

**CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS**

## LOS SUELOS COHESIVOS EN FUNCION DE SU ESTADO

Presentación del concepto de estado de los suelos y utilización de ese concepto como base para un criterio de interrelación entre los límites de Atterberg, los límites de la Universidad de George Washington, los óptimos de Proctor y la estabilización granulométrica.

Este es un artículo extractado de las notas para un folleto sobre Mecánica de Suelos Aplicada, en el que se presenta un compendio del tema central de la primera parte de dicho folleto.

### INTRODUCCION

La mecánica de los suelos ha progresado grandemente en los últimos años. Los trabajos de Proctor, Atterberg Fellenius, Terzaghi, Hogentogler, Krynine, etc., para citar solamente los más populares autores e investigadores constituyen la base solidísima de esta ciencia incipiente cuya importancia en relación con la ingeniería práctica no puede exagerarse.

Por ser tan nueva, sin embargo, la mecánica de los suelos carece en nuestro concepto de la unidad y cohesión necesarias para la formación de criterios nítidos en los problemas de ingeniería práctica. Los campos abiertos por Proctor, Atterberg, etc., aparecen todavía como independientes y desconectados, y el ingeniero practicante no relaciona aún la profunda teorización de Terzaghi con la sencillez del método de Proctor o con los límites de Atterberg o éstos y aquella con las combinaciones y límites de la estabilización granulométrica. Debemos reconocer, eso sí, que Hogentogler en su admirable libro *Engineering Properties of Soil* y Krynine en su insuperable *Soil Mechanics* mucho han adelantado en esta síntesis indispensable.

En este artículo, extractado de las notas para un folleto más extenso, presentamos a la consideración de los ingenieros intere-

sados en estos estudios el concepto del *estado* de los suelos, sobre todo de los suelos cohesivos, basado en un diagrama que a juicio nuestro ayuda grandemente en la práctica a la formación de ese criterio nítido de interrelación que es indispensable para que la mecánica de los suelos éntre del todo a ocupar su puesto de primera fila entre las ciencias básicas de la ingeniería.

#### EL METODO DE PROCTOR

Este método de determinar las condiciones necesarias para obtener un estado de compactación óptima fue ya expuesto por el autor en un artículo titulado *Estudio sobre terraplenes* y publicado en la revista *Anales de Ingeniería* en el número 504, correspondiente al mes de febrero del año de 1936 y puede resumirse así: Si se admite la densidad aparente o relativa o sea el peso seco por unidad de volumen como medida de la efectividad de una fuerza compactante dada y constante, entonces existe un porcentaje de humedad que es el óptimo para el material dado. En otras palabras: dados un suelo y una fuerza compactante, el peso seco para un volumen constante será máximo para un porcentaje de humedad determinado. Las características de los suelos así determinadas se representan gráficamente como se ve en la figura 1. La curva de cero vacíos de aire que aparece en esta figura es el lugar geométrico de las distintas mezclas suelo-agua posibles. La pequeña distancia entre la parte descendente de la curva de Proctor y la curva de cero vacíos de aire, medida sobre el eje de porcentajes de humedad, representa las inclusiones de aire imposibles de evitar en la práctica.

El estudio del método de Proctor nos permite hacer algunas observaciones de grande importancia práctica:

a) *La humedad óptima no es una constante para un material dado, sino que varía para cada intensidad de fuerza compactante.*

Proctor dejó este punto claramente sentado en su informe original, y Hogentogler lo expone a espacio en su obra ya citada (ver *Engineering Properties of Soil*, págs. 297 a 300). Un estudio de la figura 2 permite ver las curvas de Proctor correspondientes a varias intensidades de compactación y a materiales de distinta gradación.

Así, pues, la determinación de la humedad óptima debe de estar precedida por una determinación de equivalencia entre el

efecto compactante del equipo y en el terreno y un cierto número de golpes desde una cierta altura con el Proctor en el laboratorio. El penetrómetro permite una fácil y suficientemente aproximada comparación entre la compactación obtenida en el terreno y en el laboratorio. No está por demás llamar la atención sobre este punto que es muy a menudo ignorado por los ingenieros en la práctica, quienes asumen que veinticinco golpes standard del compactador en el laboratorio les han de determinar la humedad óptima, así sea que en el terreno usen para compactar cilindradoras de ocho, diez, doce toneladas o una patecabra.

*b) Todo suelo, razonablemente compacto, al saturarse de humedad, queda en un estado estable, equiparable a un estado Proctor, por cuanto no puede recibir más humedad sin re-arreglar sus partículas, lo que exige una fuerza externa.*

De esto se deduce que todo peso seco puede considerarse como un peso seco óptimo de Proctor resultado de una combinación especial de fuerza compactante y contenido de humedad. En la figura 2 puede verse cómo todos estos estados óptimos tienen por lugar geométrico la curva *a-a* que podemos llamar de saturación, curva que no difiere de la cero vacíos de aire sino por las inclusiones gaseosas que inevitablemente ocurren en la práctica dependiendo en algo de la gradación del material. La curva de cero vacíos de aire puede, pues, considerarse como el límite o idealización de la curva de saturación y representa en ese sentido el lugar geométrico de los óptimos de Proctor idealizados.

Es interesante notar que esta curva de cero vacíos de aire puede dibujarse conociendo solamente la densidad absoluta del suelo en cuestión (densidad de la substancia que integra las partículas del suelo, en promedio). En efecto:

Si  $P$ : peso seco,  $d$ : densidad absoluta,  $V$ : volumen constante y  $n$ : volumen de la humedad en centímetros o su peso en gramos, tenemos:  $(V-n) d : P$  de donde  $n : Vd - P$  y el peso total:  $P \frac{d}{d-n}$

luego el % de humedad al peso total será:  $(V-n) d \frac{d-n}{d} \times 100$

o sea % de humedad al peso total:  $\frac{d-P}{(d-P) \frac{d}{d-n}} \times 100$ , esto para

V : 1 (volumen unitario). Donde P igual d' igual densidad aparente o relativa, o sea el peso seco en gramos de un centímetro cúbico.

El autor usa en todos los casos el porcentaje de humedad al peso total y el peso seco del centímetro cúbico en gramos, o sea la densidad aparente por razones que salen del campo de este artículo pero que pueden ser fácilmente deducidas por el lector.

*c) Cualquier estado de un suelo, líquido, plástico, sólido o rocoso, sea cual fuere su origen, puede representarse por un punto localizado dentro del área encerrada por los ejes de densidad aparente, porcentaje de humedad y la curva de cero vacíos de aire. Figura 3.*

Hasta donde el autor sabe no se ha dado ninguna importancia a este hecho, y sin embargo, al localizar un suelo en este sencillo diagrama, puede verse claramente algo del pasado y mucho de la futura historia del suelo en cuestión y asimismo las posibilidades que haya para manejarlo y mejorarlo en el sentido que se desee.

Por ejemplo: si tomamos una muestra del talud de un canal o acequia y determinamos para dicha muestra la densidad absoluta, el peso seco por unidad de volumen y el porcentaje de humedad al peso total, podemos entonces dibujar la figura 3 en donde el punto *m* representa el estado actual del suelo. La simple inspección de dicha figura 3 nos enseña:

1º El suelo en su estado actual tiene un % de vacíos medido por la distancia *a—b*.

2º De esos vacíos tiene actualmente *a—m* llenos de agua y *m—b* llenos de aire.

3º Puede, por lo tanto, preverse el caso de que el total o casi el total *a—b* se llene de agua con el consiguiente aumento de plasticidad y disminución de resistencia.

4º Podría, por compactación y sin alterar su contenido de humedad, aumentarse su peso seco de *b* hacia arriba a lo largo de la curva de cero vacíos de aire hasta o cerca de *f*, que sería el peso seco óptimo para la humedad que tiene el material, y aún llevarse más arriba secándolo algo, etc.

5º Mejorando su gradación puede mejorarse su peso sin recurrir a grandes compactaciones (esto se explica más adelante y debe ser evidente para el atento lector).

Cree el autor que el ejemplo anterior permite ver la grande importancia práctica de localizar un suelo en su estado actual con relación a su curva de cero vacíos de aire. Esta es la base del diagrama de estados que el autor se permite someter al estudio y crítica de sus colegas.

#### LOS LIMITES DE ATTERBERG

A principios del presente siglo el científico sueco A. Atterberg propuso varios ensayos sencillos para determinar los porcentajes de humedad que producen cambios definitivos en la consistencia de los suelos. D. P. Krynine, en su libro *Soil Mechanics*, presente esos porcentajes como límites, así:

<i>Estado del suelo</i>	<i>Límite entre los estados</i>
1. Líquido	Límite líquido (L. L.)
2. Plástico	Límite plástico (L. P.)
3. Semisólido	Límite de encogimiento (L. E.)
4. Sólido	

En este cuadro se ve claramente el significado y objeto de los límites de Atterberg. El autor cree que el límite de encogimiento, tal como lo propone Krynine, debe suprimirse de este cuadro por ser dicho límite (determinado en la forma que propone Krynine) de índole diferente a la de los otros límites, como se explica con más detenimiento al final de este artículo.

#### LIMITES DE LA UNIVERSIDAD DE GEORGE WASHINGTON

Las investigaciones sobre el método de Proctor llevadas a cabo con grande acierto por la universidad citada establecieron otros límites entre las distintas etapas del proceso de compactación en suelos cohesivos. Estas etapas son: hidratación, lubricación y saturación, y sus límites corresponden a quiebres en las curvas de Proctor, como pueden verse en la figura 4 (ver figuras números 123A y 123B de Eng. Prop. of Soil). Sin embargo estos límites no pueden considerarse como límites fijos para cada material, pues varían para cada intensidad de la fuerza compactante. Figura 2 (ver figura número 137-A de Eng. Prop of Soil). No son por lo tanto características intrínsecas del suelo como sí lo son los límites de Atterberg.

Veamos ahora qué relación existe entre las características de los suelos determinadas por el método de Proctor y las que se

deducen de los límites de Atterberg, ya que todas ellas son funciones de porcentajes de humedad.

#### DIAGRAMA DE ESTADO

Basados en lo expuesto arriba tratemos ahora de construir un diagrama que describa en forma práctica los posibles estados para un suelo dado.

Si en la figura 3 dibujamos los límites de Atterberg para el mismo suelo que sirvió de base para la curva de cero vacíos de aire por medio de líneas perpendiculares al eje de % de humedad, entonces tendremos claramente separados los estados líquido, plástico y sólido del suelo en cuestión. Si además marcamos por medio de una línea perpendicular al eje de pesos secos el peso seco mínimo de la roca de igual densidad absoluta e idéntica composición química y mineralógica que el suelo de que se trata, entonces tendremos demarcado el estado rocoso. Dibujemos ahora en el mismo diagrama las curvas de Proctor para el mínimo y el máximo prácticos de compactación y tendremos la que podemos llamar el área Proctor o sea la delimitación de las posibilidades prácticas que el método de Proctor ofrece para hacer variar el estado presente (hacia estados futuros previsibles) del suelo.

El conjunto de estas líneas, que debiera completarse con parámetros de resistencia, constituye lo que el autor llama el diagrama de estado para el suelo en cuestión. Veamos ahora someramente algunas de sus aplicaciones prácticas. Figura 4.

Como puede verse en la figura 2, la intersección del área Proctor en el eje de pesos secos o densidad aparente es una medida de la bondad de la gradación, puesto que da la densidad relativa en relación con la absoluta antes de que la humedad ponga en acción las propiedades cohesivas del material.

Volvamos al ejemplo ya citado en conexión con la figura 3. El suelo representado como antes por el punto *m*, además de lo ya expuesto, nos dice lo siguiente con la simple inspección del diagrama: Si se deja el material en el cual se excavó el canal en el estado actual, al saturarse admitirá humedad hasta más allá del límite líquido con la consiguiente falla del talud. Debe, por lo tanto, revestirse dicho talud o tratar de mejorar el estado del material.

El lector puede por sí mismo desarrollar la posible futura historia de materiales representados por los puntos *x*, *y*, *z*, si se trata de cimientos, represas de tierra, taludes, etc.

Por los ejemplos anteriores cree el autor que puede afirmarse que si se establece el diagrama de estados para un suelo dado y se localiza en él el suelo tal como lo encuentre el ingeniero, quedarán pocas dudas respecto a su probable comportamiento futuro y surgirán automáticamente las indicaciones para su mejora y manejo. El diagrama es aún necesariamente imperfecto e incompleto. Queda a la espera de datos experimentales que permitan convertirlo en una nueva y fiel herramienta de trabajo para el ingeniero práctico.

#### EL LIMITE DE ENCOGIMIENTO (L. E.)

El L. E. ha sido definido como el porcentaje de humedad desde el cual el suelo al secarse cesa de experimentar reducción de volumen.

Si examinamos una curva de Proctor es evidente que la humedad óptima representa el porcentaje de humedad en el cual, habiéndose efectuado el proceso de compactación hasta su máximo (esto es, habiéndose reducido el volumen para un peso seco constante hasta el mínimo), si se aumenta la humedad será separando algo las partículas para hacerle campo al agua y es de esperarse que, si un suelo ha llegado a porcentajes de humedad más grandes que el óptimo de Proctor y después se seca, puede ser suficiente la tensión superficial para hacer volver así sea en parte las partículas a la posición que ocupaban con la humedad óptima, presentándose entonces un encogimiento del suelo al secarse.

Si esto es así, es evidente que no habrá un L. E. solamente para cada suelo, sino uno para cada proceso de compactación, es decir, que el *origen* del estado de los suelos es de importancia inmensa puesto que de él dependen características como esta del L. E. de tanta trascendencia práctica. Ya Krynine lo percibe cuando en la página 43 de su libro *Soil Mechanics* dice: “Es aconsejable determinar el L. E. tanto en muestras removidas como sin remover porque los resultados correspondientes *pueden ser muy diferentes*”.

Aceptando lo anterior, vemos que hay una similitud evidente entre el óptimo de Proctor y el L. E. para cada estado o proceso de compactación. Vamos a tratar de demostrar que en efecto los óptimos de Proctor son los L. E. posibles para un suelo dado. Si esto es así, entonces la ecuación de los óptimos de Proctor debe ser la misma que la del L. E.

Krynime propone  $(1/d' - 1/d) \times 100$ : L. E. en donde  $d$ : densidad absoluta y  $d'$  densidad relativa o sea peso seco por unidad de volumen. El L. E. estará dado como % al peso seco y no al peso total.

Veamos cómo resulta la ecuación de la curva de cero vacíos de aire que como hemos visto es el lugar geométrico de los óptimos de Proctor para % de humedad al peso seco y unidad de volumen.

Sean como anteriormente  $n$ : peso en gramos o volumen de centímetros<sup>3</sup> de la humedad.  $P$ : peso seco de un volumen constante  $V$  para un suelo de densidad absoluta :  $d$ . entonces tendremos:

% de humedad al peso seco :  $(n/P) \times 100$ , pero  $n$ :  $(Vd - P)/d$ , luego % de humedad al peso seco :  $(Vd - P)/Pd$  y para  $V:1$  tendremos % de humedad al peso seco :  $(d - P)/Pd$  ó  $(1/P - 1/d) \times 100$  o sea la ecuación de Krynime para el L. E., puesto que  $P$  para unidad de volumen ( $V:1$ ) es la  $d'$  de Krynime.

Queda así probado nuestro aserto: el L. E. como los límites de la Universidad de George Washington no es un límite para cada suelo, sino para cada estado de dicho suelo, variando con el origen o historia de dicho estado.

LUIS JOSE CASTRO G.

I. C.