Campos de fuerzas en los suelos no saturados. Conceptos básicos Fields of Forces in Unsaturated Soils. Basic Concepts

Ignacio Sáez Gómez 1*, Jesús Sáez Auñón²

Resumen

En el estudio de los problemas geotécnicos se utilizan generalmente planteamientos mecánicos, basados en expresiones planteadas o deducidas desde un enfoque de suelo en estado saturado. En el presente artículo se proponen las bases teóricas, físicas y fisicoquímicas necesarias para abordar el estudio del comportamiento de los suelos, cualquiera que sea su grado de saturación definiendo los campos de fuerzas que intervienen en la interacción suelo-agua-aire. Los campos considerados son el gravitatorio, el debido a las sobrecargas, el producido por una presión exterior en la fase gaseosa, así como los debidos a las fuerzas matriciales y a las osmóticas. En cada caso se analizan los conceptos básicos a considerar, así como la magnitud de su influencia en el estado final del suelo. En particular se presta especial atención a los fenómenos fisicoquímicos que intervienen en los materiales de naturaleza arcillosa.

Palabras clave: Suelos no saturados, campos de fuerzas, conceptos físicos, fenómenos osmóticos, arcillas.

Abstract

In the study of geotecnical problems, mechanical methods, based on rules deduced for saturated soils, are usually used. In this article, the theoretical, physical and physicochemical bases necessary to develop a similar study for unsaturated soil are presented. Furthermore, these bases include the definition of the fields of forces, which take place during the interaction of the three phases, that is, soil, water and air. Such fields are the gravitatory one, the one due to overburden, the one produced by an outer presure in the gaseous phase and, also, those produced by matrix and osmotic forces. In each case, both the basic concepts and their influence in the final state of soil are considered. Special attention is given to the physicochemical phenomena taking place in clayey materials.

Keywords: Unsaturated soils, force fields, physical aspects, osmotic phenomena, clays.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo del proceso formativo necesario en el estudio de la Mecánica del Suelo se debe considerar evidentemente, la combinación entre los conceptos ingenieriles y la naturaleza de los materiales que componen el suelo. Según los conceptos fijados por Terzaghi y en opinión del Profesor Jiménez Salas, las consecuencias de cualquier acción mecánica sobre un suelo, depende exclusivamente de una variable denominada presión efectiva que se define como la diferencia entre la presión aplicada y la generada en el agua de los poros.

Sobre esta idea se ha desarrollado y utilizado en la práctica una teoría que considera al suelo en cuestión en un estado saturado. Es evidente que tal hipótesis no se cumple en muchas de las situaciones reales, lo que dificulta e incluso imposibilita en ciertos casos, la explicación de las causas que provocan determinados problemas. Esto ha conducido, a lo largo del tiempo, al estudio del comportamiento de los suelos, cuando se encuentran en un estado "no saturado", o lo que es igual, no todo el espacio interior accesible de su estructura, está lleno de agua.

Es evidente que este estudio implica por un lado principios básicos de la Mecánica y la Hidráulica, y por otro los de la Física y Fisicoquímica actuando conjuntamente sobre las componentes de la fracción sólida, cuya naturaleza y composición, condiciona los efectos de tales principios.

Los planteamientos básicos de los modelos conceptuales de uso normal en Ingeniería Civil tienden a utilizar medios continuos y enfoques macroscópicos. Con respecto al primero de estos supuestos de hace abstracción de la discontinuidad (carácter discreto) básica de los medios naturales, adoptándose elementos suficientemente grandes para que en ellos no repercuta la referida condición discontinua. Con relación al segundo, se trata de establecer magnitudes de comparación en las cuales no repercuta el carácter singular de los componentes fundamentales de los materiales o el suelo.

En el caso de los suelos con inestabilidad de volumen, los mecanismos de interacción electroquímica entre las distintas fases que los constituyen producen una compleja situación "microscópica", al nivel de las partículas del suelo, que constituyen unidades de orden inferior al "elemento de suelo" adoptado en los modelos de análisis.

Asimismo, el planteamiento habitualmente empleado en los estudios de filtración, de suponer los medios continuos superpuestos (suelo y fluido percolante), se complica aquí por una interacción entre ambos no solo a nivel macroscópico, sino y fundamentalmente a un nivel microscópico bastante más complejo de traducir macroscópicamente. En el nivel microscópico actúan fenómenos electroquímicos que suele ser muy poco frecuente considerar en Ingeniería Civil, donde los potenciales mecánicos "macroscópicos" son los de consideración y cuantificación habituales.

^{*} Autor de contacto: ignaciosaezgomez@yahoo.es

¹ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

² Doctor en Ciencias Físicas.

La información sobre estos temas, así como sobre la resolución de situaciones reales acumulada a lo largo de los últimos años, es de tal magnitud que la adquisición de la base teórica y experimental necesarias para trabajar en este campo de los suelos no saturados es complicada; en ocasiones insuficiente, en otras redundante, y en su mayoría muy particularizada, dificultando la conexión conceptual con el resto.

Por este motivo y con la finalidad de disponer de un punto de partida para el estudio de esta parte de la Mecánica del Suelo, se ha preparado una serie de artículos con los que se pretende, de una forma ordenada y progresiva, fundamentar los conceptos básicos que intervienen, establecer las modificaciones necesarias de las expresiones fundamentales y finalmente proceder a su aplicación en problemas reales en las actuaciones geotécnicas.

Dado que un estudio del comportamiento de los suelos en este nuevo estado no saturado implica la consideración de tres fases sólida, liquida y gaseosa, se procederá primeramente a la identificación de los diferentes mecanismos que actúan entre las distintas fases, analizándolos dentro de los campos de la Física y la Fisicoquímica, según sea el caso.

Habida cuenta de que estos conceptos implican campos de fuerzas o lo que es igual, campos vectoriales con su inherente dificultad de manejo, se transformarán estos en campos escalares asociados que como resultado nos permitirá la definición del concepto de succión desde un punto de vista energético.

En la serie de artículos se propone continuar con el establecimiento de las expresiones fundamentales, presiones efectivas, resistencia al esfuerzo cortante y deformabilidad (variaciones de volumen), que gobiernan el comportamiento de los suelos no saturados y finalmente sus aplicaciones en temas concretos de la Ingeniería Civil.

2. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA INTERRELACIÓN ENTRE LAS FASES

2.1. Aspectos generales

Es un hecho conocido que cuando coexisten las tres fases, solido, líquido y gas, como es el caso de un suelo no saturado, actúan diversos mecanismos que dependen de la naturaleza y composición del suelo, que hacen que el agua que queda retenida en las partículas sólidas o se traslada de un punto a otro.

Este hecho es debido a la acción de diferentes campos de fuerzas presentes en el sistema, cada uno de una naturaleza diferente y un rango de acción distinto, que además se solapan entre si haciendo muy difícil la valoración de la influencia de cada uno por separado en el resultado final; esto es, el estado en el que se encuentra el agua en el suelo (Mitchell 1993).

Así pues, parece que en primer lugar sería conveniente identificar todos y cada uno de dichos campos de fuerzas, analizando sus efectos, de forma que se tenga una idea clara de su influencia.

2.2. Campos de fuerzas presentes

Los diferentes campos de fuerzas que entran en juego en la interrelación existente entre las partículas del suelo y las moléculas de agua pertenecen, de acuerdo con su forma de actuación a dos grupos, los exteriores y los interiores. Los primeros debidos a factores externos a la partícula del suelo y la molécula de agua y los internos a fenómenos de naturaleza física y fisicoquímica. Dentro del primer grupo se encuentran: el gravitacional, el debido a la presión mecánica exterior ejercida por las sobrecargas y el debido a la presión impuesta exteriormente en la fase gaseosa. Dentro del segundo grupo se incluyen los matriciales y los osmóticos, subdividiéndose los primeros en capilares y de adsorción. Esquemáticamente podemos presentar el conjunto de la forma siguiente:



En principio, los campos de fuerzas exteriores tienden a originar una presión en la fase líquida que trae consigo un desplazamiento o una salida de agua de la masa de suelo con la consiguiente reducción de su contenido. Por el contrario, los campos, capilar y de adsorción tienden a atraer y fijar en el suelo moléculas de agua. Solamente el osmótico puede tener ambos comportamientos, dependiendo de la diferencia de concentración que pueda haber entre el agua del suelo y la exterior.

2.2.1. Campo gravitatorio

Con respecto a las fuerzas debidas a este campo únicamente podremos decir que bajo su acción la unidad de masa de agua estará sometida a una fuerza vertical y hacia abajo que será igual al producto de dicha masa por la aceleración de la gravedad.

2.2.2. Campo de fuerzas debido a las sobrecargas

Si consideramos una unidad de volumen de suelo, a una determinada profundidad por debajo de la superficie, estará sometida a una presión P_c más las cargas debidas a estructuras que pueda tener encima. Al no estar saturado el suelo lo único que podremos afirmar es que una parte αP_c de esta presión se transmitirá al agua, mientras que el resto (1- α) P_c será soportada por el esqueleto sólido. Este coeficiente se puede obtener bien, experimentalmente de la curva de variación del volumen en función de la humedad (curva de entumecimiento) o bien empíricamente a partir del índice de plasticidad

```
Si
```

I.P.<5	α=0
I.P.>40	α=1
5≤I.P.≤40	α=0.027 I.P 0.12

Más adelante volveremos sobre el significado geotécnico de este coeficiente.

2.2.3. Campo debido a la presión exterior en la fase gaseosa

Este campo de fuerzas tiene su origen principalmente en las manipulaciones, siempre externas, que se realizan con las probetas en los ensayos encaminados al control de la succión. En dichos ensayos se utiliza generalmente aire o un gas inerte como el nitrógeno para cambiar la presión de la fase gaseosa.

Para comprender mejor los procesos físicos que tienen lugar vamos a considerar tres situaciones cada una correspondiente a un contenido de agua diferente.

2.2.3.1. Prácticamente existe continuidad en la fase líquida

En este caso es fácil comprender que al aplicar una presión a la fase gaseosa esta se transmita íntegramente a la fase líquida produciendo una salida de agua de la masa de suelo, con la consiguiente pérdida de humedad.

2.2.3.2. No hay continuidad en la fase líquida, pero hay agua en los contactos entre partículas

En este caso el agua estará en los poros pequeños y formando meniscos. Dado que, en estos, la curvatura de la interfase (agua-aire) es cóncava hacia la fase líquida, la presión en esta será menor a la existente en la fase gaseosa.



Figura 1. Meniscos entre las partículas de suelo.

La reducción de la cantidad de agua del menisco implica que las fuerzas de tensión superficial han realizado el trabajo necesario para reducir la superficie de la interfase, mientras que la diferencia de presión entre las fases gaseosa y líquida dará lugar al trabajo necesario para reducir el volumen del menisco. Si para simplificar admitimos que este tiene forma de casquete esférico tendremos:

Trabajo de las fuerzas superficiales

 $\sigma[4\pi(R+dR)^2-4\pi R^2]$

Trabajo de las fuerzas de volumen

$$(P_g - P_a) \left[\frac{4}{3} \pi (R + dR)^3 - \frac{4}{3} \pi R^3 \right]$$

Desarrollando, despreciando términos de orden superior e igualando ambos trabajos nos queda

$$8\pi\sigma R dR = (P_g - P_a)4\pi R^2 dR$$
 luego

$$P_g - P_a = \frac{20}{R}$$

Esta expresión indica que al aumentar la presión en la fase gaseosa es necesario para mantener la igualdad disminuir el radio de curvatura del menisco, o lo que es igual disminuir el volumen de agua del mismo. Más adelante estos símbolos, $P_g y P_a$, se cambiarán por $u_a y u_w$ respectivamente, a fin de mantener la nomenclatura habitual internacionalmente.

2.2.3.3. Solamente existe agua en la superficie de las partículas y algún contacto

En este caso la variación de la humedad debida a un cambio de la presión en la fase gaseosa solamente puede explicarse por medio de la Termodinámica. A la temperatura considerada, una parte del agua habrá pasado a la atmosfera de los poros en forma de vapor creando una determinada presión parcial de vapor, que contrarresta el paso de más moléculas de la fase líquida a la fase gaseosa.

Sabemos que, si dos fases de una misma sustancia están en equilibrio, como vamos a admitir que sea nuestro caso, se debe cumplir que sea igual la energía libre de ambas fases (Glasstone, 1940).

De la forma más general, la energía libre de un sistema termodinámico puede expresarse como

f = E + PV - TS

Siendo E la energía interna, P la presión, V el volumen, T la temperatura y S la entropía.

Si se produce una variación infinitamente pequeña se cumplirá:

$$df = dE + PdV + VdP - TdS - SdT$$

En nuestro caso supondremos que no hay variaciones de energía interna (dE=0), ni de volumen (dV=0), ya que el agua estará en fase líquida o en fase gaseosa, pero la cantidad total de moléculas será siempre la misma. Adicionalmente admitiremos que el sistema es reversible (dS=0) y que no varía la temperatura (dT=0).

Según esto df = VdP, por lo que para la fase líquida será $V_l dP$ y en la fase gaseosa $V_g dp$, siendo V_1 y V_g los volúmenes molares del agua y del vapor de agua respectivamente. Como en el equilibrio ambas energías deben ser iguales

 $V_l dP = V_g dp$

Teniendo en cuenta que el vapor de agua se comporta como un gas perfecto y que trabajamos con un mol de sustancia

$$V_g p = RT$$
 o sea $V_g = \frac{RT}{p}$ por tanto
 $V_l dP = RT \frac{dp}{p}$

Si la presión de la fase líquida varía entre $P_1 y P_2$ haciéndolo la presión de la fase vapor entre $p_1 y p_2$ tendremos:

$$\int_{P_2}^{P_1} V_l dP = RT \int_{p_2}^{P_1} \frac{dp}{p}$$

$$Ln \ \frac{p_2}{p_1} = \frac{V_l}{RT} (P_2 - P_1); \quad p_2 = p_1 e^{\frac{V_l}{RT} (P_2 - P_1)}$$

En esta expresión tenemos que V₁, R y T son constantes positivas y mayores que cero y admitiendo que se ha incrementado la presión, (P₂-P₁) también será positivo; por tanto $\frac{V_1}{RT}(P_2-P_1)$ es mayor que 1, lo que nos dice que p₂ es mayor que p₁. Dicho de otra forma, el aumento de presión en la fase gaseosa produce un incremento en la presión parcial de vapor, lo cual en nuestro caso solamente puede explicarse pasando moléculas de la fase líquida a la fase gaseosa, reduciéndose por tanto el volumen de la primera.

2.2.4. Campos debidos a las fuerzas matriciales

Se denominan fuerzas matriciales dado que se deben a la interacción entre las partículas sólidas que constituyen la matriz del suelo y las moléculas de agua. Como ya dijimos anteriormente consideraremos dos tipos capilares y de adsorción.

El predominio de uno de ellos sobre el otro depende de la naturaleza y estructura del suelo. Las fuerzas capilares actúan preferentemente en suelos de tipo granular en los que puede establecerse un símil entre los conductos entre partículas y tubos capilares más o menos irregulares. Por el contrario, las fuerzas de adsorción son de origen fisicoquímico, predominando en suelos cohesivos sobre todo arcillosos. Así pues, vamos a estudiarlos por separado para realizar su análisis con más detalle.

2.2.4.1. Campo debido a las fuerzas capilares

Estas fuerzas tienen su origen en la tensión interfacial que surge cuando entran en contacto la fase líquida con las sólida y la gaseosa (Lambe, 1951).

En general cuando un líquido está en contacto con un sólido, un gas e incluso otro líquido, la tracción de las moléculas del interior del líquido sobre las que se encuentran en la superficie de discontinuidad que representa la propia superficie del líquido, se manifiesta como una tensión que tiende a contraer dicha superficie y que se denomina tensión interfacial. En el caso particular en el que el líquido se encuentra en contacto con su propio vapor esta se denomina tensión superficial, σ .

Así pues, debe tenerse en cuenta que la tensión superficial es una característica del líquido a una temperatura dada, mientras que la tensión interfacial depende también de la naturaleza de la sustancia con la que este en contacto dicho líquido (Adamson, 1976).

Cuando se encuentran en contacto las tres fases, la tangente a la interfase liquido-gas forma con el sólido un ángulo que se denomina ángulo de contacto.



Figura 2. Interfase solido-líquido-gas. Ángulo de contacto.

Volviendo al caso del suelo, en el que como se ha dicho anteriormente, en determinados casos podemos establecer un símil con tubos capilares de los conductos más o menos regulares entre las partículas, podríamos considerar que un tubo de un determinado diámetro interior, d, con un extremo dentro de agua a presión atmosférica, experimenta una ascensión por su interior de manera que a una altura h, esta se encontraría a una presión inferior a la atmosférica existente en la base del líquido (Lambe, 1951).



Figura 3. Equilibrio sólido-líquido-aire en un tubo capilar, para un ángulo de contacto <90°.

En el equilibrio se debe verificar que esta depresión, debida a la acción de la resultante de la tensión superficial que actúa en toda la periferia del menisco, contrarresta el peso de la columna de agua

$$\pi d\sigma \cos \alpha = \pi \frac{d^2}{4} h\gamma$$

Siendo y el peso específico del agua. Despejando

$$h = \frac{4\sigma\cos \alpha}{d\gamma}$$

A título orientativo tenemos que en el caso de un tubo de vidrio de diámetro interior de 1 mm, con agua y en contacto con la atmosfera se produce una ascensión de unos 30 mm.

2.2.4.2. Campo debido a las fuerzas de adsorción

Este fenómeno está ligado fundamentalmente a los suelos cohesivos y sobre todo a los que tienen un alto contenido en arcilla. Aunque en la fracción arcillosa de los suelos también aparecen materiales de habito fibroso, lo más frecuente es que se trate de minerales de arcilla de estructura laminar.

Esta estructura se constituye a partir de dos unidades estructurales básicas formadas por tetraedros de oxígeno con Si⁴⁺ o Al³⁺ en el centro y octaedros de oxígeno y OH⁻, con los centros ocupados fundamentalmente por Al³⁺ o Mg²⁺.

Estas unidades estructurales se asocian formando ensamblajes bidimensionales a los que se denomina capa tetraédrica y capa octaédrica. En la primera, los radicales SiO_4^{-4} se unen por uno de los oxígenos de los vértices formando anillos hexagonales. En la segunda, cada octaedro comparte los dos oxígenos de una arista con la adyacente (Bradley).

La analogía existente en la simetría de ambas distribuciones y el hecho de que las dimensiones sean casi idénticas, permiten que ambos tipos de capas se unan entre si formando capas. En esta unión, el oxígeno situado en el vértice inferior del tetraedro es compartido por otro de un octaedro, dando lugar a la unión de ambas capas por medio de enlace iónicos, lo que confiere a este una fuerte cohesión.

La mayoría de los minerales de arcilla que para nosotros tienen interés dentro del contexto del trabajo que nos ocupa, son aquellos en los que se forma una combinación de una capa octaédrica entre dos tetraédricas, que se conoce como estructura tricapa o estructura 2:1.

Dentro de esta combinación existe un elemento básico estructural, cuya expresión es:

 $Si_4 Mg_3 O_{10} (OH)_2 o bien Si_4 Al_2 O_{10} (OH)_2$

Que corresponden a los dos grupos denominados trioctaédricos y dioctaédricos respectivamente.

Dado que el magnesio tiene valencia 2, mientras que el aluminio tiene 3, los enlaces de estos iones con los oxígenos de la capa octaédrica se realizan de forma que en el caso del aluminio solo dos de cada tres vacantes se ocupan, mientras que en el del magnesio lo hacen tres de cada tres.



Figura 4. Estructura tricapa de los filosilicatos (Bradley).

Volviendo a la fórmula de la unidad básica estructural y haciendo el cómputo de la carga eléctrica tenemos:

Esto nos indica que el material así constituido será eléctricamente neutro y por consiguiente las láminas podrán aproximarse unas a otras sin que se produzca repulsión entre ellas, hasta el punto que entren en acción las fuerzas de Van der Waals, dando estabilidad al sistema. No obstante, puesto que estas fuerzas disminuyen según una ley cuyo valor es inversamente proporcional a la sexta potencia de la distancia que separa las láminas, se comprende que la unión entre ellas permite su fácil exfoliación.

Sin embargo, algunos de estos materiales, experimentan, de forma natural, un fenómeno denominado sustituciones isomórficas, que consiste en que un ion Si⁴⁺ de la capa tetraédrica sea sustituido por un Al³⁺, prácticamente de igual tamaño y por consiguiente acogible en la red cristalina. Análogamente se puede dar esta misma situación sustituyendo un ion Al³⁺ de la capa octaédrica por un Mg²⁺, con idénticos resultados.

Realizando de nuevo el cómputo de carga, tendremos:

$Si_{3} Al Mg_{3}O_{10} (OH)_{2}$ $Si^{4+} x 3 = 12^{+}$ $Al^{3+} x 1 = 3^{+}$ $Mg^{2+} x 3 = 6^{+}$	Total 21+
$O^{-2} \ge 10 = 20^{-1}$ (OH) ⁻¹ $\ge 2^{-1}$	Total 22 ⁻
Análogamente	
$Si_{4} Al Mg O_{10} (OH)_{2}$ $Si^{4+} x 4 = 16^{+}$ $Al^{3+} x 1 = 3^{+}$ $Mg^{2+} x 1 = 2^{+}$	Total 21+
$O^{-2} \ge 10 = 20^{-1}$ (OH) ⁻¹ $\ge 2^{-1}$	Total 22 ⁻

Vemos como en ambos casos, tanto si la sustitución isomórfica tiene lugar en la capa tetraédrica como en la

100 | Ingeniería Civil 188/2017

octaédrica, nos queda una carga negativa sin compensar, lo que en el conjunto llegará a conferir al material una electronegatividad neta o carga negativa estructural.

Si ahora se acercasen las láminas unas a otras, se repelerían al estar cargadas con el mismo signo. Esta situación se remedia situando un número adecuado de cationes entre lámina y lámina, haciendo puente por medio de fuerzas electrostáticas y dando estabilidad a la estructura.

A su vez, esta, crea una nueva situación muy importante para nuestro caso que consiste en que dependiendo de la energía de hidratación (o lo que es igual, de la estructura electrónica del catión interlaminar), estos cationes se pueden rodear (adsorber) de moléculas de agua formando monocapas moleculares entre las láminas del silicato fuertemente adsorbidas.

Este concepto de energía de hidratación se puede resumir de una forma muy breve si recordamos que el número de electrones de cada átomo se encuentra repartido en orbitales, cada uno con un nivel de energía determinado y un número máximo de electrones. Esta distribución de orbitales es 1S² 2S² 2P⁶ 3S² 3P⁶ 3D¹⁰.... de forma que se agrupan de mayor a menor nivel de energía y forman las denominadas capas K, L, M... (Glasstone, 1940)

Según esto, vemos que, en el caso del catión adsorbido entre las láminas del filosilicato, el número y distribución de sus electrones determinará el nivel de energía disponible. Así, por ejemplo, en el caso del litio, con 3 electrones, su estructura electrónica será 1S² 2S¹ constituida por orbitales de muy alta energía. En el caso del sodio, con 11 electrones, su estructura sería 1S² 2S² 2P⁶ 3S¹ de nuevo formada por orbitales de muy alta energía, pero reducida en cierta medida por el efecto de apantallamiento producido por el orbital P⁶. Por último, en el caso del calcio, con 20 electrones, la estructura 1S² 2S² 2P⁶ 3S² 3P⁶ 3D² ya nos indica que la existencia de orbitales P y D conducirá a una menor energía. En resumen, en el litio tiene un muy alto nivel de energía, el sodio un nivel alto y el calcio uno más reducido.

En conclusión, si el catión interlaminar posee un nivel de energía elevado, podrá utilizar parte de esta para formar el puente electrostático que da estabilidad al conjunto lámina de filosilicato-catión y disponer de un remanente por medio del cual adsorber una molécula de agua polarizada y retenerla en el espacio interlaminar.

2.2.5. Campo debido a las fuerzas osmóticas

En el suelo se puede dar la circunstancia de que existan zonas con agua con una cierta concentración de soluto en contacto o próximas a otras con concentraciones diferentes. Esto da lugar al desplazamiento de masas de agua, en un sentido u otro, (o de soluto) con la finalidad de conseguir que dichas concentraciones se igualen (Anderson y Low, 1958).

Este fenómeno adquiere una importancia muy grande en los suelos arcilloso, ya que el espacio interlaminar constituye una zona en la que están presentes cationes y moléculas de agua, o lo que es igual una solución que puede tener una concentración importante.

Para fijar ideas recordaremos que este fenómeno se particulariza cuando dos soluciones con diferentes concentraciones están en contacto a través de una membrana semipermeable.



Figura 5. Fenómeno de ósmosis.

Supongamos que tenemos en un lado agua pura con una concentración C_1 , de ClNa disuelto y en el otro lo mismo, pero con una concentración C_2 mayor ($C_2>C_1$). Ambas se encuentran separadas por una membrana semipermeable, que en este caso permite el paso del solvente, pero no del soluto.

Según esto, se producirá el paso de agua a través de la membrana, desde la zona de menor concentración, hacia la de mayor concentración, de forma que si se pretende impedir este movimiento habrá que aplicar una presión p_0 en la superficie del líquido con mayor concentración. A esta se denomina presión osmótica.

Volviendo a nuestro caso, si las láminas de arcilla entran en contacto con una solución acuosa (o agua destilada como es el caso de la determinación del límite líquido) intentarán espontáneamente iniciar este fenómeno. Sin embargo, el hecho de que los cationes estén unidos a la estructura por puentes electrostáticos, da lugar a una especie de semipermeabilidad según la cual serán las moléculas de agua las que se desplazarán hacia el interior, dependiendo de la diferencia de concentraciones.

De nuevo, a título orientativo, podemos decir que una solución 0,001 M de ClNa, en contacto con agua destilada, da lugar a una presión osmótica de 0,05 Kp/cm² o lo que es igual, equivalente a una columna de agua de 50 cm.

3. COMENTARIOS FINALES

El estudio del comportamiento de un suelo con cualquier grado de saturación implica el análisis de los distintos fenómenos mecánicos, físico y fisicoquímicos que intervienen. En cada caso es necesario recurrir a diferentes campos del conocimiento, que concretamente en la interacción arcilla-agua, implica considerar tanto la morfología de la primera como las propiedades fisicoquímicas de la segunda. La posible presencia de concentraciones salinas diferentes a la existente en el espacio interlaminar exige la consideración del fenómeno de ósmosis.

En futuros artículos se irán justificando los métodos matemáticos para la utilización práctica de estos campos vectoriales con la finalidad de deducir las expresiones geotécnicas generales que describan el comportamiento de un suelo cualquiera que sea su grado de saturación.

4. **BIBLIOGRAFÍA**

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

Anderson, D.M., y Low, P.F. (1958). Osmotic pressure equation for determining thermodynamic properties of soil water. *Soil Science*. 86(5): pp. 251-253.

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).

Glasstone, S. (1953). *Tratado de Química-Física*. Madrid: Aguilar.

Lambe, T.W. (1951). Capillary Phenomena in Cohesionless Soils. ASCE, 116, pp. 401-432.

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.