Campos escalares asociados a los campos de fuerzas que intervienen en el comportamiento de un suelo no saturado. Potenciales

Scalar Fields Associated with Force Fields Taking Place in the Behaviour of Unsaturated Soil. Potentials

Ignacio Sáez Gómez [1*]**, Jesús Sáez Auñón**[2]

Resumen

Los conceptos teóricos presentados en el artículo "Campos de fuerzas en los suelos no saturados. Conceptos básicos", definiendo los diferentes campos que intervienen en el sistema suelo-agua-aire, se han transformado matemáticamente en campos escalares asociados a fin de facilitar su utilización práctica y dar paso al planteamiento de las expresiones básicas que gobiernan el comportamiento geotécnico de estos suelos. En dicho proceso se han obtenido los potenciales correspondientes a cada uno de los campos considerados, así como el potencial total que resulta de la actuación de los mismos. De la expresión del potencial total se han extraído las expresiones correspondientes a la presión intersticial y a la succión en sus componentes matricial y osmótica.

Palabras clave: Suelos no saturados, campos escalares asociados, potenciales parciales, potencial total, succión.

Abstract

The theoretical concepts developed in the article "Force Fields in Unsaturated Soils. Basic Concepts ", defining the different fields involved in the soil-water-air system, have been mathematically transformed into the equivalent associated scalar fields in order to facilitate their practical use and give way to an approach to the basic expressions that govern the geotechnical behavior of such soils. In this process, the potentials corresponding to each field have been taken into account as well as the total potential resultant from their intervention. From the total potential expression, it has been deduced those corresponding to the interstitial pressure in an unsaturated soil and to the matrix and osmotic components of suction.

Keywords: *Unsaturated soils, associated scalar fields, partial potentials, total potential, suction.*

1. INTRODUCCIÓN

En un artículo de esta misma revista titulado "Campos de fuerzas en los suelos no saturados. Conceptos básicos", se describieron los principios físicos y fisicoquímicos que intervienen en la formación de los campos de fuerzas que actúan como consecuencia de la coexistencia de las tres fases, sólido, líquido y gas, en los suelos en estado no saturado.

Sin embargo, su propia naturaleza vectorial dificulta la cuantificación de los efectos debidos a cada uno. Para poder avanzar, sobre todo en el aspecto conceptual, vamos a admitir una simplificación que nos permita asociar a cada campo vectorial un campo escalar y por consiguiente unificar con mayor facilidad el efecto de estos campos.

2. CAMPO ESCALAR ASOCIADO

Si tenemos en cuenta que el movimiento del agua en el suelo bajo los efectos de estos campos de fuerza sería lento e incluso en ocasiones de naturaleza especial, vamos a admitir que en cualquiera de estos procesos la pérdida de energía sea muy pequeña, de forma que podamos considerar que se trata de campos conservativos y que por consiguiente derivan de un potencial (Russell, 1942).

Aceptando esto, sabemos que la condición matemática que debe cumplirse es que, la integral curvilínea a lo largo de una línea cerrada, del producto escalar del vector campo por el vector desplazamiento debe ser cero. Esto es:

$$\oint \bar{F} \cdot d\bar{l} = 0$$

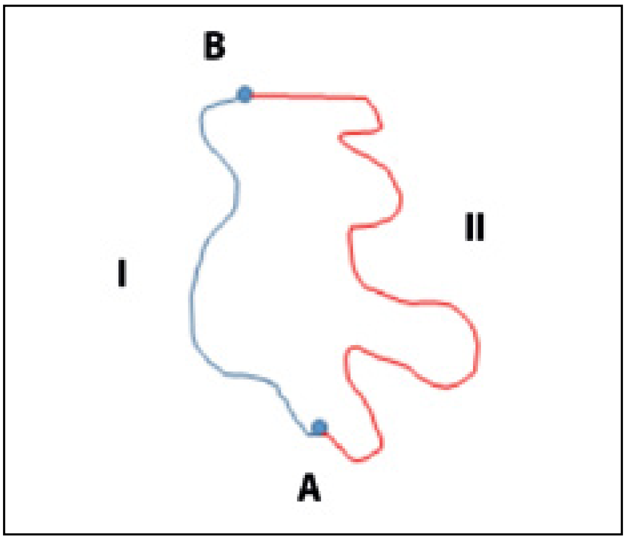

Figura 1. Campo escalar

[*] Autor de contacto: ignaciosaezgomez@yahoo.es

[1] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

[2] Doctor en Ciencias Físicas.

Vamos entonces a considerar dos puntos del campo, A y B, unidos por dos caminos diferentes I y II.

Según lo anterior, debería verificarse que $\int_A^B \bar{F}\cdot d\bar{l}$ a lo largo del camino I más $\int_B^A \bar{F}\cdot d\bar{l}$ a lo largo del camino II debe ser cero. Despejando resulta que $\int_A^B \bar{F}\cdot d\bar{l}$ a lo largo del camino I es igual a $-\int_B^A \bar{F}\cdot d\bar{l}$ a lo largo del camino II. Por tanto cambiando los límites de integración resulta que $\int_A^B \bar{F}\cdot d\bar{l}$ a lo largo del camino es igual a $\int_A^B \bar{F}\cdot d\bar{l}$ a lo largo del camino II.

O sea, que el trabajo realizado por el vector campo entre un punto y otro, es independiente del camino seguido y vale precisamente la diferencia de los valores que tiene en B y A. Si a cada uno de los puntos del campo le asignamos un valor de la energía potencial tendremos

$$\int_A^B \bar{F}\cdot d\bar{l} = -(Ep_B - Ep_A)$$

El signo menos se debe a los diferentes sentidos en que evolucionan trabajo y energía.

Despejando

$$Ep_B = Ep_A - \int_A^B \bar{F}\cdot d\bar{l}$$

Hasta ahora hemos asignado los valores de la energía arbitrariamente; sin embargo, de hecho, debemos referirlos a un nivel, valga la redundancia, de referencia, en el que la energía la tomamos como cero; esto es $Ep_A=0$. Además, dado que este nivel lo podemos elegir, vamos a tomar precisamente el nivel freático.

Por otro lado, sabemos que no influye el camino, por lo que vamos a tomar precisamente el perpendicular al nivel freático, asignando signo positivo a las fuerzas hacia arriba y negativo a las que actúan hacia abajo.

Esto, además, tiene la ventaja de que las direcciones de $\bar{F}$ y $d\bar{l}$ siempre coinciden, solamente varía el sentido de un caso a otro; por tanto el coseno del ángulo que forman valdrá 1 o -1 (puesto que el ángulo entre ambos será 0º ó 180º). Así pues, como $Ep_A=0$ y el producto escalar queda reducido al producto de los módulos

$$Ep_B = -\int F\cdot dl$$

Recordando que el potencial en un punto se define como la energía potencial dividida por la unidad activa (la masa en nuestro caso), nos queda:

$$\Psi = \frac{Ep}{m} = -\frac{1}{m}\int F\cdot dl \quad \text{o sea}$$

$$\Psi = -\frac{1}{m}\int F\cdot dl$$

Expresión que nos permite calcular el potencial asociado a cada uno de los campos vectoriales que intervienen en la interacción de las tres fases que constituyen nuestro sistema.

2.1. Potencial gravitacional

La fuerza F_g será negativa, luego:

$$\Psi_g = -\frac{1}{m}\int F_g\cdot dl = g$$

2.2. Potencial debido a la carga

La presión ejercida por la capa en cada elemento de volumen será $d(\alpha P_c)$, luego la fuerza será $d(\alpha P_c)\,ds$ (negativa)

$$\Psi_c = -\frac{1}{m}\int F\cdot dl = \int \frac{d(\alpha P_c)ds}{m}\,dl$$

Teniendo en cuenta que $m = \gamma_w ds\, dl$ y que $\rho_w = \frac{\gamma_w}{g}$ y llamando $P = \frac{P_c}{\gamma_w}$:

$$\Psi_c = \int \frac{d(\alpha P_c)ds}{\rho_w\, ds\, dl}\,dl = \frac{1}{\rho_w}\int d(\alpha P_c) = \frac{\alpha\, P_c}{\rho_w} = \frac{g\ \alpha\ P_c}{\gamma_w} = g\ \alpha\ P$$

Hay que tener en cuenta que las dimensiones de P son las de una presión dividida por un peso específico; o sea, una longitud.

2.3. Potencial neumático

La presión en la fase gaseosa es dP_{ga}, luego la fuerza será dP_{ga} ds(negativa)

$$\Psi_{ga} = -\frac{1}{m}\int F\cdot dl = \int \frac{dP_{ga}\,ds}{m} = \int \frac{dP_{ga}\,ds}{\rho_w\, ds\, dl}\,dl$$

Teniendo en cuenta que $\rho_w = \frac{\gamma_w}{g}$ y que $\rho_w = \frac{\gamma_w}{g}$:

$$\Psi_{ga} = \frac{1}{\rho_w}\int dP_{ga} = \frac{P_{ga}}{\rho_w} = g\ \pi$$

Las dimensiones físicas de π son las de una presión dividida por un peso específico.

2.4. Potencial matricial

En este caso, las fuerzas que se derivan de las presiones de origen capilar y de adsorción, son dP_m ds. El signo será positivo puesto que actúan en sentido hacia arriba.

$$\Psi_m = -\frac{1}{m}\int F\cdot dl = -\int \frac{dP_m ds}{\rho_w\, ds\, dl}dl = -\frac{1}{\rho_w}\int dP_m$$

Teniendo en cuenta que $\rho_W = \frac{\gamma_w}{g}$ y que $S_m = \frac{P_m}{\gamma_w}$:

$$\Psi_m = -\frac{P_m}{\delta_w} = -\frac{g\ P_m}{\gamma_w} = -g\ S_m$$

Igual que en los casos anteriores las dimensiones de S_m corresponden a una longitud.

2.5. Potencial osmótico

La fuerza será la que deriva de la presión osmótica, esto es dP_0 ds. El signo será positivo también.

$$\Psi_o = -\frac{1}{m}\int F\cdot dl = -\int \frac{dP_o\, ds}{\rho_w\, ds\, dl}dl = -\frac{1}{\rho_w}\int dP_o$$

Teniendo en cuenta que $\rho_W = \frac{\gamma_w}{g}$ y que $S_o = \frac{P_o}{\gamma_w}$:

$$\Psi_o = -\frac{P_o}{\rho_w} = -\frac{g\,P_o}{\gamma_w} = -g\,S_o$$

También en este caso S_o tiene dimensiones de longitud.

3. POTENCIAL TOTAL

El potencial total lo obtendremos simplemente sumando algebraicamente los potenciales parciales

$$\Psi = \sum \Psi_i = \Psi_g + \Psi_{ga} + \Psi_c + \Psi_s + \Psi_o$$

Sustituyendo los valores:

$$\Psi = g\,l + g\,\alpha\,P + g\,\pi - g\,S_m - g\,S_o =$$

$$= g[l + \alpha P + \pi - S_m - S_o]$$

Recordando que todos los términos l, αP, π, S_m y S_o equivalen a una longitud y que cada uno representa en forma escalar la acción del campo de fuerzas correspondiente, siempre referido al nivel freático y actuando en la dirección perpendicular a este, podemos sustituir su suma algebraica por una altura h medida desde el nivel freático, de manera que:

$$\Psi = g\,h$$

Esto nos dice que el agua en el interior de un volumen de suelo, situado a una altura h sobre el nivel freático, tiene una energía potencial m g h (siendo m la masa de suelo de ese volumen) con la que puede realizar trabajo por medio de alguno o todos, según el caso, campos vectoriales (Schofield, 1935).

Se puede incluir ahora la definición termodinámica del potencial del agua del suelo, en un determinado punto, situado por encima del nivel freático, como el trabajo necesario contra las fuerzas de los campos, para trasladar la unidad de masa de agua, de forma isotérmica y reversible, desde el nivel freático hasta el punto considerado.

3.1. Presión intersticial

Considerando los potenciales debidos a la carga y a la succión tendremos

$$\Psi = \Psi_c + \Psi_s = g\,\alpha\,P - g\,S = g(\alpha P - S) = g\,u$$

$con\ \ S = S_m + S_o$ queda

$$u = \alpha P - S$$

Esto nos indica (Croney, Coleman y Black, 1958) que, en el terreno, en un punto, este estará sometido a la tensión debida al peso del material que está por encima y a las cargas que pueda haber, con lo que el agua en los poros podrá estar a una presión superior o inferior a la atmosférica, dependiendo de los valores relativos de la succión y de la parte de la carga que haya transmitido al agua.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Mediante la aplicación del concepto matemático de campo escalar asociado a un campo vectorial y suponiendo que puede aceptarse que estos se comportan de forma reversible, se han deducido las expresiones de los correspondientes potenciales, así como la del potencial total, que permite acceder al concepto de succión.

5. BIBLIOGRAFÍA

Adamson, A.W. (1976). *Physical Chemistry of Surfaces*, Third Edition. Nueva York (EE UU): Wiley & Sons.

Childs, E.C. (1969). *An Introduction to the Physical Basis of Soil Water Phenomena*. Nueva York (EE UU): Wiley & Sons.

Croney, J.D., y Coleman J.D. (1952). The Suction of Moisture Held on Soils and Other Porous Materials. *Road Research Technical*. Paper 24. Londres (RU): H.M. Stationery Office (HMSO).

Mitchell, J.K., y Kenichi, S. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*. Nueva York (EE UU): Wiley.

Russell, M.B. (1942). The utility of the energy concept of soil moisture. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 7: pp. 90-94.

Schofield, R.K. (1935). The pF of the water in soil. *Trans. 3rd Int. Cong. Soil Sci.* 2: pp. 37-48.