

# UNA APROXIMACION DESDE EL AULA A LA CARACTERIZACION GEOTÉCNICA DE SEDIMENTOS

*A classroom approximation to geotechnical characterization of sediments*

*José Francisco García-Hidalgo, Javier Gil, Miguel Martín-Loeches,  
Manuel Segura y Javier Temiño (\*)*

## RESUMEN

*Proponemos la realización de un taller de carácter didáctico y experimental, destinado a mostrar a los participantes actividades para introducir a los alumnos en el conocimiento de algunas propiedades y comportamientos (densidad, grado de saturación, permeabilidad, expansividad, licuefacción...) de los sedimentos. Se determinarán mediante experiencias muy visuales y de sencilla ejecución, que requieren material de uso común (sólo en algunos casos se precisa de alguna adaptación sencilla).*

*Con estos experimentos se consolida eficazmente cada uno de los conceptos trabajados y se establecen muy fácilmente las relaciones existentes entre algunos de ellos. Además permite introducir a los alumnos en algunos aspectos básicos de Geología Aplicada, concienciándolos de su importancia práctica.*

## ABSTRACT

*We propose the realization of a didactic and experimental workshop to introduce in the knowledge of some properties (density, saturation degree, permeability, expansivity, liquefaction...), through easy visual experiences that require material of common use (only in some cases some very simple adaptation is necessary).*

*With these experiments the worked concepts will be consolidated efficiently and they settle down very easily the existent relationships among some of them. It also allows to introduce the students in some basic aspects of Applied Geology, making aware them of their practical importance.*

**Palabras Clave:** *Sedimentos, Propiedades, Geología aplicada, Enseñanza Secundaria*

**Keywords:** *Sediments, Properties, Applied Geology, Secondary teaching*

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento que aporta la Geología a la Ingeniería Civil es fundamental para proyectar y ejecutar las obras de una manera adecuada. Dicho conocimiento se enmarca dentro de una especialidad interdisciplinar entre ambas ramas del conocimiento, a la que se denomina "Geotecnia". El objetivo prioritario de los trabajos geotécnicos es el determinar si, ante la futura ejecución de una obra (edificio, carretera, embalse, cantera, etc.), el comportamiento del terreno será el adecuado para garantizar la durabilidad de dicha obra y la seguridad de las personas que la construirán y la usarán; en caso de que no se pueda asegurar alguno de estos aspectos, el estudio geotécnico deberá proponer recomendaciones para solucionar el problema.

Para poder alcanzar éste objetivo, la actividad de la Geotecnia se centra fundamentalmente en dos aspectos:

1º.- Determinar cuál es la configuración geológica del lugar en el que se va a realizar la obra. Para ello se realizan mapas geológicos, sondeos, ex-

cavaciones o prospección geofísica, y con dicha información se elaboran cortes geológicos del subsuelo en los que se reconstruyen los diferentes niveles litológicos y elementos estructurales, cuál es su extensión y disposición, y se marca la posición del nivel freático del agua subterránea. Sobre los métodos más habituales de reconocimiento se realizó un taller en el XII Simposio sobre Enseñanza de la Geología (Linares *et al.*, 2002). Un ejemplo sencillo de elaboración de un corte con datos de sondeos y penetrómetros puede consultarse en Temiño (1998).

2º.- Valorar las propiedades de interés geotécnico de cada conjunto de materiales en el subsuelo (deformabilidad, resistencia a la rotura, agresividad al hormigón, permeabilidad, expansividad, etc.). Para ello se toman muestras durante la realización de los sondeos y las excavaciones, que se envían al laboratorio para allí estudiar dichas propiedades. También se pueden realizar ensayos en el campo para su estudio.

En el presente taller proponemos experiencias de laboratorio que permiten una aproximación al

(\*) Dpto. Geología, Universidad de Alcalá. 28871 Alcalá de Henares. E-mail: jose.garciahidalgo@uah.es.



conocimiento de algunas de las principales propiedades geotécnicas de sedimentos y rocas blandas (sobre rocas duras se desarrolla otro taller). Las experiencias de laboratorio propuestas son de corta duración, muy sencillas de ejecutar y no precisan de materiales difíciles de conseguir. Con estos trabajos pretendemos ofrecer herramientas didácticas que ayuden a los profesores de asignaturas generalistas de Geología a aproximar a sus alumnos al interés aplicado que esta ciencia adquiere ante la sociedad. Recomendamos como bibliografía de consulta para todos los aspectos técnicos descritos a continuación, especialmente González de Vallejo (2002).

## PROPIEDADES DE ESTADO DE LOS SEDI-MENTOS

Todos los sedimentos y rocas blandas están formados por la agrupación simultánea de tres fases (Fig. 1): a) Sólida; constituida por minerales y otras posibles partículas sólidas como restos de materia orgánica, residuos, etc. b) Líquida; compuesta generalmente por agua, que ocupa parcial o totalmente los huecos existentes entre las partículas sólidas. c) Gaseosa; constituida habitualmente por aire, situado en las oquedades no ocupadas por la fase líquida.

En una misma muestra de material, se pueden establecer diversas relaciones entre estas fases. Estas relaciones se denominan "Propiedades de Estado", y entre las más comúnmente usadas, cabe destacar:

**Porosidad (P).**- Es el porcentaje del volumen total de la muestra que corresponde a las oquedades (fase líquida + fase gaseosa, Fig. 1). Su valor máximo siempre es menor del 100%.

$$P = 100 \cdot V_h/V_t$$

$V_h$  = volumen de huecos;  $V_t$  = volumen total

**Grado de saturación ( $G_s$ ).**- Es el porcentaje del volumen de oquedades de la muestra que está ocupado por la fase líquida. Su valor nunca puede exceder el 100% y es el 0% cuando la muestra está totalmente desecada.

$$G_s = 100 \cdot V_l/V_h$$

$V_l$  = volumen de la fase líquida

**Densidad de partículas ( $D_p$ ).**- Es la densidad de la fase sólida. Algunos ejemplos de densidad de los minerales más comunes en sedimentos y rocas se recogen en la Tabla I.

$$D_p = M_s/V_s$$

$M_s$  = masa de la fase sólida,

$V_s$  = volumen de la fase sólida.

**Densidad seca ( $D_s$ ).**- Es la densidad de la muestra totalmente desecada. Siempre es menor que la densidad de las partículas.

$$D_s = M_s/V_t$$

**Densidad saturada ( $D_{sat}$ ).**- Es la densidad de la muestra totalmente saturada, es decir cuando todos sus huecos están rellenos por líquido, de modo que su grado de saturación ( $G_s$ ) es el 100%. Su valor es siempre mayor que la densidad seca ( $D_s$ ).

$$D_{sat} = [M_s + (V_h \cdot D_w)] / V_t$$

$D_w$  = Densidad del líquido que satura la muestra.

**Densidad aparente ( $D_a$ ).**- Es la densidad de la muestra con el contenido de agua que tiene realmente en el campo. Siempre toma valores intermedios entre la Densidad seca ( $D_s$ ) y la Densidad saturada ( $D_{sat}$ ), en función del grado de saturación que tenga en la naturaleza.

$$D_a = (M_l + M_s)/V_t$$

$M_l$  = masa de la fase líquida

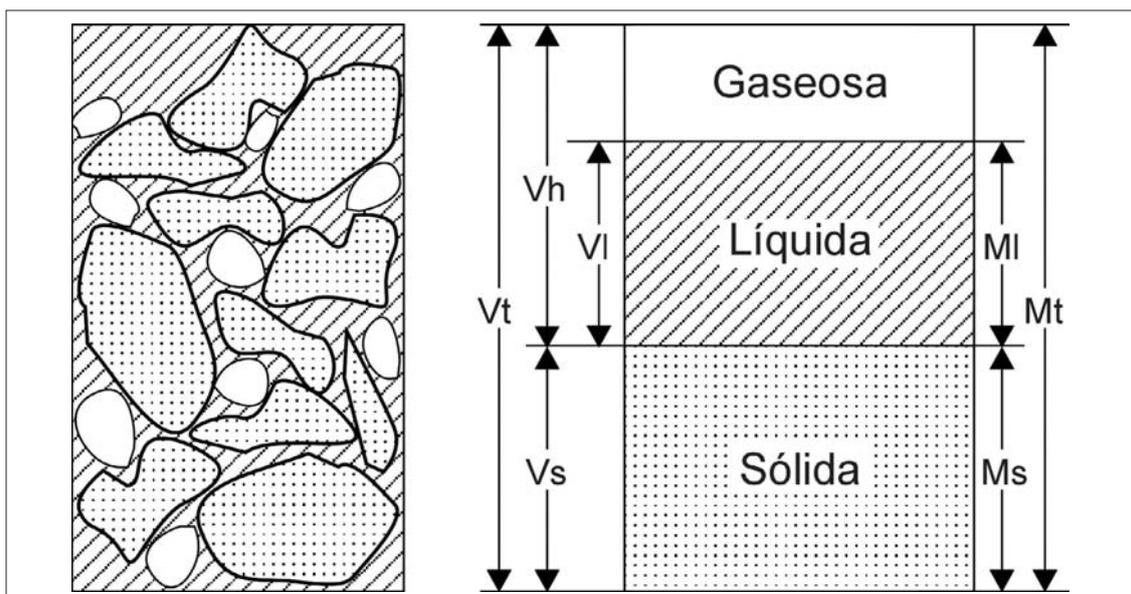


Fig. 1. Diagrama de fases del sedimento. ( $V_t$ ) volumen total de la muestra; ( $V_h$ ) volumen de huecos; ( $V_l$ ) volumen de la fase líquida; ( $V_s$ ) volumen de la fase sólida; ( $M_t$ ) masa total de la muestra; ( $M_l$ ) masa de la fase líquida; ( $M_s$ ) masa de la fase sólida. Modificado de Lambe (1995).

Silicatos		No silicatos	
Cuarzo	2,65 t/m <sup>3</sup>	Calcita	2,72 t/m <sup>3</sup>
Feldespató K	2,55 t/m <sup>3</sup>	Dolomita	2,8 t/m <sup>3</sup>
Plagioclasa	2,7 t/m <sup>3</sup>	Yeso	2,3 t/m <sup>3</sup>
Biotita	3,0 t/m <sup>3</sup>	Halita	2,1 t/m <sup>3</sup>
Caolinita	2,64 t/m <sup>3</sup>	Goetita	4,0 t/m <sup>3</sup>
Illita	2,7 t/m <sup>3</sup>	Limonita	4,0 t/m <sup>3</sup>
Montmorillonita	2,76 t/m <sup>3</sup>	Pirita	5,0 t/m <sup>3</sup>

Tabla I. Densidad de algunos de los minerales más comunes en sedimentos y rocas.

**Permeabilidad (K):** La permeabilidad o “conductividad hidráulica” mide la facilidad con la que el agua subterránea se desplaza a través de los materiales geológicos. Este parámetro tiene unidades de velocidad (L/T), pero no debe ser entendido como la velocidad con la que el agua se mueve a través de los huecos de un material, ya que intervienen más variables. Darcy propuso en 1856 la ley que rige el movimiento del agua a través de los poros de un sedimento o roca:

$$Q = K \cdot A \cdot (h / L)$$

$$y \quad V = (K \cdot h) / (P_e \cdot L)$$

*Q = Caudal de agua subterránea; A = Área por la que circula el agua subterránea; K = Permeabilidad del terreno; L = Longitud del terreno por la que circula el agua; h = diferencia de presión del agua (expresada en metros lineales de columna de agua) en la distancia “L”; V = Velocidad del agua; P<sub>e</sub> = porosidad por la que circula el agua, que es menor que la porosidad total del material (P<sub>e</sub> < P).*

De donde:

$$K = (Q \cdot L) / (A \cdot h)$$

### Importancia de las Propiedades de Estado

En un sedimento, estas relaciones van variando a lo largo de su evolución geológica y simultáneamente también su comportamiento geotécnico. Así, por ejemplo, una arena o una arcilla recién sedimentadas son muy porosas y blandas, pero al quedar enterradas por otras capas de sedimentos se van compactando. Esta compactación se aprecia por una reducción de su porosidad (P) y aumento de su densidad seca (D<sub>s</sub>), sin que la densidad de partículas (D<sub>p</sub>) varíe en modo alguno. Simultáneamente el sedimento reduce su permeabilidad y aumenta su dureza (más resistente e indeformable), por eso las arenas o arcillas del Cretácico suelen ser más duras e impermeables que las del Mioceno y éstas a su vez, más que las del Cuaternario.

Si en un momento dado de su evolución geológica, el sedimento experimenta una modificación significativa del contenido de agua, su densidad aparente (D<sub>a</sub>) y grado de saturación (G<sub>s</sub>) variarán, pero no lo harán la densidad de partículas (D<sub>p</sub>), la porosidad (P), ni la densidad seca (D<sub>s</sub>), a no ser

que se trate de una arcilla expansiva. Como consecuencia, también variará su comportamiento geotécnico, generalmente disminuyendo la resistencia del sedimento y aumentando su deformabilidad al saturarse. Así, por ejemplo, la dureza de un terrón de arcilla seca es mayor que cuando se le satura; los castillos de arena en las playas deben realizarse siempre con arena moderadamente húmeda, de modo que cuando varía esta humedad, bien porque la arena se seque o se sature, la estabilidad de la construcción se anula.

La permeabilidad es otro parámetro igualmente muy importante en el proyecto y realización de cualquier obra de ingeniería que afecte al nivel freático (túneles, sótanos de edificios, taludes, etc.) o que pretenda almacenar o captar agua (embalses, pozos, etc.). En la Tabla IV se muestran valores cualitativos de la permeabilidad y la importancia que esté parámetro muestra en el comportamiento geotécnico de los sedimentos y rocas. Asimismo, se pueden obtener valores cuantitativos realizando entre otras, pruebas de bombeo en pozos (Temño, 1988), o ensayos de laboratorio con muestras de materiales. En este último caso, se utiliza el mismo mecanismo que para simular el ensayo de sifonamiento (Fig. 2) comentado más adelante en el apartado 3; la descripción del ensayo de permeabilidad se recoge en dicho apartado.

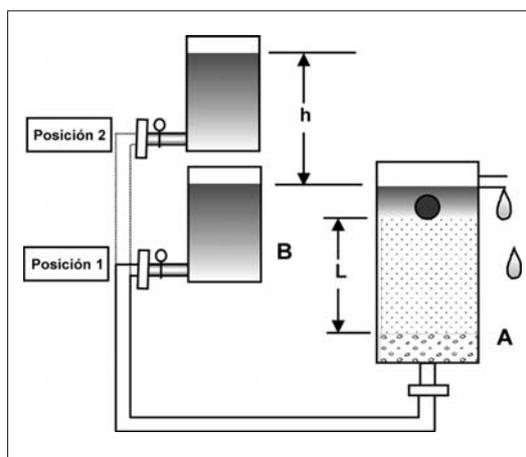


Fig. 2. Esquema para los ensayos de permeabilidad y sifonamiento. Modificado de Martín-Loeches y Temño (2002).



### Determinación de las Propiedades de Estado (ensayos)

Para la correcta realización de los ensayos se requiere del siguiente material de laboratorio: Tomamuestras de masa ( $M_{tm}$ , Tabla II) y volumen conocidos ( $V_t$ , Tabla II), vasos graduados de 500 ml (su número dependerá de las muestras que se analicen en paralelo), probeta graduada de 100 ml, báscula o balanza para pesar, agua, estufa de secado, silicona y fichas para datos y resultados (Tablas II y III). Asimismo, se requiere el material a muestrear, en nuestro caso, muestras inalteradas de suelo recogidas

Muestras	( $M_{tm}$ )	( $M_h$ )	( $M_d$ )	( $V_h$ )	( $V_t$ )
1					
2					

Tabla II. Ficha para recogida de datos. ( $M_{tm}$ ) masa del tomamuestras; ( $M_h$ ) masa del tomamuestras y de la muestra inalterada; ( $M_d$ ) masa del tomamuestras y de la muestra seca; ( $V_t$ ) volumen total de la muestra; ( $V_h$ ) volumen de huecos.

Muestra	$P = 100 V_h / V_t$	$D_p = M_s / V_s$	$D_s = M_s / V_t$	$D_{sat} = [M_s + (V_h \cdot D_w)] / V_t$	$D_a = (M_l + M_s) / V_t$
1					
2					

Tabla III. Ficha de resultados. ( $P$ ) Porosidad; ( $D_p$ ) Densidad de la fase sólida; ( $D_s$ ) Densidad seca; ( $D_{sat}$ ) Densidad saturada; ( $D_a$ ) Densidad aparente.

SEDIMENTO	PROPIEDADES DE ESTADO				PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO				
	P	$D_p$	$D_s$	$D_{sat}$	Consolidación	Permeabilidad	Deformabilidad	Riesgo rotura en cimentación	Riesgo rotura en taludes
Grava limpia y grava arenosa	20 %	$2,65 \frac{t}{m^3}$	$2,1 \frac{t}{m^3}$	$2,3 \frac{t}{m^3}$	Alta	Alta	Baja	Bajo	Medio
Grava limpia y grava arenosa	30%	$2,65 \frac{t}{m^3}$	$1,9 \frac{t}{m^3}$	$2,1 \frac{t}{m^3}$	Baja	Alta	Baja	Bajo	Medio
Arenamedia y gruesa limpia	32%	$2,65 \frac{t}{m^3}$	$1,8 \frac{t}{m^3}$	$2,1 \frac{t}{m^3}$	Alta	Media	Baja	Bajo	Medio
Arenamedia y gruesa limpia	40%	$2,65 \frac{t}{m^3}$	$1,6 \frac{t}{m^3}$	$2,0 \frac{t}{m^3}$	Baja	Alta	Media	Medio	Alto
Limo arcilloso y arcilla arenosa	37%	$2,67 \frac{t}{m^3}$	$1,7 \frac{t}{m^3}$	$2,0 \frac{t}{m^3}$	Alta	Baja	Media	Medio	Bajo
Limo arcilloso y arcilla arenosa	45%	$2,67 \frac{t}{m^3}$	$1,4 \frac{t}{m^3}$	$1,9 \frac{t}{m^3}$	Baja	Media	Alta	Alto	Alto
Arcilla	40%	$2,70 \frac{t}{m^3}$	$1,6 \frac{t}{m^3}$	$2,0 \frac{t}{m^3}$	Alta	Baja	Media	Medio	Bajo
Arcilla	55%	$2,70 \frac{t}{m^3}$	$1,2 \frac{t}{m^3}$	$1,7 \frac{t}{m^3}$	Baja	Baja	Alta	Alto	Alto
Turba	70%	$1,60 \frac{t}{m^3}$	$0,5 \frac{t}{m^3}$	$1,2 \frac{t}{m^3}$	Media	Media	Alta	Alto	Medio

Tabla IV. Características geotécnicas de los tipos principales de sedimentos en función de su porosidad y densidad. Permeabilidad alta:  $K > 10$  m/día; Permeabilidad baja:  $K < 10^{-3}$  m/día; Deformabilidad alta: asientos muy grandes en edificios de 5 plantas; Deformabilidad baja: asientos depreciables en edificios de 5 plantas; Riesgo de rotura de cimentaciones para edificios de 5 plantas; Riesgo de rotura para taludes de 10 m de altura y 35° de inclinación.

En este sentido, en geotecnia el término “suelo” hace referencia a cualquier material blando, inconsistente (por ejemplo: arena, grava, arcilla, suelo edáfico, escombros, etc.), por lo tanto no es equivalente al concepto edáfico; los materiales duros, en geotecnia, se denominan “rocas” (por ejemplo: arenisca, granito, hormigón, etc.).

Las propiedades de estado se deben calcular con muestras inalteradas del sedimento, puesto que éstas son las únicas que mantienen las propiedades sin modificar. La recogida de estas muestras se realiza mediante tomamuestras cilíndricos (Fig. 3). El tomamuestras se clava en el punto del que queramos obtener una muestra y se retira con cuidado, de forma que quede completamente relleno con la muestra en cuestión. A continuación se envuelve en una bolsa de plástico y se mantiene en un lugar fresco hasta su análisis, evitando de esta forma, pérdidas de fase líquida. Es importante no compactar la muestra, ni actuar sobre ella durante su recogida puesto que ello alteraría los valores iniciales de porosidad ( $P$ ), grado de saturación ( $G_s$ ) y densidad aparente ( $D_a$ ). A continuación, exponemos los pasos a realizar basándonos en un ejemplo ilustrativo:

- 1) Partimos de una muestra de limo arcilloso, recogida en un tomamuestras que pesa ( $M_{tm}$ )



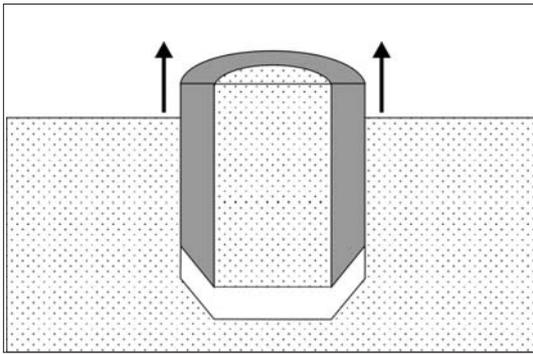


Fig. 3. Esquema de un tomamuestras para sedimentos blandos. Consiste en un tubo metálico o de PVC, cortado a un tamaño manejable (p. ej., 10 cm de longitud), que muestra su borde inferior biselado hacia la cara externa del mismo. Ello permite que el tomamuestras se "clave" en el sedimento sin deformar ni alterar la muestra que se recoge en su interior.

325 g. y tiene una forma cilíndrica de 6,0 cm de diámetro interior y 5 cm de altura, de manera que su volumen ( $V_t$ ) es 141,4 cm<sup>3</sup>.

- 2) Retiramos la bolsa de plástico y pesamos el tomamuestras con la muestra inalterada ( $M_h$ ), en nuestro caso 554 g.
- 3) Secamos la muestra inalterada en estufa a 80 °C durante 24 horas y volvemos a pesar la muestra en su tomamuestras ( $M_d$ ), en nuestro caso 537,1 g.
- 4) Situamos el tomamuestras con la muestra seca sobre una superficie plana y rígida, sellando el contacto con silicona. A continuación se vierte agua, muy lentamente (para permitir una saturación sin burbujas en el interior), en la muestra con una bureta graduada hasta que se satura totalmente. Se comprueba y anota el volumen de agua utilizada ( $V_h$ ), en nuestro caso 62,2 cm<sup>3</sup>.

Con esto se termina la experimentación de laboratorio. A continuación, con los datos recogidos deben determinarse todos los parámetros del diagrama de fases (Fig. 1):

$$\begin{aligned}
 V_t \text{ (Volumen total de la muestra)} &= 141,4 \text{ cm}^3. \\
 M_t \text{ (masa total de la muestra inalterada)} &= M_h - M_{tm} = 229 \text{ g.} \\
 M_l \text{ (Masa de la fase líquida)} &= M_h - M_s = 16,9 \text{ g.} \\
 V_l \text{ (Volumen de la fase líquida)} &= M_l / D_w = 16,9 \text{ cm}^3 \\
 V_h \text{ (Volumen de huecos)} &= 62,2 \text{ cm}^3 \\
 M_s \text{ (Masa de la fase sólida)} &= M_d - M_{tm} = 212,1 \text{ g.} \\
 V_s \text{ (Volumen de la fase sólida)} &= V_t - V_h = 79,2 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

Una vez que se han calculado todos estos valores, se determinan las propiedades de estado a partir de las relaciones descritas en el apartado 2, reflejando los resultados en la ficha correspondiente (Tabla III). En nuestro caso obtendríamos los siguientes valores:  $P = 44\%$ ;  $G_s = 27,2\%$ ;  $D_p = 2,68 \text{ g/cm}^3$ ;  $D_s = 1,50 \text{ g/cm}^3$ ;  $D_{sat} = 1,94 \text{ g/cm}^3$ ;  $D_a = 1,62 \text{ g/cm}^3$ .

Con estas propiedades de estado, y comparando los resultados con los de la Tabla IV, concluimos que se trata de un limo arcilloso con una baja consolidación, una permeabilidad moderada y geotécnicamente tendrá un comportamiento malo para cimentaciones y taludes.

Además de muestras inalteradas de suelo, podemos trabajar también con muestras de materiales alterados (arenas, gravas, etc.), recogidas en el entorno o compradas en tiendas de materiales de construcción, en cuyo caso habrá que medir el volumen total ( $V_t$ ) de la muestra usando una probeta o bureta.

### Interés geológico de las Propiedades de Estado

La determinación de las propiedades de estado permite obtener una idea orientativa sobre el estado de consolidación del sedimento (debido a su evolución geológica y/o uso antrópico) y una primera apreciación cualitativa sobre sus características geotécnicas más importantes. Para ello, basta comparar los resultados obtenidos en los ensayos con la Tabla IV, donde se reproducen estos aspectos para algunos de los sedimentos y rocas más comunes. El conocimiento, al menos cualitativo, de estos parámetros geotécnicos permite tomar las medidas de prevención oportunas, dependiendo del tipo de obra que se este llevando a cabo.

### **PROPIEDADES GEOTÉCNICAS**

Algunos sedimentos, en ciertas condiciones hidrogeológicas, pueden presentar comportamientos geotécnicos especiales. En el taller se realizan experiencias didácticas de laboratorio que permiten reproducir algunos de estos fenómenos geológicos que presentan mayores riesgos en obras civiles (edificios, puentes, carreteras, túneles,...). Los fenómenos a estudiar serán tres: sifonamiento, licuefacción y expansividad. Martín-Loeches y Temiño (2002) realizan una descripción didáctica de estos fenómenos en la que se recoge su fundamento teórico y algunos ejemplos.

La existencia de cada uno de estos tres fenómenos (sifonamiento, licuefacción y expansividad) está siempre ligada a la concurrencia de dos elementos naturales:

- a) Un sedimento, con características litológicas y propiedades de estado muy específicas.
- b) El agua subterránea, que interactúa en dicho sedimento.

La existencia de ambos elementos naturales y su interacción produce modificaciones muy signifi-



cativas en la resistencia y/o la deformabilidad del suelo, que pueden llegar a causar la ruina total de las obras instaladas en ellos.

El sifonamiento se produce cuando coexisten:

- a) Sedimentos saturados y no arcillosos de: limos, arenas limosas o arenas medias y finas.
- b) Un movimiento ascendente del agua subterránea a través de dicho sedimento.

Cuando este movimiento ascendente del agua alcanza una velocidad crítica, la presión del agua en las oquedades del suelo y el efecto de su rozamiento contra las partículas, llega a reducir de tal manera la presión entre los contactos de los granos (presión intergranular o efectiva), que el suelo pasa a comportarse como un fluido.

El flujo ascendente del agua se puede producir por diversas causas, tales como las fugas por debajo de la impermeabilización de una presa, la rotura de una conducción de agua a presión o el flujo ascendente en manantiales procedentes de acuíferos confinados. Las arenas movedizas constituyen un ejemplo muy conocido de este fenómeno.

La licuefacción es un fenómeno similar al sifonamiento, en el que el terreno también llega a comportarse como un fluido, pero se diferencia de aquél en el origen de dicho comportamiento. La licuefacción se produce cuando coinciden:

- a) Sedimentos saturados y muy porosos (poco compactados) de: limos, arenas limosas o arenas medias y finas.
- b) Un terremoto que hace vibrar intensamente al terreno.

La vibración hace que los granos tiendan a reordenarse a una estructura más compacta, reduciendo el volumen de huecos del sedimento. Al estar éste saturado, sólo puede producirse dicha reducción de porosidad si del sedimento se expulsa el agua correspondiente al volumen de oquedades eliminado. Sin embargo, al tratarse de un sedimento moderadamente permeable (limos, arenas limosas o arenas medias y finas), el volumen sobrante de agua sólo puede expulsarse parcialmente durante el tiempo de duración del terremoto (generalmente, 15 ó 30 segundos). De esta forma, el agua subterránea puede llegar a alcanzar una presión hidrostática tan elevada, que el suelo llegue a comportarse como un fluido.

En estas condiciones el suelo puede ascender generando volcanes de barro y reducir su resistencia original para sustentar los edificios y obras apoyados en él. Este es un fenómeno muy habitual durante los terremotos, y que ocasiona pérdidas económicas importantes.

La expansividad es la propiedad que presentan algunos materiales de cambiar su volumen cuando varía su grado de saturación.

La expansividad se produce cuando existe simultáneamente:

- a) Un material potencialmente expansivo, como

la anhidrita o las arcillas del grupo de las esmectitas.

- b) Variación en el contenido de agua en el sedimento.

La hidratación de la anhidrita al pasar a yeso, provoca su hinchamiento. Esto ha ocasionado importantes pérdidas económicas en túneles que atraviesan anhidritas, ya que se expanden con la humedad ambiental y se reduce la cavidad.

Pero algunas arcillas generan mayores problemas constructivos y pérdidas económicas debido a este fenómeno. En general, todas las arcillas se hinchan al humedecerse y se retraen al secarse, pero se consideran expansivas sólo aquellas que sufren cambios de volumen importantes; las arcillas de mayor poder expansivo son las del grupo de las esmectitas, y entre ellas la montmorillonita.

Los cambios naturales del grado de saturación ocurren habitualmente en los primeros metros del terreno, como consecuencia de la infiltración del agua de lluvia y su desecación por evaporación y transpiración vegetal; y, a mayor profundidad, por la oscilación vertical del nivel freático. Las actividades humanas pueden llegar a tener una importante incidencia en este fenómeno (p. ej.: la inundación por construcción de embalses, los conos de bombeo de pozos, la rotura de conducciones de agua, etc.).

### Ensayos

Sifonamiento y permeabilidad. Hay que construir un equipo como el que se ilustra en la Fig. 2. Para ello se comienza adaptando un recipiente cilíndrico con rebosadero (p. ej.: una jarra de plástico), haciéndole una entrada de agua por la parte inferior (recipiente A en Fig. 2). A continuación, se instala un filtro de gravilla para evitar pérdidas de arena y fenómenos indeseados en la zona de entrada de agua, para ello rellenar la base del recipiente con gravilla (tamizada entre 3 y 8 mm aproximadamente) hasta una altura entre 3 y 5 cm sobre la entrada de agua. Encima colocar la arena, sin compactarla, rellenando el recipiente hasta unos 2 cm antes del rebosadero.

La arena debe ser de grano medio a tamaño limo, pero sin contenido significativo de arcilla. Para prepararla se recomienda: 1º cribarla por el tamiz 0,4 mm; 2º saturarla con agua, agitar violentamente, dejar decantar unos 30 minutos y eliminar las partículas en suspensión (arcilla); 3º repetir esta última operación al menos 2 ó 3 veces hasta que se aprecie que el contenido arcilloso es poco importante. Secarla en estufa o al aire antes de emplearla para el ensayo. Las arenas eólicas no necesitan ésta preparación, en las arenas fluviales o de playa sin arcilla apreciable sólo es necesario tamizarlas.

Conectar la entrada de agua a la base de un depósito (recipiente B en Fig. 2) lleno de agua (puede ser una botella, un bidón con grifo u otra jarra preparada igual que la del ensayo). Mantener ambos recipientes próximos y a la misma altura (posición



1, Fig. 2), permitiendo que se sature la arena, lentamente y por la base (para que no queden burbujas de aire en su interior). Después elevar el recipiente con agua, hasta que la diferencia de altura de la lámina de agua entre los dos recipientes sea aproximadamente la mitad que el espesor de arena ( $h = L/2$ , Fig. 2).

Para determinar la permeabilidad de la arena hay que seguir los siguientes pasos: 1º) calcular la superficie circular ( $A$ ) del recipiente que contiene la arena; 2º) manteniendo “ $h$ ” constante, medir el caudal de agua ( $Q$ ) que sale por el rebosadero del recipiente con la arena. El caudal se puede medir con una bureta y un cronómetro. La permeabilidad, según la Ley de Darcy:

$$K = (Q \cdot L) / (A \cdot h)$$

Por ejemplo, la permeabilidad es igual a 0,4 cm/min (valor moderado), cuando partimos de una jarra cilíndrica con 17 cm de altura y 9 cm de diámetro ( $A = 63,6 \text{ cm}^2$ ), que tiene un relleno de 3 cm de gravilla y de 12 cm de arena ( $L = 12 \text{ cm}$ ), en la que hemos medido que rebosan  $21 \text{ cm}^3$  de agua en 2 minutos ( $Q = 10,5 \text{ cm}^3/\text{min}$ ) manteniendo una diferencia de altura de agua entre los dos depósitos de 5 cm ( $h = 5 \text{ cm}$ ).

Para realizar el ensayo de sifonamiento o de “arenas movedizas” se debe colocar sobre la arena un objeto pesado (una bola de acero u otro objeto metálico) y elevar lentamente el depósito de agua. El sifonamiento se materializa cuando el objeto metálico se hunda en la arena, lo que empezará a ocurrir cuando al elevar el depósito de agua,  $h > L$  (posición 2, Fig. 2).

**Liquefacción.** Para simular la licuefacción, usar un recipiente transparente de unos 250 ml de volumen (puede ser un vaso normal). Llenarlo con agua hasta la mitad e introducir un tubo fino (p. ej.: una

pajita de refrescos). Rellenarlo con arena de tamaño medio a tamaño limo, igual a la utilizada en la experiencia que reproduce el sifonamiento. La introducción del sedimento en el recipiente debe realizarse poco a poco (es ideal hacer “llover” la arena desde una distancia de unos 10 cm desde la boca del recipiente), para evitar compactaciones y para que la estructura entre los granos quede lo más abierta posible.

Colocar sobre la arena saturada un objeto metálico pesado que simule un edificio, y terminar de rellenar el recipiente con la arena.

Seguidamente someter el conjunto del material preparado a una vibración intensa simulando un terremoto; este efecto se puede conseguir mediante una tamizadora de laboratorio (Fig. 4A). Se observa que unos segundos después del comienzo de la vibración, el agua asciende por el tubo fino y el peso se hunde en la arena, como consecuencia de su licuefacción (Fig. 4B).

**Expansividad.** Utilizar para esta experiencia cualquier arcilla expansiva. En caso de no disponer de ella, se puede adquirir en el mercado bentonita comercial, como la que se usa para la construcción de sondeos. La bentonita es una arcilla procedente de ceniza volcánica, en la que la montmorillonita es el compuesto más importante.

El ensayo se puede realizar de forma sencilla e ilustrativa introduciendo la arcilla en un vaso estrecho y pequeño de cristal (transparente y de paredes rígidas). La arcilla se debe ir compactando mediante golpeo a medida que se coloca en el recipiente. Marcar el nivel superior de la arcilla mediante una línea en el cristal y rellenar el vaso completamente con agua (Fig. 5A). Podemos marcar con un rotulador en tiempos sucesivos, cómo cambia la posición de la parte superior de la arcilla a medida que esta se expande (Fig. 5B).

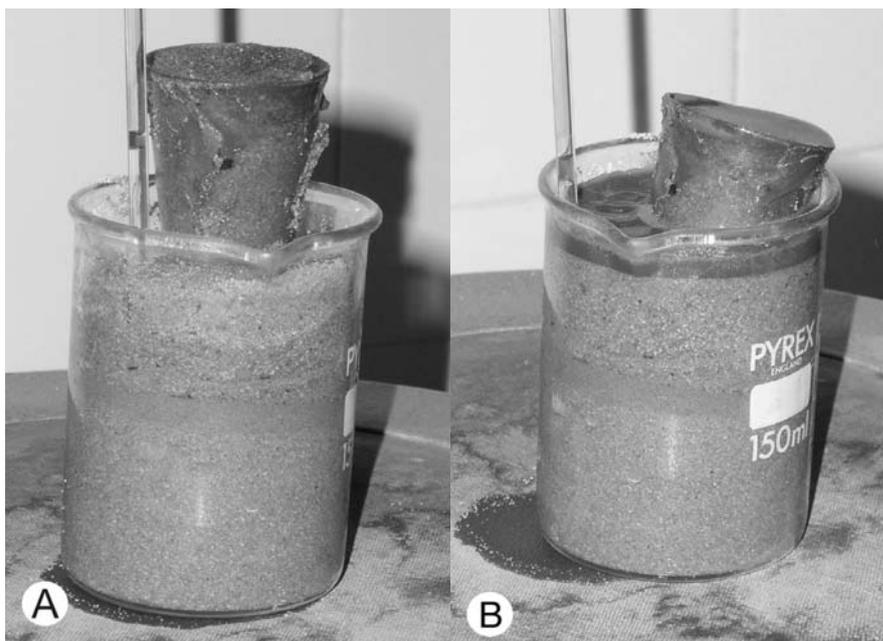


Fig. 4. Ensayo de licuefacción.  
A) Estado antes de la vibración;  
B) Licuefacción durante la vibración.





Fig. 5. Ensayo de expansividad de arcillas.

A) Estado antes de saturar;  
B) Estado una hora después de la saturación.

Para ilustrar como este hinchamiento puede afectar a las obras civiles (edificios, carreteras, canales...), se puede realizar la experiencia llenando totalmente el vaso con la arcilla, saturarla e inmediatamente después colocar sobre el vaso un trozo de madera. Con el paso del tiempo se apreciará cómo el hinchamiento de la arcilla levanta la madera.

### VALORACIÓN DIDÁCTICA

Las actividades propuestas deben entenderse como una simplificación didáctica de la realidad, mucho más compleja, pero que no dejan de ser parte de ella. Estas actividades se han experimentado con excelentes resultados, en asignaturas de Geología general en primeros cursos universitarios. No obstante, consideramos que son aplicables también a bachillerato e incluso a E.S.O., especialmente las experiencias más visuales (licuefacción, expansividad y sifonamiento).

Es conveniente desarrollar todas las actividades descritas en dos sesiones prácticas. Una centrada en las propiedades de estado y la segunda, en los comportamientos especiales descritos.

Queremos destacar cuatro aspectos que resaltan el interés didáctico de las actividades propuestas:

a) Ayudan a asimilar preconceptos fundamentales de las Ciencias Naturales, como la “densidad”, “saturación”, “porosidad”, o aplicación de cálculo básico.

b) Requieren la aplicación de conocimientos geológicos adquiridos previamente, como la clasificación de sedimentos o el concepto de “agua subterránea”.

c) Tienen una importante transversalidad para los currícula de Ciencias Experimentales. Se trata de conceptos físicos que se aplican a materiales geológicos para su uso en ingeniería.

d) Introducen al alumno en la concepción de que la Geología es una ciencia con aplicaciones prácticas de vital importancia para la ingeniería, arquitectura o la ordenación del territorio.

### BIBLIOGRAFÍA

- González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Editorial Prentice Hall. Madrid
- Lambe, T.W. (1995). *Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa. México.
- Linares, R.; Brusi, D.; Palli, Ll.; Roque, C.; Almarza, X.; Cebria, A.; Geis, Ch.; Zamorano, M.; Soler, D.; Vehi, M. y Clapes, S. (2002). Métodos de reconocimiento del subsuelo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 10 (1), 61-72.
- Martín-Loeches, M. y Temiño, J. (2002). Problemas geotécnicos asociados a la litología del substrato: Naturaleza, características y riesgos asociados. *Actas del XII Simposio sobre Enseñanza de la Geología (Girona)*, 148-153.
- Temiño, J. (1988). La Geología Aplicada, un recurso didáctico, integrador y práctico. *Henares Rev. Geol.* 2, 389-393.
- Temiño, J. (1998). Una aproximación didáctica a la Geología Aplicada: Estudio Geotécnico para la cimentación de un edificio. *Documentos del X Simposio sobre Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (Palma de Mallorca)*, 151-162. ■

