

Herramientas de aprendizaje de mecánica de suelos

R. Tomás¹, M. Cano¹, J. García-Barba¹, J.C. Santamarta², L.E. Hernández³, J. Durá¹, A. Cerdá¹

⁽¹⁾ *Departamento de Ingeniería Civil*

Universidad de Alicante

⁽²⁾ *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil*

Universidad de La Laguna, Tenerife

⁽³⁾ *Gobierno de Canarias, Tenerife*

RESUMEN

La Mecánica de Suelos constituye una disciplina fundamental en las enseñanzas técnicas de Ingeniería Civil. Las asignaturas en las que se imparte Mecánica de Suelos tienen una importante carga conceptual que, en ocasiones, requiere largos procesos de aprendizaje para ser asimilada por el alumnado. La combinación de las clases teóricas con la visualización y realización de sencillos experimentos didácticos de laboratorio facilitan el aprendizaje de dicha materia y la comprensión de los fenómenos complejos de una forma sencilla y amena. En el presente trabajo se describen diversos experimentos que se están desarrollando en el área de Ingeniería del Terreno de la Universidad de Alicante para explicar fenómenos geotécnicos complejos como son el sifonamiento de las arenas, la rotura del fondo de una excavación, la red de flujo de una presa o la carga de hundimiento de una cimentación entre otros. Esta parte experimental es acompañada de todo el desarrollo físico-matemático con el fin de facilitar una comprensión integral del fenómeno.

Palabras clave: geotecnia, mecánica de suelos, experimento, laboratorio, aprendizaje

1. INTRODUCCIÓN

La Mecánica de suelos es una disciplina fundada formalmente por Karl Terzaghi en la segunda década del siglo XX, que tiene por objeto el estudio y la resolución de los problemas derivados de la aplicación de cargas en la superficie de la tierra (suelo) a través del conocimiento y aplicación de leyes físico-matemáticas. Si tenemos en cuenta que cualquier obra civil está construida sobre o en el suelo o incluso utilizando el suelo como material de construcción, queda patente la importancia de esta disciplina en el desempeño del ejercicio profesional de cualquier Ingeniero Civil.

La disciplina de la Mecánica de suelos tiene un gran contenido conceptual que ha de ser entendido y asimilado por los estudiantes de Ingeniería Civil para su posterior aplicación a la resolución de problemas reales. Sin embargo, la experiencia indica que algunos de estos conceptos resultan de difícil asimilación por parte del alumnado, más aún cuando la asignatura en la que se imparten estos contenidos se desarrolla durante el segundo curso de carrera, prácticamente sin conocimientos previos de disciplinas como la hidráulica o la mecánica de medios continuos, como es el caso del Grado en Ingeniería Civil de la Universidad de Alicante.

En el presente trabajo se muestran diversos ensayos “caseros” que pueden realizarse con medios al alcance de cualquiera y cuya finalidad es facilitar al alumnado la comprensión de ciertos fenómenos geotécnicos a través de la experimentación.

2. METODOLOGÍA

La actividad experimental proporciona una importante conexión entre la teoría y la realidad a través de la observación (Couto, 2011). Precisamente esta observación experimental permite al alumnado visualizar, comprender y afianzar conceptos teóricos estudiados en clase mediante herramientas convencionales, para posteriormente aplicar el conocimiento adquirido a la resolución de problemas reales (Jinks, 1994).

En el presente artículo se presentan algunos experimentos sencillos que, en su mayoría, pueden realizarse mediante objetos de uso cotidiano, durante las clases prácticas o de forma independiente por el alumnado. A través de estos “experimentos caseros” pretendemos también, a su vez, hacer más sugerente, ameno y divertido el aprendizaje de conceptos geotécnicos, de un alumnado altamente desmotivado y con una elevada tasa de absentismo de las clases teóricas, que alcanza niveles superiores al 35% en la asignatura de Mecánica de Suelos y de las Rocas de segundo curso de ingeniería Civil.

Hasta el momento únicamente se han desarrollado una parte de los ensayos previstos que pueden ser divididos en dos grandes grupos: 1. Ensayos cuyo fin es determinar las propiedades geotécnicas de los suelos (e.g. determinación de los pesos específicos seco y de las partículas sólidas de un suelo), que generalmente disponen del correspondiente procedimiento normativo; 2. Ensayos que permiten la comprensión de fenómenos geotécnicos (e.g. sifonamiento de una arena). Para cada uno de estos ensayos se han preparado fichas explicativas con los fundamentos físico-matemáticos del ensayo de una forma didáctica y fácil de entender. Los ensayos que permiten obtener las propiedades de los suelos se han simplificado al máximo, profundizando en los conceptos básicos. Han sido despojados de toda su carga formal y de sus referencias a las distintas normativas, que en ocasiones hacen perderse al estudiante en detalles exentos de importancia.

3. EXPERIMENTOS PARA LA ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA DE SUELOS

En este apartado se describen diversos experimentos desarrollados para la enseñanza de la Mecánica de Suelos en la titulación de Ingeniería Civil de la Universidad de Alicante. Los experimentos que se muestran a continuación se dividen en los dos grandes grupos descritos en el apartado anterior.

3.1. Experimentos que permiten obtener propiedades geotécnicas de los suelos

El peso específico de las partículas de la fracción sólida del suelo (γ_s) es una propiedad física del suelo que se define como el peso de una unidad de volumen de la fracción sólida de ese suelo (sin considerar el volumen ocupado por el aire o el agua) y se calcula a través de la expresión

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (1)$$

Esta propiedad está muy condicionada por la naturaleza mineralógica del suelo y suele adoptar un valor próximo a 2.7 gr/cm³ o 27 kN/m³. Para su determinación se atiende a la norma UNE 103302:1994. Sin embargo, se propone su determinación de forma aproximada a través del procedimiento intuitivo y sencillo (Figura 1). Obsérvese que el volumen de agua (V_w) derramado al verter una masa de suelo (W_s) en el vaso es igual al volumen que ocupa la masa sólida de suelo (V_s). Considerando que 1 gr de agua ocupa un volumen de 1 cm³, entonces el volumen de sólido (V_s) será igual al peso del

agua derramada (W_w), y por lo tanto serán conocidos los valores del numerador y del denominador de la expresión (1).

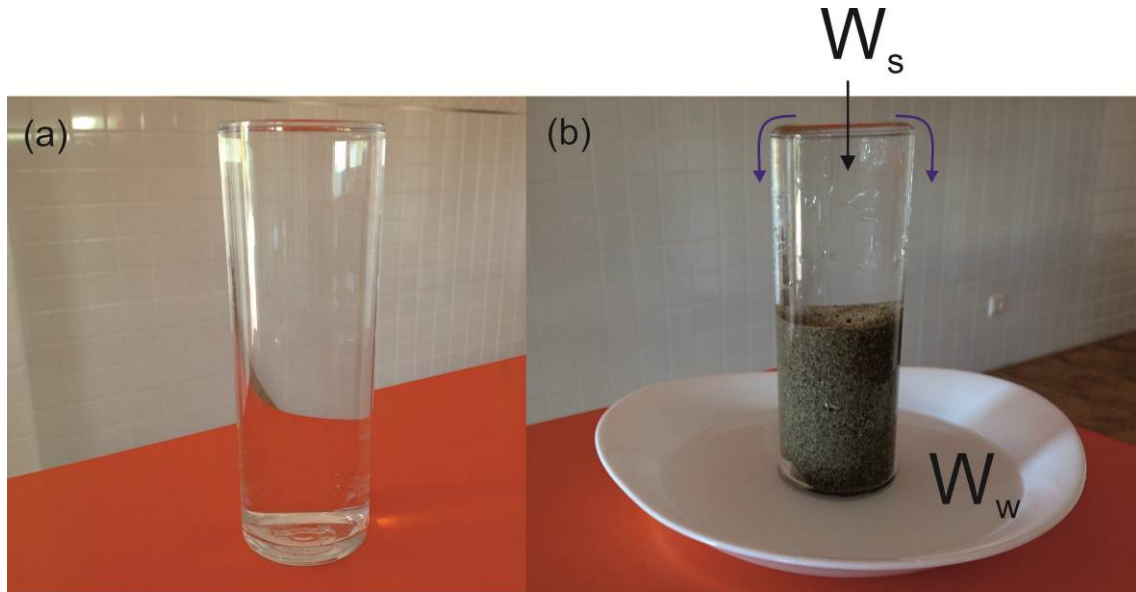


Figura 1. Experimento casero para determinar el peso específico de las partículas sólidas de una arena de playa. W_s es la masa de suelo vertida en el vaso y W_w es la masa del agua derramada tras el vertido del suelo, cuyo volumen (V_w), según el principio de Arquímedes, es igual al que ocupan las partículas de suelo introducido en el recipiente (V_s).

Otra propiedad física de los suelos es el peso específico seco (γ_d) definido como el cociente entre el peso de las partículas sólidas (W_s) y el volumen aparente o total (V) (incluyendo huecos ocupados por el aire y el agua) que ocupa dicho suelo:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (2)$$

En este caso, la masa de suelo seco (W_s) es determinada mediante el uso de una balanza. El volumen total (V) que ocupa dicho suelo puede calcularse por medición directa del recipiente (Figura 2) en el que se ha introducido (es recomendable el uso de vasos de tubo perfectamente cilíndricos cuyo volumen es fácil de determinar). Este “experimento” puede también aprovecharse para explicar conceptos como el índice de huecos (e) y hacer una aproximación conceptual a la estructura de los suelos. Para ello deberá verse cuidadosamente arena en el vaso (Figura 2a) y medir la altura alcanzada (H_1). En esta situación el suelo tendrá una estructura muy abierta con un gran índice de huecos (e_{\max}) y un bajo peso específico seco ($\gamma_{d\min}$). Posteriormente daremos, con cuidado de no romper el vidrio, pequeños golpes rítmicos en el lateral del vaso hasta que observemos que el nivel de la arena ya no desciende más (Figura 2b). En ese

momento habremos alcanzado un nuevo estado en el que el suelo tendrá una estructura muy cerrada con un bajo índice de huecos (e_{\min}) y un elevado peso específico seco ($\gamma_{d\max}$).

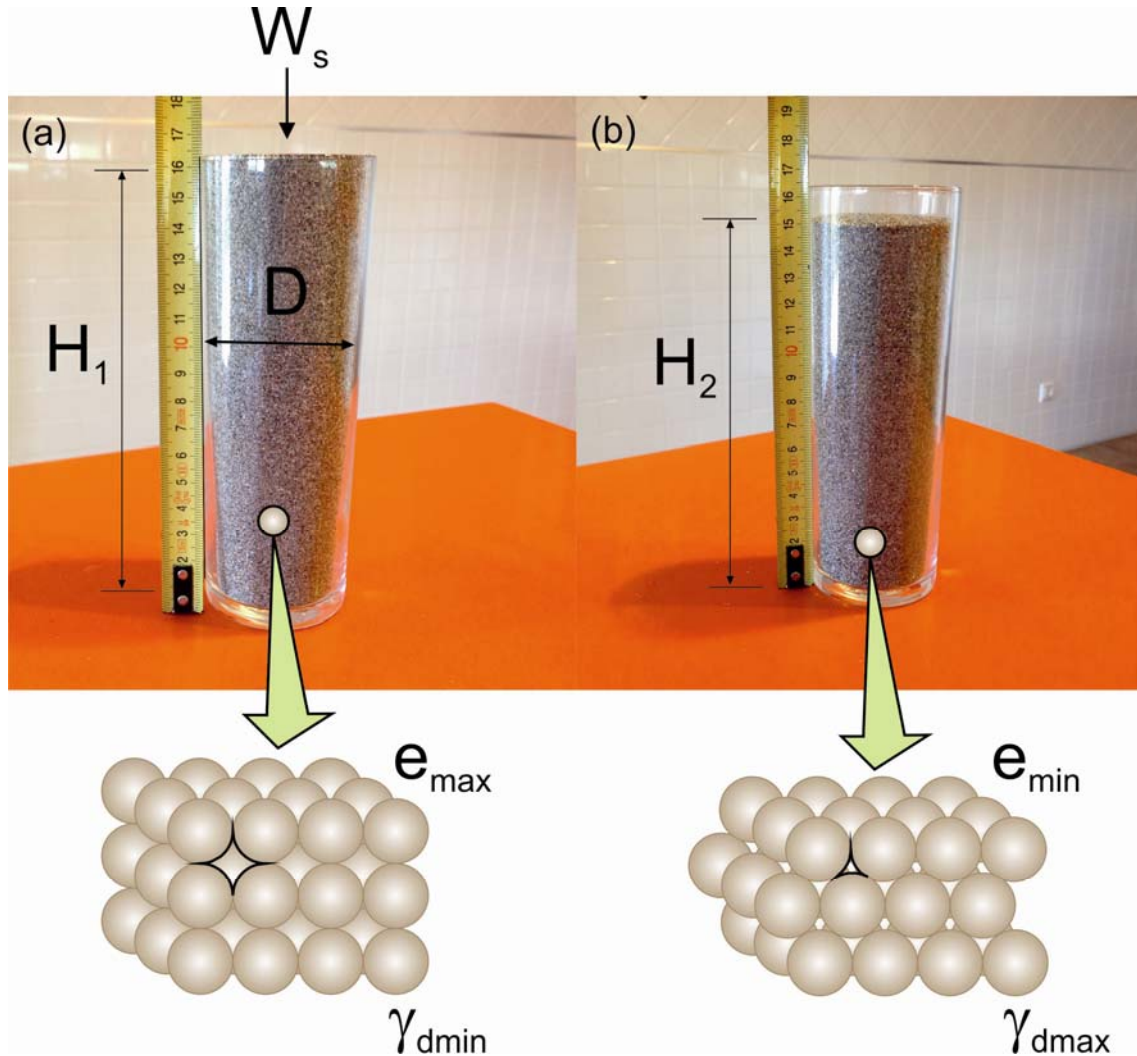


Figura 2. Experimento con doble finalidad: 1. Introducción a la estructura interna de los suelos y 2. Determinación del peso específico seco (γ_d) y del índice de huecos (e) de una arena de playa. La situación mostrada en (a) corresponde a una arena de compacidad suelta (máximo índice de huecos, $e_{\max}=0.40$, y menor peso específico seco, $\gamma_{\min}=1.59 \text{ gr/cm}^3$), dado que la arena seca se ha vertido en el vaso y enrasado posteriormente. La situación (b) corresponde a una arena de compacidad densa (mínimo índice de huecos, $e_{\min}=0.37$, y máximo peso específico seco, $\gamma_{\max}=1.66 \text{ gr/cm}^3$) de la misma arena tras un vibrado por golpeo del recipiente. D: diámetro del vaso.

Los pesos específicos de ambos estados pueden calcularse de forma sencilla empleando la expresión (2). Para calcular el índice de huecos correspondiente a cada estado emplearemos la definición de este parámetro:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3)$$

Donde el volumen ocupado por el sólido (V_s) lo determinaremos a partir de la masa de sólido (W_s) y considerando el peso específico de las partículas sólidas (γ_s), calculado según el procedimiento mostrado en la Figura 1. El volumen de vacíos o huecos (V_v) se determina restando al volumen total (V), calculado por medición directa (Figura 2), el volumen ocupado por el sólido.

Por último, se muestra un ejemplo de cómo determinar el ángulo de rozamiento interno efectivo (ϕ') de una arena. Para ello haremos girar un recipiente cilíndrico que contenga la arena seca o totalmente saturada para asegurar un comportamiento puramente friccional ($c' = 0$). El ángulo que alcance la arena corresponde a su ángulo de rozamiento efectivo que puede ser fácilmente medido mediante el inclinómetro de una brújula o incluso con alguna de las aplicaciones para medir ángulos disponibles gratuitamente para los *Smartphones* (Figura 3). Este experimento puede también realizarse dando previamente unos golpes al recipiente para densificar la arena. Posteriormente giraremos el recipiente hasta que ésta se desestabilice. El ángulo con el que se alcanza la inestabilidad correspondería al valor pico de ángulo de rozamiento de la arena densa.

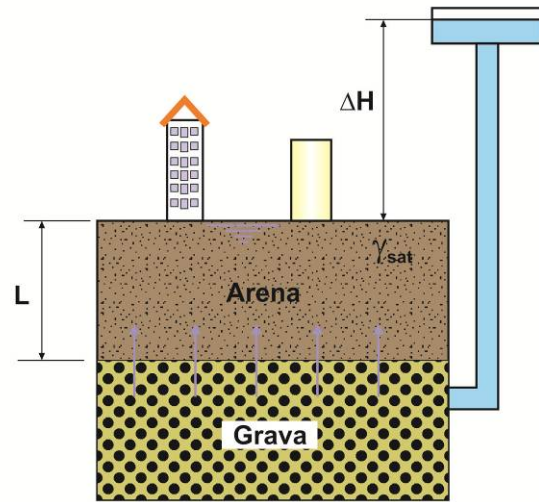


Figura 3. Determinación del ángulo de rozamiento efectivo de una arena seca ($\phi' \cong 30^\circ$). Obsérvese que el ángulo es medido con el clinómetro de una brújula de geólogo.

3.2. Experimentos destinados a la comprensión de fenómenos geotécnicos

Algunos fenómenos geotécnicos se explican en el aula a través de desarrollos matemáticos poco atractivos para el alumnado. Sin embargo, si dicha explicación va

acompañada de experimentación, su comprensión resulta inmediata, permitiendo la posterior incorporación de las herramientas matemáticas para su justificación y cálculo.



$$i_{\text{existente}} = \Delta H / L$$

$$i_{\text{crítico}} = \gamma_{\text{sum}} / \gamma_w = (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) / \gamma_w$$

Si $i_{\text{existente}} > i_{\text{crítico}}$ entonces $\sigma' = 0$
(Hay sifonamiento)

Figura 4. Experimento para simular el fenómeno de sifonamiento en arenas por efecto de un flujo de agua ascendente. A la izquierda se muestra el equipo casero realizado mientras que a la derecha se esquematiza la justificación geotécnica del fenómeno.

Uno de los fenómenos que mejor pueden explicarse mediante experimentación es el de sifonamiento en arenas. Para ello se debe preparar un recipiente en el que podamos introducir arena de playa. En la parte inferior es recomendable colocar una capa de grava para asegurar una elevada permeabilidad y una carga hidráulica constante en el muro de las arenas (Figura 4). A través de un orificio situado en la parte inferior del recipiente se aplican diferentes cargas hidráulicas en el nivel de gravas, bien elevando un recipiente con un nivel constante de agua, como el del esquema de la Figura 4, o bien abriendo progresivamente el grifo de la red de agua potable. Como consecuencia de ello, la diferencia de potencial entre el techo de las arenas y la superficie piezométrica en las gravas (ΔH) aumenta progresivamente. En el momento que el gradiente existente ($i_{\text{existente}}$) alcanza o supera el gradiente crítico ($i_{\text{crítico}}$) en las arenas se produce el sifonamiento de las arenas, que implica una pérdida de tensiones

efectivas que produce una pérdida de consistencia de la masa de suelo que entra en un aparente estado de “ebullición”. Las consecuencias del fenómeno se entienden muy bien si se emplean elementos accesorios que simulen edificaciones cimentadas sobre las arenas (Figura 4).

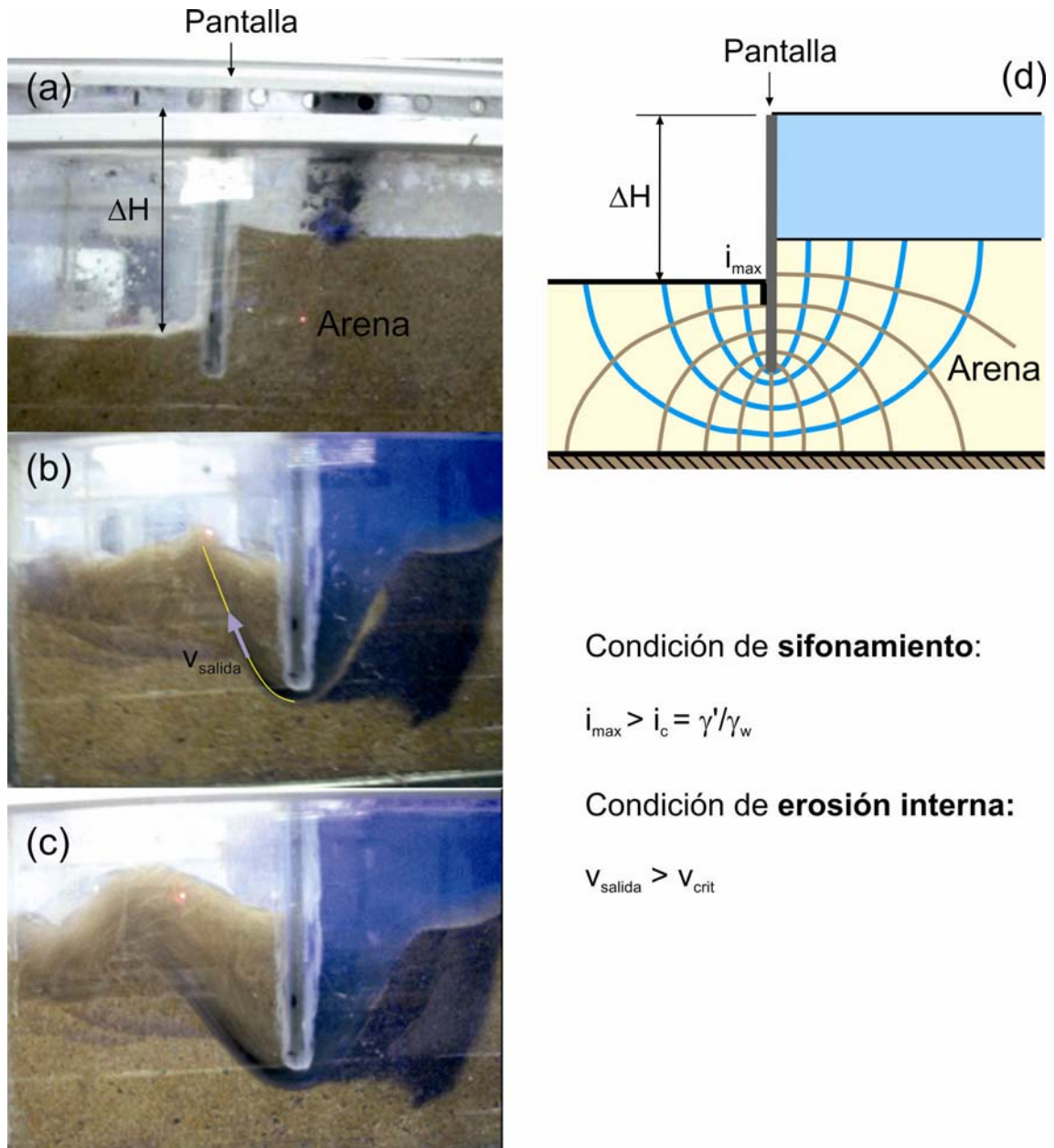


Figura 5. Realización de ensayo para simular la red de flujo de una excavación al abrigo de muros pantalla y explicar los problemas de sifonamiento y erosión interna.

En la Figura 5a se muestra un recipiente en el que se ha creado una separación intermedia abierta por la parte inferior que simula un muro pantalla o una tablestaca, elementos de contención ampliamente empleados en excavaciones. Si hacemos circular

agua hacia el interior de la excavación que está a una cota inferior, aplicando una diferencia de carga hidráulica (ΔH) podemos llegar a identificar líneas de flujo (Figura 5d) mediante la inyección de colorantes inocuos (colorantes alimenticios, azul de metileno, etc.) lo que permite reconocer la forma y trayectoria que describe el agua al fluir a través del terreno, tal y como se explica en la teoría de redes de flujo. Sin embargo, si vamos incrementando el valor de ΔH podemos también reproducir el fenómeno de sifonamiento antes descrito (Figura 5b y c). Si se continúa incrementando ΔH , la velocidad de salida en la excavación del agua (v_{salida} en figura 5b) también aumenta pudiendo llegar a producir arrastre de partículas mediante un fenómeno que es conocido como erosión interna (Figura 5c).

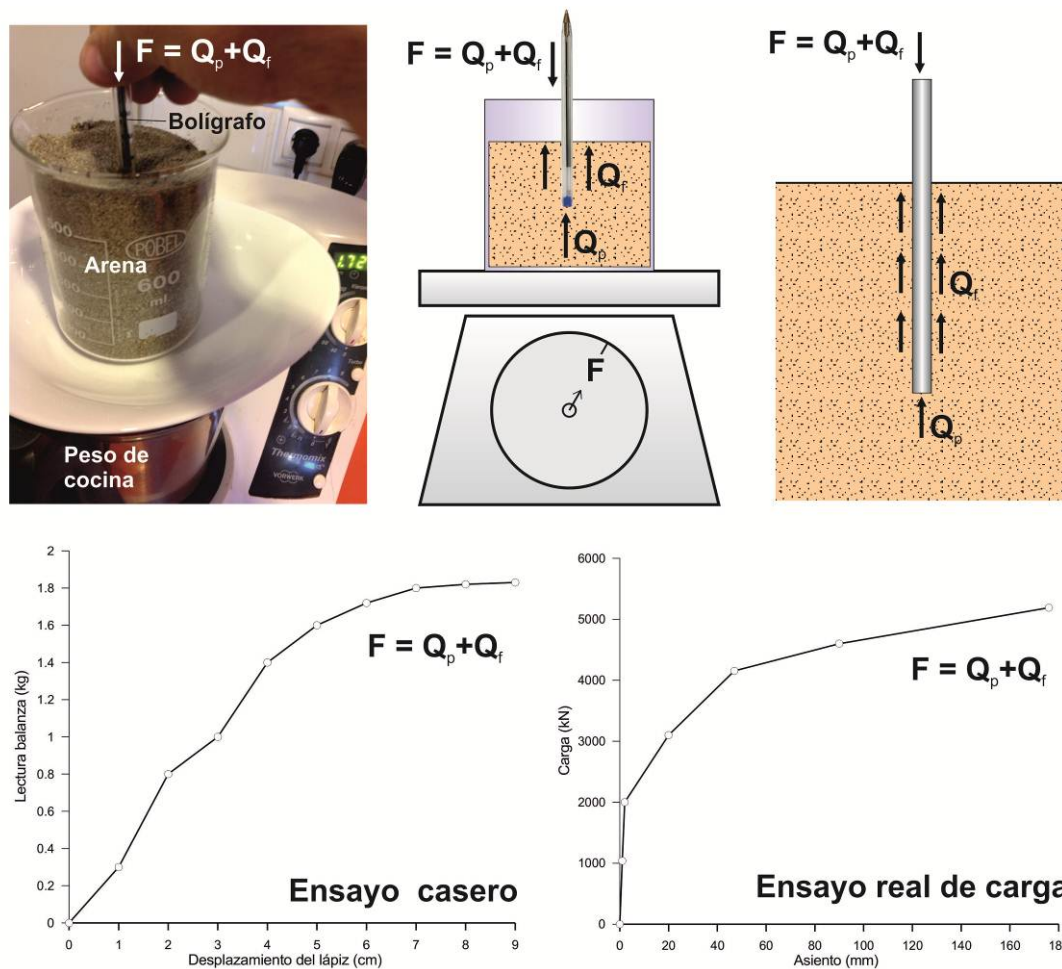


Figura 6. Realización de ensayo para explicar la prueba de carga de un pilote y explicar los conceptos de resistencia por punta (Q_p) y por fuste (Q_f) de un pilote.

Finalmente, se presenta un ensayo que permite que los estudiantes visualicen la prueba de carga de un pilote (Figura 6). Para ello es necesario una balanza (e.g. de cocina), un recipiente con el material que representa el suelo y un lápiz o bolígrafo, que simulan a los pilotes. A continuación, hacemos una serie de marcas de graduación al lápiz/bolígrafo y comenzamos a hincarlo de forma continua en el suelo. Cada vez que lo hincamos una cierta profundidad anotamos la lectura de la balanza. Si representamos los valores de penetración frente a los valores proporcionados por la balanza obtenemos una curva con un gran parecido a la obtenida en una prueba de carga real de un pilote (curva carga-asiento; Figura 6). El ensayo se puede repetir con diferentes materiales y estados de humedad para que el alumno reflexione sobre las implicaciones que estos cambios tienen en el comportamiento de pilotes.

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se presentan algunos experimentos sencillos que, en su mayoría, pueden realizarse mediante objetos de uso cotidiano. Estos “experimentos caseros”, lejos de adaptarse a la monotonía de las normas técnicas que, en ocasiones hacen que el alumno se pierda en lo accesorio, perdiendo de vista el objetivo real del ensayo y su utilidad, proporcionan una visión más didáctica tanto de las propiedades de los suelos como de los fenómenos geotécnicos.

En la actualidad, los autores de esta ponencia están trabajando en el diseño y la preparación de otros “experimentos geotécnicos” como son: el efecto de la succión en la resistencia al corte, los fenómenos de levantamiento y rotura del fondo de excavaciones, determinación de la carga de hundimiento y de la superficie de rotura de cimentaciones superficiales, identificación de cuñas de empuje pasivo y activo, etc. Las fichas de todos estos ensayos contendrán, además de los detalles para reproducir el “experimento”, un razonamiento técnico y su justificación físico-matemática. Estos “experimentos” serán incorporados a las clases de Mecánica de Suelos y de las Rocas de la titulación de Graduado en Ingeniería Civil de la Universidad de Alicante complementando las clases teóricas y de problemas.

Agradecimientos a D. Victoriano Rodrigo, técnico del laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas del Departamento de Ingeniería Civil por su inestimable ayuda en el desarrollo de algunos de los ensayos mostrados en este trabajo.

REFERENCIAS

Couto, J.M.M. (2011). Experimental, Numerical and Virtual Tools in Civil Engineering. IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON) – "Learning Environments and Ecosystems in Engineering Education". April 4 - 6, 2010, Amman, Jordan. 1162-1165.

Jinks, R. (1994). Developing experimental skills in engineering undergraduates. Engineering Science and Education Journal 3, 287-290.