

## CAPÍTULO 8: POTENCIAIS DA ÁGUA NO SOLO

### 8.1 ENERGIA POTENCIAL

A grandeza **Energia** (unidade Joule no SI) pode ser classificada de diversas formas. Uma subdivisão comum para os diferentes tipos de energia é a classificação como **energia potencial** ou **energia cinética**. A energia cinética de um corpo deve-se à sua velocidade instantânea, enquanto a energia potencial de um corpo é devida à sua posição instantânea em relação a um campo de forças. Em relação à água no solo, ela se move através do sistema poroso do solo a velocidades baixas e sua energia cinética é quase sempre desprezível se comparada com suas energias potenciais.

Para a descrição do estado energético da água no solo é conveniente expressá-lo por unidade de quantidade de matéria, por exemplo por volume, mol, massa, peso. A grandeza resultante é chamada **energia específica**, e possui as unidades  $\text{J m}^{-3}$  (por volume),  $\text{J mol}^{-1}$  (por mol),  $\text{J kg}^{-1}$  (por massa),  $\text{J N}^{-1}$  (por peso), ou outra.

Verifica-se facilmente que a unidade da energia específica por volume equivale à unidade de pressão (Pascal), ao mesmo tempo em que a unidade da energia específica por peso equivale a um comprimento (metro):

$$\text{Energia por volume: } \frac{J}{m^3} = \frac{N.m}{m^3} = \frac{N}{m^2} = \text{Pa (pressão)}$$

$$\text{Energia por peso: } \frac{J}{N} = \frac{N.m}{N} = m \text{ (distância, altura)}$$

Por essa razão é muito comum expressar a energia específica em unidades de pressão (Pa, atm, bar) ou de comprimento (m, cm). É importante lembrar que elas, de fato, significam respectivamente  $\text{J m}^{-3}$  ou  $\text{J N}^{-1}$ .

### 8.2 POTENCIAL TOTAL DA ÁGUA NO SOLO

A forma de energia de interesse para nossos propósitos é a **energia potencial** a qual pode ser definida como uma **energia latente** que um objeto possui, devido à sua posição em relação a campos de força no Universo. Dependendo do objeto que está sendo estudado e dos campos de força presente, poderão estar

atuando concomitantemente um ou mais tipos de energia potencial, daí a utilização do termo **energia potencial total**, para indicar a soma dos diversos tipos ou componentes atuantes, ser mais adequada. O conhecimento dessa energia é de extrema importância porque com ela se pode determinar o potencial de movimento de um corpo num determinado meio. *A água ou solução no solo, como qualquer corpo no Universo, tende a se mover de onde sua energia potencial total é maior para onde ela é menor.* No entanto, não é necessário, para estabelecer a direção do processo, conhecer os valores individuais da energia potencial total, senão a diferença entre eles. Para facilitar o cálculo dessa diferença, é que se introduziu o conceito de potencial total o qual, no caso da água no solo, é definido com base no conhecimento de uma água com um valor conhecido de energia potencial total denominada **água padrão**. Assim, sendo  $E$  a energia potencial total da água no ponto considerado no solo e  $E_0$  a energia potencial total da água padrão, a diferença  $E - E_0$ , expressa por unidade de volume, massa, peso ou outra é, por definição, a **energia específica potencial total da água no solo**  $\phi_t$ , chamado normalmente de **potencial total da água no solo**. Expressando-o por unidade de volume teremos:

$$\phi_t = \frac{E - E_0}{V_a} \rightarrow [\text{energia / volume de água} = \text{pressão (Pa)}] \quad (8.1a)$$

e por unidade de peso obtemos

$$\phi_t = \frac{E - E_0}{m_a g} \rightarrow [\text{energia / peso de água} = \text{comprimento (m)}] \quad (8.1b)$$

Na nossa abordagem a seguir utilizaremos a energia por unidade de volume. Considerando dois pontos  $A$  e  $B$  no perfil do solo, nos quais, evidentemente,

$$\phi_t(A) = \frac{E_A - E_0}{V_a}$$

e

$$\phi_t(B) = \frac{E_B - E_0}{V_a}$$

então,

$$\phi_t(A) - \phi_t(B) = \left( \frac{E_A - E_0}{V_a} \right) - \left( \frac{E_B - E_0}{V_a} \right) = \frac{E_A - E_B}{V_a} \quad (8.2)$$

Ou seja, como a energia potencial total da água padrão deve ser a mesma para os dois pontos, medindo-se o potencial total nesses dois pontos obtém-se o valor da diferença  $E_A - E_B$  por meio da diferença  $\phi_t(A) - \phi_t(B)$ , sem a necessidade de se conhecer individualmente  $E_A$  e  $E_B$ . Desse modo, se num determinado momento  $\phi_t(A) > \phi_t(B)$ , o movimento da água (se o meio permitir) é de  $A$  para  $B$  porque  $E_A > E_B$

e se  $\phi(B) > \phi(A)$ , de B para A porque  $E_B > E_A$ . Quando  $\phi(A) = \phi(B)$ , tem-se, evidentemente, uma condição de equilíbrio, porque  $E_A = E_B$ .

Evidentemente, cada tipo (ou componente) de energia potencial que estiver atuando na água existente no solo, dá origem a um potencial componente do potencial total da água no solo.

Como a diferença de energia por unidade de volume possui unidade é idêntica à unidade de pressão, todos os potenciais da água no solo, tanto o total como qualquer um dos seus componentes, podem ser considerados como equivalentes a uma “**diferença de pressão**”, isto é, diferença entre a “pressão” da água no ponto considerado do solo, equivalente a  $E/V_a$  e a “pressão” da água padrão, equivalente a  $E_0/V_a$ .

### 8.3 A ÁGUA PADRÃO

Para a resolução de nossos problemas, nos quais estaremos estudando a solução no solo, sob condição isotérmica, a **água padrão** pode ser definida como uma solução livre, de mesma concentração e temperatura que a solução no solo e cuja superfície plana é considerada como referência gravitacional e sujeita à pressão atmosférica do local onde a medida é feita.

Esta definição será mais bem entendida, à medida que formos estudando os componentes do potencial total da água no solo que para nós, por estarmos considerando solos de estrutura rígida, os que interessam são o potencial gravitacional, o potencial de pressão e o potencial mátrico.

### 8.4 POTENCIAL GRAVITACIONAL

Qualquer corpo num campo gravitacional possui uma **energia potencial gravitacional** ( $E_g$ ). A água no solo, estando dentro do campo gravitacional terrestre possui, evidentemente, esta energia, cuja equação, dado a necessidade de incluir neste contexto a água padrão anteriormente definida, pode ser escrita como:

$$\Delta E_g = m_a g (r_1 - r_0) \quad (8.3)$$

sendo  $m_a$  = massa da água no solo;  $g$  = aceleração da gravidade;  $r_1$  = distância do centro da Terra ao ponto considerado no perfil do solo e  $r_0$  = distância do centro da Terra a um ponto **arbitrário** onde se deve imaginar localizada a superfície plana da água padrão e que denominaremos simplesmente de **referência gravitacional**.  $\Delta E_g$ , evidentemente, é o incremento de energia potencial gravitacional que a água adquire quando de seu deslocamento da posição  $r_1$  para a posição  $r_0$  contra ou a favor a força da gravidade.

Pela definição de potencial (equações 8.1a e 8.1b), expressando por unidade de volume, o potencial gravitacional  $\phi_g$  seria dado, a partir da equação acima, por

$$\phi_g = \frac{\Delta E_g}{V_a} = \rho_a g (r_1 - r_0) \quad (8.4a)$$

ou, expressando por unidade de peso, por

$$\phi_g = \frac{\Delta E_g}{m_a g} = r_1 - r_0 \quad (8.4b)$$

em que  $\rho_a = m_a/V_a$  = densidade da água do solo, considerada constante.

Chamando, então, o valor da distância vertical do ponto considerado à posição da referência gravitacional, de  $Z$ , isto é,

$$Z = r_1 - r_0 \quad (8.5)$$

reescrevemos as equações 8.4a e 8.4b como:

$$\phi_g = \rho_a g Z \rightarrow [\text{energia} / \text{volume}] \quad \text{ou} \quad \phi_g = Z \rightarrow [\text{energia} / \text{peso}] \quad (8.6)$$

sendo que o sinal de  $Z$  e, portanto, de  $\phi_g$  dependerá da posição do ponto considerado em relação à referência gravitacional, isto é, o sinal será positivo se o ponto estiver acima da referência gravitacional ( $r_1 > r_0$ ), negativo se estiver abaixo ( $r_1 < r_0$ ) e nulo se for coincidente com ela ( $r_1 = r_0$ ).

Observando as expressões 8.6, se dividirmos o valor de  $\phi_g$ , expresso na unidade energia/volume pela quantidade  $\rho_a \cdot g$ , obtemos o valor de  $\phi_g$  na unidade **altura de água** ou **carga hidráulica**.

Portanto, para obtermos o valor de  $\phi_g$  num determinado ponto, precisamos apenas de uma régua para medirmos a distância vertical deste ponto à posição tomada como referência gravitacional, que a unidade do resultado obtido será em altura de água, ou seja, se a distância medida for, por exemplo, 1 m, o valor de  $\phi_g$  será *1 m de água* se o ponto estiver acima da referência gravitacional e *-1 m de água*, se o ponto estiver abaixo da referência gravitacional. Como entendemos agora, o significado de “1 metro de água” nada mais é do que “1 Joule de energia por Newton de peso de água”.

### 8.5 POTENCIAL DE PRESSÃO

Num solo com estrutura rígida, este componente do potencial total só se manifesta sob uma condição de saturação. Para defini-lo, consideremos o esquema da Figura 8.1.

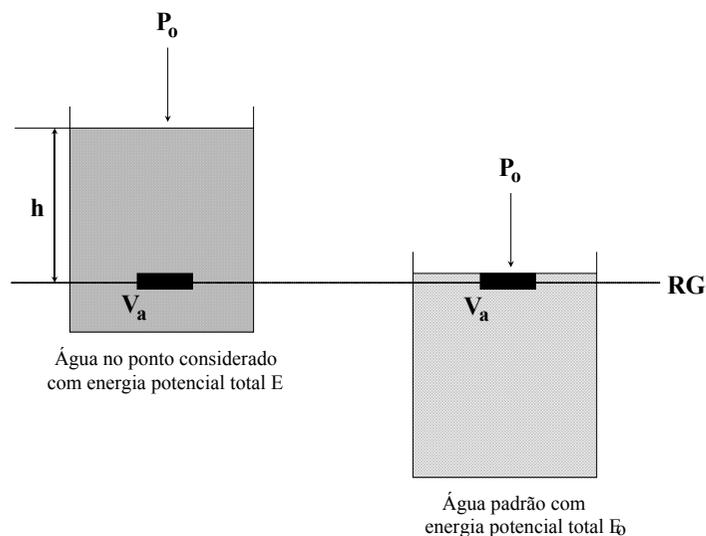


Figura 8.1 - Definição do potencial de pressão

O pequeno volume de água  $V_a$  em equilíbrio no recipiente do lado direito desta figura é a água padrão (com energia potencial total  $E_0$ ) porque sobre sua interface plana está atuando a pressão atmosférica ( $P_0$ ) e seu centro de massa é coincidente com a referência gravitacional ( $RG$ ). Por outro lado, igual volume de água  $V_a$ , em equilíbrio, no recipiente do lado esquerdo da figura, é diferente do primeiro apenas por nele atuar também a pressão da altura de água  $h$ . Note, então, que a única diferença entre os dois volumes é a pressão de água  $P = \rho_a gh$  que atua no volume da esquerda. Conseqüentemente, é esta pressão  $P$  que torna a energia potencial total  $E$  do volume de água  $V_a$  à esquerda (no ponto considerado) maior do que a energia potencial total  $E_0$  do volume de água  $V_a$  à direita (água padrão): se for permitida uma comunicação entre os dois volumes, a água, por ação desta pressão, flui em direção à água padrão indicando que  $E > E_0$ .

Pela definição de potencial (equação 8.1a) e pelo fato de a única diferença entre a água padrão e a água no ponto considerado ser a pressão de líquido no ponto considerado, tem-se, com base no último parágrafo do item 1, que:

$$\phi_p = \frac{E - E_0}{V_a} = \rho_a gh \rightarrow [\text{energia} / \text{volume}] \quad (8.7)$$

sendo  $\phi_p$  = potencial de pressão

De modo idêntico ao que vimos no caso do potencial gravitacional, em termos de carga hidráulica,

$$\phi_p = h \quad [\text{energia} / \text{peso} = \text{altura de água}] \quad (8.8)$$

Note, no entanto, que, no caso deste potencial de pressão,  $h$  é uma carga hidráulica real que atua no ponto considerado.

Como se pode ver pela equação 8.8,  $\phi_p$  pode ser determinado medindo o comprimento  $h$  da coluna de líquido que atua acima do ponto de medida. No campo, isto é feito inserindo um piezômetro no solo, adjacente ao ponto onde se deseja conhecer  $\phi_p$  e mede-se a profundidade  $h$  do ponto abaixo da superfície livre de água no piezômetro (Figura 8.2). Portanto, o valor do potencial de pressão é sempre positivo ou no mínimo igual a zero. Esta última situação ( $\phi_p = 0$ ) ocorre quando o ponto se localiza na superfície livre de água.

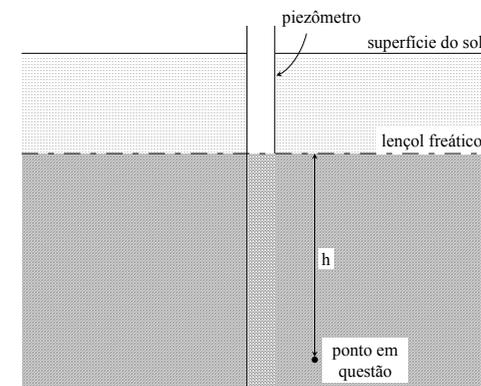


Figura 8.2 - Ilustração da medida de  $\phi_p$  num determinado ponto no solo abaixo de um lençol de água, por meio de um piezômetro.

## 8.6 POTENCIAL MÁTRICO

Consideremos um determinado volume de solo não saturado. É fácil verificar que para retirar a quantidade de água em equilíbrio nele existente é necessário um dispêndio de energia, o qual é tanto maior quanto mais seco estiver o solo. Isso nos leva a concluir que o solo retém a água no seu espaço poroso com forças cujas intensidades aumentam conforme a quantidade de água nele diminui. Essas forças, por se manifestarem devido à presença da matriz do solo, são denominadas de **forças mátricas**.

Distinguem-se dois tipos de força mátrica: a) as **forças capilares**, responsáveis pela retenção da água nos microporos dos agregados e b) as **forças de adsorção**, responsáveis pela retenção da água nas superfícies das partículas do solo. Quantificar a contribuição de cada um desses tipos de força no potencial mátrico é praticamente impossível na faixa do conteúdo de água no solo que as plantas normalmente se desenvolvem. O que se pode dizer, em termos qualitativos, é que logo após a drenagem livre de um solo saturado no campo, as forças capilares são dominantes e que, à medida que o solo seca a partir daí, a adsorção vai adquirindo maior importância.

Estes dois mecanismos de retenção da água no solo pelas forças capilares e de adsorção reduzem a energia potencial total da água livre. A veracidade desta afirmação pode ser demonstrada tanto pelo fato de se ter que realizar trabalho para retirar a água de um solo não-saturado, como também pelo fato de que ao se colocar água livre em contato com um solo não saturado, num mesmo plano horizontal, ela flui espontaneamente para ele, comprovando, como em todas as situações, a tendência da água em mover-se de onde sua energia potencial total é maior para onde ela é menor. Portanto, ao se realizar um trabalho para liberar a água da influência das forças mátricas tornando-a livre, o que se faz é, nada mais nada menos, do que elevar o valor da energia potencial total da água no solo ao valor daquela da água livre.

Como **potencial**, por definição, é a diferença entre a energia potencial total da água num determinado solo e a energia potencial total da água padrão (=água livre) por unidade de volume de água, quando a única causa da diferença de energia potencial total da água padrão e a da água no solo considerado forem as forças mátricas que atuam na água retida no solo, o potencial recebe o nome de **potencial mátrico**  $\phi_m$ .

Chamando, então, de  $E_o$  a energia potencial total da água padrão e de  $E$  a energia potencial total da água no solo considerado, de tal maneira que a única diferença entre elas seja a existência das forças mátricas que retêm a água no solo considerado, tem-se, para um volume  $V_a$  de água (Figura 8.3):

$$\phi_m = \frac{E - E_o}{V_a} \rightarrow [\text{energia / volume de água}] \quad (8.9)$$

Portanto, como  $E$  nesta situação (solo não-saturado), é sempre menor do que  $E_o$  (a não ser no caso particular de uma interface ar-água como num lençol freático na qual  $E = E_o$  e então  $\phi_m = 0$ ), o valor do potencial mátrico é sempre negativo. Daí dizer-se também que o potencial mátrico é igual ao trabalho, por unidade de volume de água, **gasto** para liberar a água da influência das forças mátricas, isto é,  $\phi_m = -W/V_a$  (Figura 8.3). Este trabalho pode ser conseguido aplicando-se, por exemplo, uma pressão de ar  $P^*$  à água no solo: toda água retida nos poros com uma energia/volume menor do que a pressão  $P^*$ , é liberada da influência das forças mátricas e torna-se livre. Portanto, a pressão  $P^*$  eleva o valor da energia/volume da água no solo àquele da água padrão, pelo que  $\phi_m = -P^*$  e  $P^* = (E_o - E)/V_a$ .

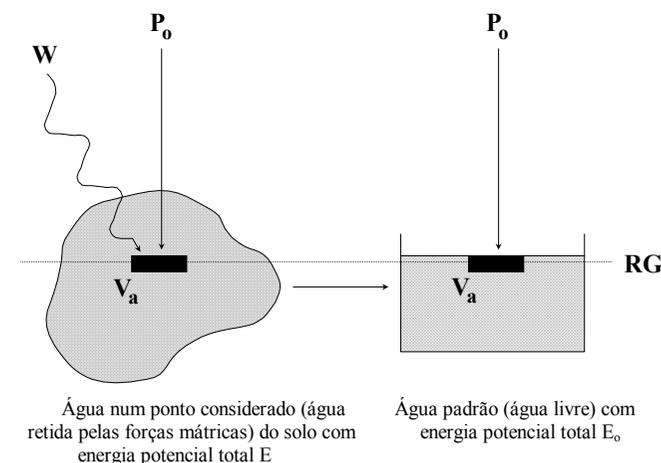


Figura 8.3 - Definição do potencial mátrico.