇒ $\rho \cdot g \cdot z$

3) Energia de pressão por " de " ⇒ p.

Bernoulli: $\left(\frac{1}{2}\rho . V^2 + \rho . g . z + p\right)_1 = \left(\frac{1}{2}\rho . V^2 + \rho g z + p\right)_2 = cte$

↳ válida em uma condição de fluxo permanente.
↳ perdas de energia desprezíveis.
↳ densidade do fluido constante $\boxed{\rho = cte}$

Na natureza as velocidades da água freática (V) são geralmente baixas ⟹ energia cinética desprezível, logo:

$$\boxed{\rho . g . z + p = cte}$$ ↳ eq. de energia (Bernoulli)

Expressando a energia por unidade de peso.

$$\frac{p}{\rho . g} + z = \text{constante} = h.$$

$p/\rho g$ = carga de pressão.
z = carga de elevação.
h = carga hidráulica.

Fig. 2. ⟹ Perda de Carga.

$$\frac{p_1}{\rho . g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho . g} + z_2 + \Delta h_L.$$

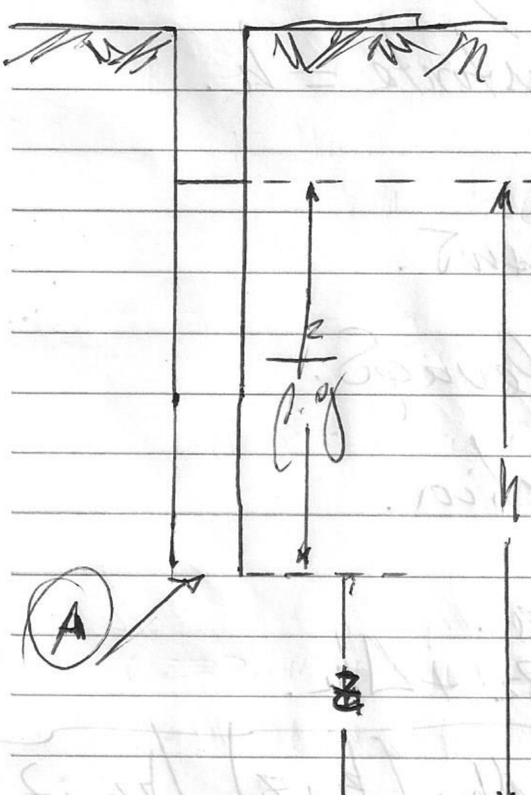
$$\boxed{\Delta h_L = \left(\frac{p_1}{\rho . g} + z_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho . g} + z_2\right)}$$

8o Pode-se definir a perda de carga, como a perda de energia de pressão e potencial por unidade de peso, enquanto o fluido se move da secção (1) para a secção (2), essa perda é causada pela FRICÇÃO!

6.2.5. Potencial da água na Zona Saturada.

A carga potencial ou carga hidráulica da água da zona saturada em um ponto A é a elevação que a água ascenderia em um tubo aberto à atmosfera, cujo extremo final coincide com o ponto em questão, medindo-se a dita elevação a partir de um plano de referência arbitrário.

$$\boxed{h = \frac{p}{\rho \cdot g} + z}$$



z = elevação do ponto ao nível de referência.

p = pressão da água freática nesse ponto em relação a uma pressão de referência.

6.2.6. Lei de Conservação de massas
⇒ a massa do fluido não pode ser criada nem destruída.

Continuidade: $\boxed{Q = \int_A v \cdot dA = \bar{v} \cdot A.}$

$\bar{v}$ = velocidade média perpendicular à secção transversal de fluxo considerada.

6.3. Lei de Darcy.

6.3.1. Formulação Geral

1856 - lei fundamental que descreve o movimento da água na zona saturada através de um solo.

Observação de Darcy:
⇒ a quantidade de água que flui através da amostra por unidade de tempo (fluxo ou descarga) é proporcional à diferença entre as cargas do fluido Δh entre as superfícies de entrada e saída da amostra.

$\Delta h = h_1 - h_2$
⇒ a descarga é inversamente proporcional ao comprimento da amostra ou trajetória do fluxo.

Logo: $$\boxed{Q = K \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A}$$

Q = a quantidade de fluxo através da amostra (L^3T^{-1})
Δh = perda de carga (L).
L = comprimento da amostra (L).
A = superfície da seção transversal do tubo (L^2).
K = constante de proporcionalidade que depende da natureza do material e do fluído (LT^{-1}).

$$\boxed{v = Q/A.}$$ Continuidade

v = velocidade aparente, velocidade de fluxo efetiva ou descarga específica.

$\Delta h/L$ = perda de carga por unidade de comprimento da trajetória do fluxo = gradiente de carga hidráulica.

$$\boxed{i = \Delta h/L}$$

Substituindo na eq. de Darcy:

$$\boxed{V = -K \cdot i}$$ Lei da resistência linear.

⇒ em analogia com a lei de Ohm da eletricidade.

(85)

A Lei de Darcy estabelece que a velocidade aparente é diretamente proporcional à derivada da carga hidráulica na direção do fluxo.

↳ o sinal negativo indica que a direção do fluxo é a da redução de carga.

↳ a dimensão de v é (LT^{-1}), enquanto que i não tem dimensão, de forma que a dimensão de K é de uma velocidade (LT^{-1}).

K = coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica.

Obs.: Deve-se ter em conta que a velocidade de fluxo, em cada um dos poros do solo, excede em muito a velocidade aparente, que na realidade é a velocidade hipotética que a água teria através da coluna de fluido dada, sem obstrução das partículas sólidas (volume de vazios).

A velocidade real das partículas de água (Va) é deduzida a partir da seguinte expressão:

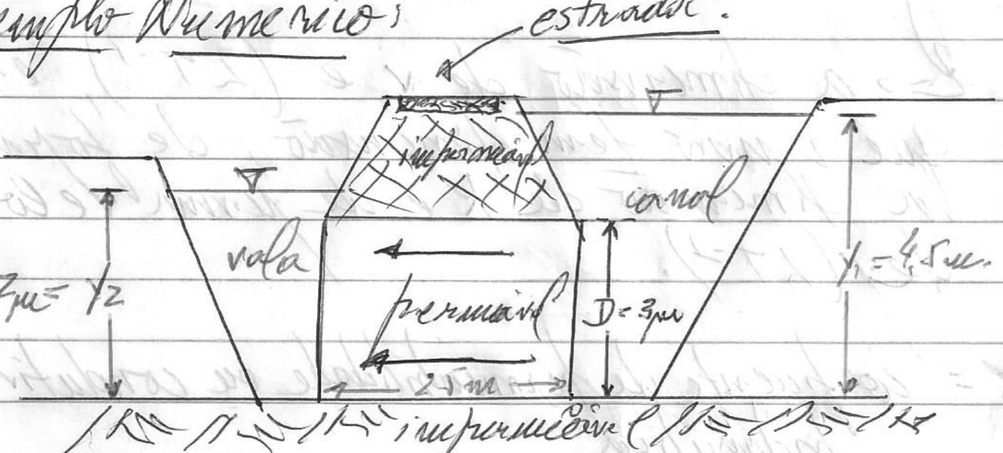
$$\boxed{V_a = \frac{Q}{n \cdot A} = v/n}$$

n = porosidade do solo.

Como n é sempre menor do que 1.

$\Longrightarrow \boxed{V_a > V}$ V_a = velocidade aparente. V = velocidade real

Exemplo Numérico:



Faz-se a intercepitação por meio de uma vala a infiltração que existe abaixo de uma base de uma estrada. A condutividade hidráulica da capa permeável é de 0,4 m/dia

$\Delta h = Y_1 - Y_2 = 4{,}5 - 3{,}2$

$L = 25\ m.$

$i = \Delta h / L = \frac{4{,}5 - 3{,}2}{25} =$ (adimensional).

$K = -0{,}4\ m/dia.$

$V = -K \cdot i = 0{,}4 \cdot \frac{1{,}3}{25} = 0{,}02\ m/dia$

Supondo que a superfície da seção transversal $A = 3\,m$ por m de ~~longitude~~ comprimento de vala, uma vala de 400 m de comprimento, a quantidade de água que flui é: $Q = v \cdot A = 0{,}02 \times 3 \times 400 = 24\ m^3/dia$

(Adicionar foto de um polder)

6.3.2. Constante de proporcionalidade K da Lei de Darcy.

A constante de proporcionalidade K da Lei de Darcy, $v = -K.i$, representa a velocidade aparente de fluxo por unidade de gradiente hidráulico.

⟶ designações: { - condutividade hidráulica.
{ - coef. de permeabilidade.

⟶ depende de: { - propriedades do fluido (água)
{ - " do meio poroso (solo).

O fluxo de água através dos poros do solo pode ser comparado ao fluxo de um fluido através de um tubo de raio uniforme R.

Para o fluxo laminar através do tubo pode a descarga ser expressa pela equação de Hagen - Poiseuille (1842).

$$Q = \frac{\pi . R^4 . \rho . g}{8 . \eta} . \frac{\Delta h}{L}$$

onde:

Q = quantidade de fluxo de fluido $(L^3.T^{-1})$

R = raio do tubo (L).

η = viscosidade dinâmica do fluido $(ML^{-1}.T^{-1})$

Δh = perda de carga entre os dois pontos (L).

L = comprimento do tubo entre os dois pontos (L)

g = aceleração da gravidade (LT^{-2})

ρ = densidade do fluido (ML^{-3}).

Como a área da seção transversal de um tubo de fluxo circular, A, é

$$\boxed{A = \pi \cdot R^2 = \frac{\pi \cdot d^2}{4}}$$ d = diâmetro do tubo.

A Eq. pode ser escrita como:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4}{8\eta} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

$$Q = \frac{A \cdot R^2 \cdot \rho \cdot g}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

$$\boxed{Q = \frac{d^2}{32} \cdot \frac{\rho \cdot g}{\eta} \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A}$$

$$R^2 = \frac{\cancel{\pi} \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{\cancel{\pi}}$$

$$R^2 = \frac{d^2}{4}$$

$$\begin{cases} v = Q/A \\ i = \Delta h/L \end{cases}$$

Logo: $$\boxed{v = \frac{Q}{A} = \frac{d^2}{32} \cdot \frac{\rho \cdot g}{\eta} \cdot i}$$

Experimentos de campo e de laboratório mostram que há uma estreita analogia entre o fluxo laminar em tubos e o fluxo de água através dos solos:

desde que $v = -K \cdot i$ $\Rightarrow$ $$\boxed{K = \frac{d^2}{32} \cdot \frac{\rho \cdot g}{\eta}}$$

onde d representa o diâmetro médio dos poros do solo, que é um parâmetro característico do tamanho médio das partículas.

Introduzindo uma constante adimensional que depende de propriedades físicas tais como:

- porosidade
- distribuição e variação dos poros do solo.
- forma das partículas.
- disposição das partículas.

A Eq. anterior fica.

$$\boxed{K = C \cdot d^2 \cdot \frac{\rho g}{\eta} = K' \frac{\rho \cdot g}{\eta}}$$

onde K' depende da natureza do solo e das propriedades do fluido.

K' = permeabilidade intrínseca (Soil Science of Am., 1952)
K = condutividade hidráulica.

⟹ importância de parâmetros cap. 2, Vol I propr. dos solos

6.3.3. Influência da temperatura.

A temperatura influencia na densidade e na viscosidade da água.
Na prática se despreza a influência sobre a densidade.

$\rho \simeq 1.000\ kg/m^3$

Nem sempre é possível ignorar a influência da temperatura sobre a viscosidade.

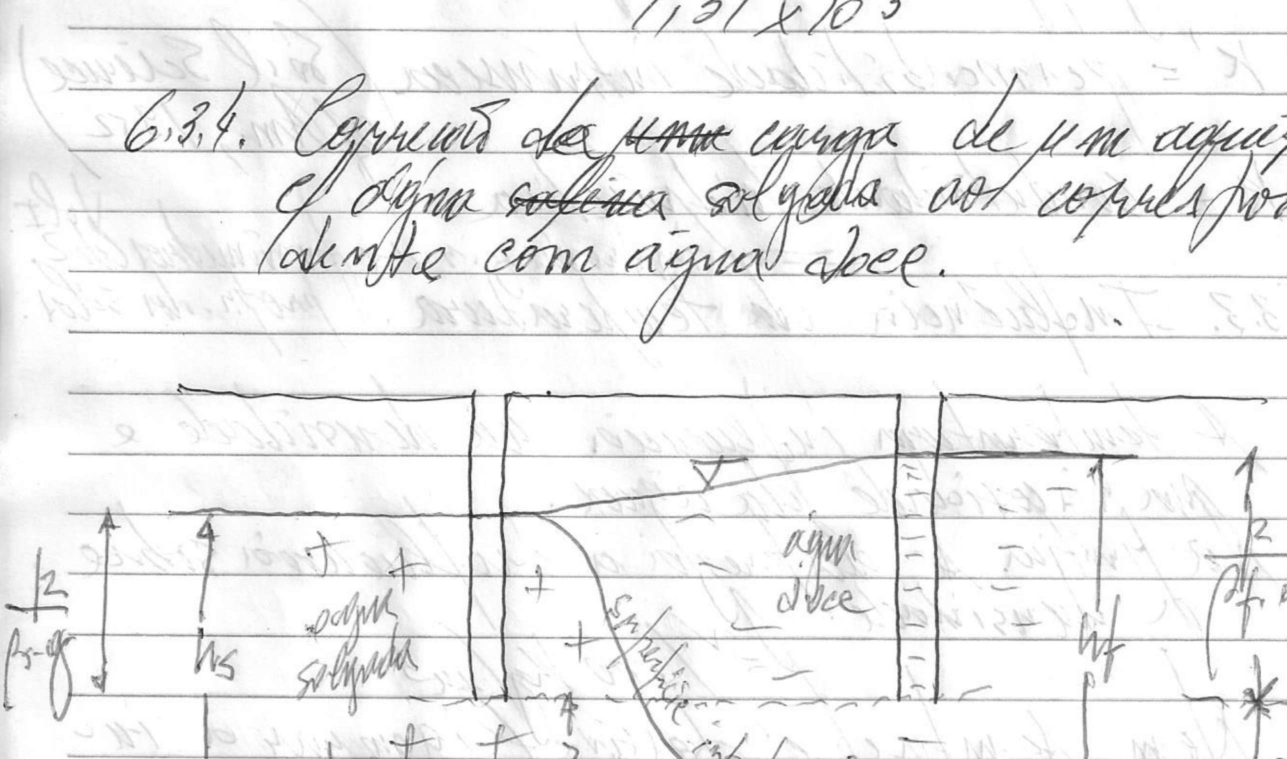
$$\boxed{K_{x^\circ} = K_{y^\circ} \cdot \frac{\eta_{y^\circ}}{\eta_{x^\circ}}}$$ eq. que relaciona condutividade hidráulica a diferentes temperaturas.

<u>Exemplo numérico</u>: A condutividade hidráulica de uma amostra, medida no laboratório a 20°C é de 2m/dia, admitida a temperatura mínima de 10°C qual a nova condutividade hidráulica para essa condição.

$$K_{10^\circ} = K_{20^\circ} \cdot \frac{\eta_{20^\circ}}{\eta_{10^\circ}}$$

$$K_{10^\circ} = 2 \times \frac{1{,}01 \times 10^{-3}}{1{,}31 \times 10^{-3}} = 1{,}5\ m/dia.$$

6.3.4. Correção da ~~uma~~ carga de um aquífero c/ água ~~salina~~ salgada ao correspondente com água doce.



15

Carga de água doce: $h_f = z + \frac{p}{\rho_f \cdot g}$

Carga de água salgada: $h_s = z + \frac{p}{\rho_s \cdot g}$

ρ_f e ρ_s = densidades de água doce e salgada, respect.

$$\frac{p}{g} = h_f \cdot \rho_f - z\,\rho_f = h_s \cdot \rho_s - z \cdot \rho_s$$

$$h_f \cdot \rho_f = h_s \cdot \rho_s + z\,\rho_f - z\,\rho_s$$

$$\boxed{h_f = h_s \cdot \frac{\rho_s}{\rho_f} + z\,\frac{(\rho_f - \rho_s)}{\rho_f}}$$

Se o nível de referência coincide c/ o fundo do piezômetro $z = 0$ a equação anterior fica

$$h_f = h_s \cdot \frac{\rho_s}{\rho_f} = 30\,\frac{1.025}{1000} = 30{,}75\,m$$

$$h_f = \frac{p}{\rho_s \cdot g} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_f}$$

Exemplo Numérico: Se a carga hidráulica medida em água salgada é de 30 m sobre o nível de referência que coincide com o fundo do piezômetro e a densidade da água é 1025 kg/m³, a altura de uma coluna de água de mesmo peso é? Resposta 4E

TABLA 1. Variación de la densidad y de la viscosidad del agua con la temperatura

Temperatura °C	Densidad kg/m^3	Viscosidad dinámica $kg/m\ s$	Viscosidad cinemática m^3/s
0	999,87	$1{,}79 \times 10^{-3}$	$1{,}79 \times 10^{-6}$
5	999,99	$1{,}52 \times 10^{-3}$	$1{,}52 \times 10^{-6}$
10	999,73	$1{,}31 \times 10^{-3}$	$1{,}31 \times 10^{-6}$
15	999,13	$1{,}14 \times 10^{-3}$	$1{,}14 \times 10^{-6}$
20	998,23	$1{,}01 \times 10^{-3}$	$1{,}007 \times 10^{-6}$
25	997,07	$0{,}89 \times 10^{-3}$	$0{,}897 \times 10^{-6}$
30	995,67	$0{,}80 \times 10^{-3}$	$0{,}804 \times 10^{-6}$
40	992,24	$0{,}65 \times 10^{-3}$	$0{,}661 \times 10^{-6}$