

Análisis de permeabilidad de suelos granulares mediante diferentes ensayos de laboratorio y formulaciones experimentales

Alumno: ERLIND RAKIPAJ

Director: IVÁN ALHAMA MANTECA

Agradecimientos

Quisiera dar las gracias a mi profesor y director de este proyecto, Iván Alhama, que se ha prestado en todo momento a ofrecerme su ayuda para la realización de este TFG. Gracias a él he adquirido importantes conocimientos sobre la geotecnia. También quiero dar las gracias a Gonzalo García Ros y a Calixto Muñoz Rodríguez por la ayuda ofrecida durante los ensayos de laboratorio.

Finalmente agradecer a mi familia y amigos que me han apoyado en todo momento.

Gracias.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Resumen.....	1
1.2 Objetivos y alcance.....	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	2
2.1 Ley de Darcy.....	2
2.2 Permeabilidad hidráulica y permeabilidad intrínseca, porosidad.....	4
2.3 El ensayo de permeabilidad bajo carga constante.....	7
2.4 Otros ensayos necesarios para el desarrollo del trabajo.....	15
2.5 Correlación entre los distintos parámetros medidos en laboratorio.....	22
3. MONTAJE DEL ENSAYO DE PERMEABILIDAD BAJO CARGA CONSTANTE	23
3.1 Metodología de trabajo	23
3.2 Montaje	24
4. PRUEBAS DE LABORATORIO	30
4.1 Selección de muestras	30
4.2 Ensayos	31
4.2.1 Curva granulométrica.....	31
4.2.2 Gs (Densidad relativa de las partículas de un suelo).....	36
4.2.3 Densidad mínima de una arena	39
4.2.4 Densidad máxima de una arena.....	41
4.2.5 Ensayos de permeabilidad.....	45
4.2.5.1 Ensayos de permeabilidad de una muestra de arena vertida en seco.....	47
4.2.5.2 Ensayos de permeabilidad de una arena vertida con la célula saturada de agua.....	53
4.3 Discusión de resultados.	58
5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES	63
6. REFERENCIAS	65

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Resumen

En Ingeniería Civil es fundamental el conocimiento de las características y la composición del suelo, ya que es donde se asientan todas las construcciones. La rama que se encarga del conocimiento de estas características es la geotecnia. El dominio pleno de esta disciplina ayuda a reducir el impacto de los problemas estructurales del suelo sobre las obras civiles. El aporte experimental de esta especialidad permite al ingeniero obtener información que resulta ser básica para el posterior diseño de los proyectos. Una de esas características básicas es la permeabilidad de un terreno o de una muestra de suelo.

El presente proyecto surge de la necesidad de construir un segundo permeámetro en el laboratorio de geotecnia de la Universidad Politécnica de Cartagena capaz de arrojar datos fiables. En este proyecto se detalla el montaje del aparato, así como todos los ensayos necesarios que se han llevado a cabo de la muestra de suelo propuesta para el estudio, todo ello regido y siguiendo las pautas marcadas en las diferentes normativas vigentes relativas a esta materia.

1.2 Objetivos y alcance

El propósito del presente proyecto es el montaje y puesta en marcha de un permeámetro de carga constante en el laboratorio de geotecnia de la UPCT. Previamente se deben realizar varios ensayos de la muestra que se analizará. Estos ensayos darán los valores de la densidad mínima de una arena suelta, la densidad máxima, la densidad relativa de las partículas, las curvas granulométricas y la porosidad. Después de realizar estos ensayos se pondrá en marcha el ensayo de permeabilidad con la misma arena para obtener el coeficiente de permeabilidad.

El objetivo, por tanto, es obtener estos parámetros de manera eficiente y compararlos con datos de diversas bibliografías para así deducir si esos valores son precisos o no. Otro objetivo de este proyecto es observar la influencia que puede tener la manera de vertido de la muestra a la célula del permeámetro sobre el coeficiente de permeabilidad.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Ley de Darcy

La ley de Darcy fue enunciada por su autor en 1856, después de diversos trabajos y experimentaciones. Establece que el caudal Q que es capaz de atravesar un medio permeable, es proporcional al área de paso del medio permeable A , normal al flujo, y al gradiente de niveles piezométricos entre la entrada y la salida del flujo en el medio permeable, i . La constante de proporcionalidad es la permeabilidad del medio, en la que quedan incluidas las características del fluido, es decir, es la permeabilidad efectiva, conductividad de Darcy o conductividad hidráulica. En consecuencia y con carácter global:

$$Q = - k * A * i$$

siendo: $Q =$ caudal de paso [L^3T^{-1}]
 $k =$ permeabilidad de Darcy [LT^{-1}]
 $A =$ área de paso [L^2]
 $i =$ gradiente piezométrico.

Como es sabido, el gradiente de un escalar es un vector, definido por su módulo, dirección y sentido. El módulo es la derivada direccional de la función escalar; la dirección es la normal a las curvas de nivel de la función escalar; el sentido es el del aumento en el valor de la función. Al moverse el flujo de zonas de mayor a menor nivel piezométrico, que es en este caso la función escalar, el flujo y el gradiente tienen direcciones distintas, lo que justifica el signo negativo en el segundo término de la ecuación de Darcy. Llamando h al nivel piezométrico y x al espacio en el sentido del flujo, la ecuación puede expresarse en forma diferencial, considerando la variación de niveles piezométricos a lo largo del recorrido del flujo por el medio poroso:

$$Q = - k * A * \frac{dh}{dx}$$

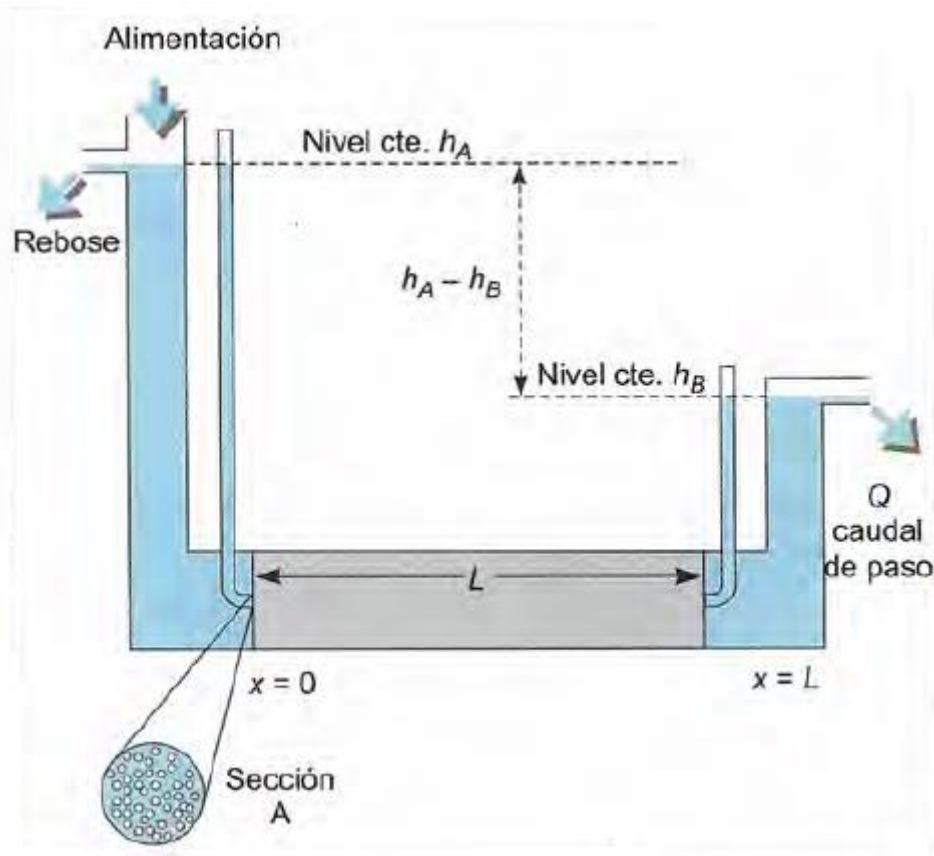


Figura 2.1. Ley de Darcy. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo, 2002.

En el caso de la Figura 2.1, el experimento mantiene constantes los niveles h_A y h_B , y al ser constantes k y A para todo el medio permeable se establece la forma más sencilla de Darcy:

$$Q = k * A * \frac{h_A - h_B}{L}$$

La ley de Darcy es únicamente válida para el caso en que el régimen sea laminar. Para evaluar si el régimen es realmente laminar hay que acudir al denominado número de Reynolds, que representa la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas en el seno de un fluido:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\mu}$$

donde: v = velocidad del fluido

d = tamaño medio de las partículas; se considera el d_{50} medios granulares y $2e$ en medios fisurados, siendo e el ancho medio de las fisuras

ρ = densidad del fluido

μ = viscosidad dinámica.

El número de Reynolds es adimensional.

$$[R_e] = \frac{(ML^{-3})(L)}{(MLT^{-2})(T)(L^{-2})} \rightarrow \text{Adimensional}$$

De cualquier modo, para su cálculo habrá que utilizar unidades homogéneas; por ejemplo, v en cm/s, d en cm, ρ en g/cm³ y μ en dina * seg/cm². Un valor del número de Reynolds comprendido entre 1 y 10 denota un régimen laminar en el que puede considerarse aplicable la ley de Darcy, aunque es particularmente fiable para valores inferiores a 4. El régimen se manifiesta totalmente turbulento para valores de 60 a 180, y en los valores intermedios puede asumirse como cuasi-turbulento. En cualquier caso, con esta última gama de parámetros, el flujo no cumpliría la ley de Darcy.

2.2 Permeabilidad hidráulica y permeabilidad intrínseca, porosidad

La permeabilidad es el parámetro que permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación en función de la textura de esta, sin relacionarla con su estructura o forma geométrica. Dentro de este concepto pueden definirse otros dos:

- La permeabilidad ligada tanto a las características texturales del medio físico como del fluido que transmite, denominada **permeabilidad efectiva** o **conductividad hidráulica**, representada por el coeficiente de permeabilidad, k .
- La denominada **permeabilidad intrínseca**, K , que es sólo dependiente de las características internas del medio permeable.

La permeabilidad efectiva k se define como el caudal que es capaz de atravesar una sección unitaria del acuífero, normal al flujo, bajo un gradiente piezométrico unitario. Depende, en consecuencia, tanto de las características del medio físico (acuífero), como de las del fluido que lo atraviesa (agua).

Por razones de su definición (caudal por unidad de superficie), las dimensiones de la permeabilidad efectiva pueden establecerse:

$$[k] = \frac{L^3 T^{-1}}{L^2} = LT^{-1}$$

Se usan cm/s y m/día como unidades más habituales (m/día suele utilizarse en hidrogeología con carácter prácticamente general), y cm/s en ingeniería. La permeabilidad intrínseca y la permeabilidad efectiva se relacionan únicamente por los parámetros capaces de definir las características del fluido.

$$k = K \frac{\gamma \omega}{\mu} \quad \text{o bien} \quad k = K \frac{g}{\eta}$$

donde:

k = permeabilidad efectiva [LT^{-1}]

K = permeabilidad intrínseca

$\gamma \omega$ = peso específico del agua [$ML^{-2}T^{-1}$]

μ = viscosidad dinámica del fluido [$ML^{-1}T^{-1}$]

g = aceleración de la gravedad [LT^{-2}]

y en consecuencia:

$$[K] = \left[k \frac{\mu}{\gamma} \right] = \frac{LT^{-1} * ML^{-1}T^{-1}}{ML^{-2}T^{-2}} = L^2$$

No ha sido posible encontrar una relación capaz de definir, con carácter generalista, la permeabilidad intrínseca en función del medio, a pesar de los esfuerzos de diversos

investigadores. En cualquier caso, no influye solamente el tamaño de las partículas que conforma el medio, sino también su forma y superficie, no admitiendo generalización estas dos últimas características. Diversos autores de esta temática han establecido las siguientes relaciones:

$$K = c * d_e^2 \quad \text{Hazen}$$

$$K = c * m^n * d_e^2 \quad \text{Slichter}$$

$$K = \lambda \left(\frac{m-0,13}{(1-m)^{1/3}} \right)^2 * d_e^2 \quad \text{Terzaghi}$$

La variable d_e es el denominado diámetro eficaz, que, para el caso más general es el d_{10} de la curva granulométrica de la muestra; es decir, el tamaño de abertura de tamiz que permite el paso del 10 % en peso de la muestra de material granular. Los coeficientes c , m , n y λ dependen de las características geométricas y de fricción de los granos, pudiendo por ello admitirse que para cualquier caso:

$$K = cte * d_e^2 \quad \text{y, por tanto:} \quad K = cte * d_{10}^2$$

para un mismo fluido a una misma temperatura. La permeabilidad, al contrario que ocurría con la porosidad, sí depende del tamaño del grano; tal y como se ha visto, el valor d_{10} condiciona el valor de la permeabilidad.

La **porosidad** es la relación entre el volumen de huecos y el volumen total de una roca. Es un parámetro adimensional y depende únicamente de la constitución de la roca o suelo, es decir, de su textura característica, sin que intervenga la forma geométrica ni la potencia de la formación o su mecanismo de funcionamiento hidráulico en la naturaleza.

Según el tipo de formación, los poros pueden ser debidos a espacios intergranulares, en las formaciones detríticas, o a grietas y fisuras, en el caso de rocas fisuradas o cársticas; el concepto de porosidad puede asociarse a unas y otras.

La porosidad de una formación puede estar ligada únicamente a la textura de esta o depender además de las características del fluido que se mueve en su interior. La primera

de ellas es la **porosidad total** n , referida al volumen total de poros, independientemente de que el fluido tenga o no la capacidad de circular entre ellos:

$$n = \frac{\text{volumen de los poros}}{\text{volumen total}}$$

El segundo concepto es la **porosidad eficaz** n_e , también denominada porosidad cinemática, referida al volumen de poros conectados por los que el transporte de fluido es posible, y queda ligada no solo a la textura de la formación, sino también a las características del fluido:

$$n_e = \frac{\text{volumen de poros conectados}}{\text{volumen total}}$$

2.3 El ensayo de permeabilidad bajo carga constante. La norma UNE 103403:1999

El objetivo del ensayo de permeabilidad bajo carga constante es la determinación del coeficiente de permeabilidad de una muestra de suelo granular expresado en unidades de velocidad, usando un permeámetro de carga constante, en el cual el flujo vertical de agua a través de una probeta es laminar.

Este procedimiento es apropiado para suelos que tiene un coeficiente de permeabilidad comprendido entre 10^{-2} m/s y 10^{-5} m/s, y que no contengan más de un 10% de material que pase por el tamiz de abertura 80 μm .

El permeámetro se compone de varios elementos. Uno de esos elementos, tal y como se muestra en la Figura 2.2, es una célula de permeabilidad de forma cilíndrica, ya sea metálica o preferentemente de material plástico transparente, con dos tapas estancas de metal resistente a la corrosión. El diámetro inferior de la célula debe ser al menos 12 veces el tamaño máximo de partícula del suelo a ensayar. En la célula se debe incluir:

- Base y cabeza, ajustables al cuerpo mediante tornillos.
- Un pistón que atraviese el cuerpo de la célula, y que permita el bloqueo vertical mediante un tornillo. El pistón deberá contener una placa perforada en su extremo inferior. El diámetro y número de perforaciones de la placa perforada serán las

- apropiadas para que no se restrinja el flujo de agua y así no pueda afectar el resultado del ensayo.
- Otra placa perforada situada en la base de la célula.
 - Dos orificios, uno en la cabeza y otro en la base, con sus llaves de apertura y cierre correspondientes.
 - Un cuerpo cilíndrico metálico resistente a la corrosión, o de material plástico transparente, con tres aberturas equipadas con los cuellos de conexión a los tubos piezométricos y uniformemente distribuidas a lo largo de su generatriz. La distancia de los cuellos de conexión superior e inferior a las respectivas placas no debe ser, en ningún caso, inferior a $0,5 D$, siendo D el diámetro interior de la célula de permeabilidad.
 - Dos discos de material poroso o de malla de alambre de un diámetro ligeramente inferior al diámetro del cuerpo de la célula. Su permeabilidad debe ser mayor que la del suelo a ensayar, pero con aberturas suficientemente pequeñas para evitar el paso de partículas.

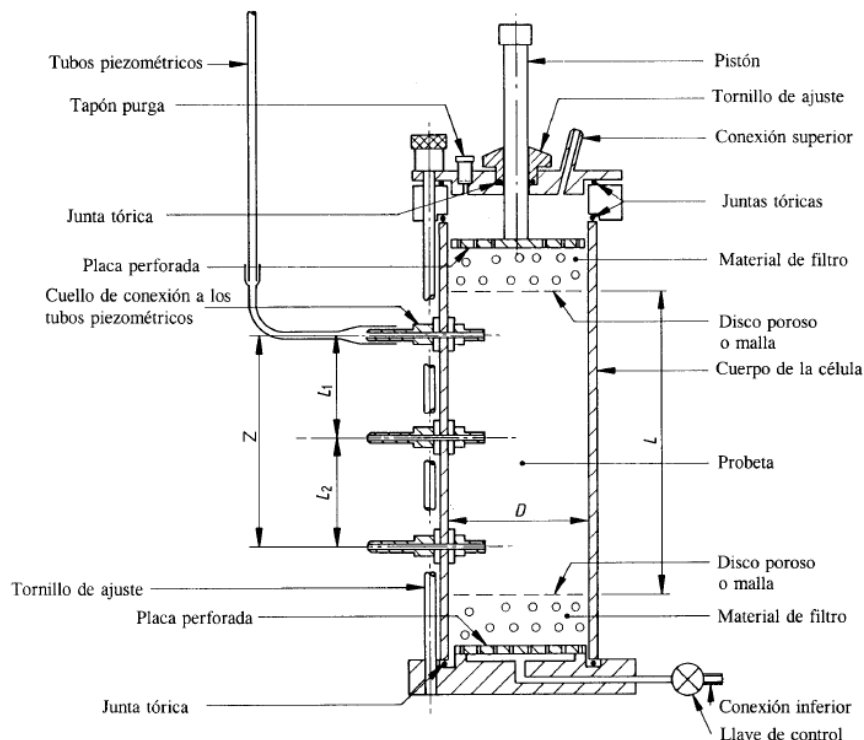


Figura 2.2. Sección de una célula típica de permeabilidad. Fuente: UNE 103403.

Otro elemento importante es un depósito de agua desaireada, de altura regulable y capaz de mantener un suministro de agua con nivel constante respecto a la célula de permeabilidad. Debe llevar un orificio en la tapa superior y tres conexiones en la inferior. Una de esas conexiones sirve para mantener un nivel de agua constante, otra para la entrada de agua desaireada, y una tercera para la alimentación de la célula, tal y como se observa en la Figura 2.3.

También debe haber un tablero con tres tubos piezométricos y sus correspondientes escalas graduadas. Los tubos deben ser de vidrio o plástico transparente y tener el mismo diámetro interior. Deben estar montados de manera que su parte más baja se encuentre al nivel de la base del permeámetro y su parte más alta al nivel del depósito de agua de nivel constante, en su posición más alta posible.

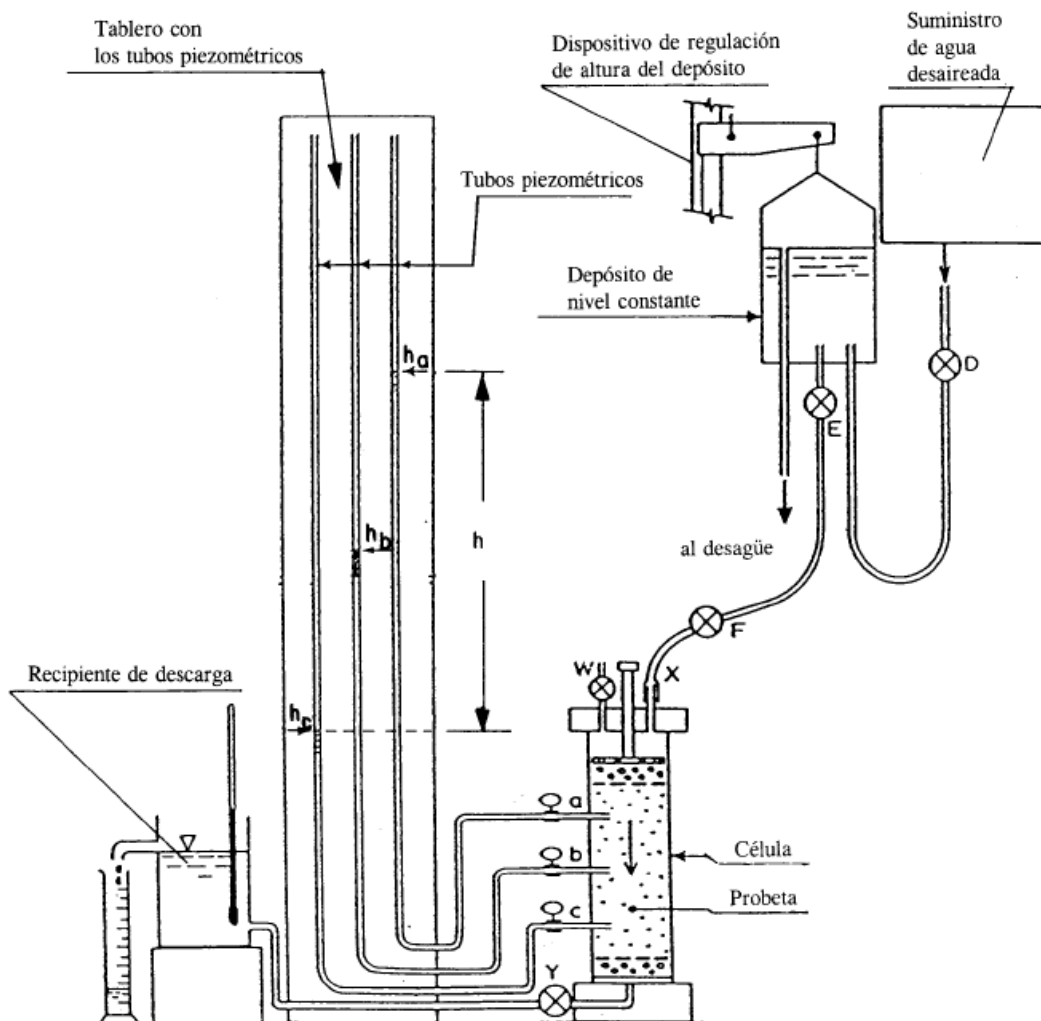


Figura 2.3. Montaje general del ensayo de permeabilidad de carga constante con flujo de agua descendente. Fuente: UNE 103403.

Otros componentes imprescindibles son las tuberías flexibles con sus correspondientes llaves, para conectar el extremo inferior de los tubos piezométricos a las salidas correspondientes situadas en el lateral del cuerpo de la célula de permeabilidad, así como un recipiente de descarga con nivel constante y probetas graduadas de 100 ml, 500 ml y 1000 ml de capacidad.

Por último, el material de filtro, situado entre las placas perforadas y los discos porosos o mallas de alambre, debe tener una curva granulométrica entre cuatro veces el D_{15} y cuatro veces el D_{85} de la granulometría de la muestra. Además, debe estar bien graduado.

Preparación de la muestra

El procedimiento que hay que seguir para preparar la muestra es el que se muestra a continuación. Se toma una parte de la muestra que queremos analizar. De esa parte tomamos dos porciones para determinar la humedad (W) y la densidad relativa de las partículas (G_s). De la parte que sobra una vez descartadas las dos porciones tomamos la masa m_a . Después medimos el diámetro de la célula a varias alturas y obtenemos la media aritmética de esas mediciones. Así también medimos las distancias L_1 y L_2 , tal y como muestra la Figura 2.2, entre las salidas de los tres tubos piezométricos. Se monta la célula de permeabilidad con la base, la placa perforada y el cuerpo cilíndrico. Se vierte el material de filtro sobre la placa perforada, se nivela la superficie de dicho material y se coloca un disco poroso o de malla de alambre. La altura del material de filtro es de unos 40 mm para una célula de un diámetro de 75 mm.

La norma nos indica que para la compactación y colocación de la muestra en la célula hay tres procedimientos a seguir:

- a) Por compactación ligera a una humedad determinada.

Obtenemos el volumen de agua necesario que necesitamos verter en la muestra para obtener la humedad deseada con esta fórmula:

$$V = \frac{W_1 - W}{100 + W} * m_a$$

donde: W_1 = humedad buscada (%);

W = contenido de humedad de la muestra secada al aire (%);
 m_a = masa de la muestra.

De esa masa m_a saldrán dos partes. De una de las partes se echarán las 6 capas del mismo espesor en la célula. Determinamos la masa del material sobrante m_2 , secando a continuación dicho material en una estufa y obtenemos su masa m_3 . No obstante, este método no nos será de uso para el presente proyecto.

b) Vertido en seco de la muestra

Se vierte la muestra en seco a la célula con la ayuda de un embudo y un tubo flexible como se muestra en la Figura 2.4. De la masa m_a obtenemos dos partes. Una que será la que echemos a la célula, y la otra sobrante será la masa $m(s)$. Posteriormente secamos esa muestra y obtenemos su masa m_3 .

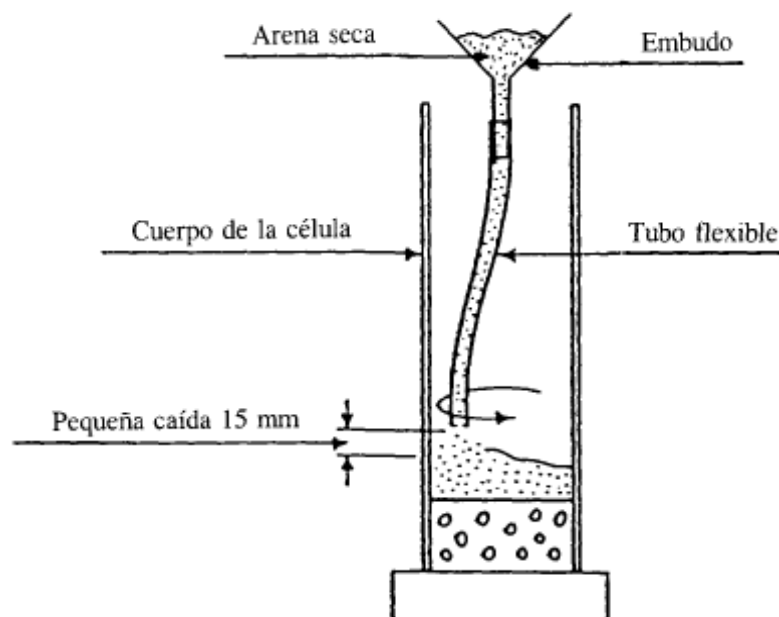


Figura 2.4. Vertido en seco de la muestra. Fuente: UNE 103403.

c) Vertido de la muestra saturada

Este método se puede esquematizar en la Figura 2.5. Una vez vertida la muestra obtenemos el material sobrante y secamos en estufa para determinar su masa, m_3 .

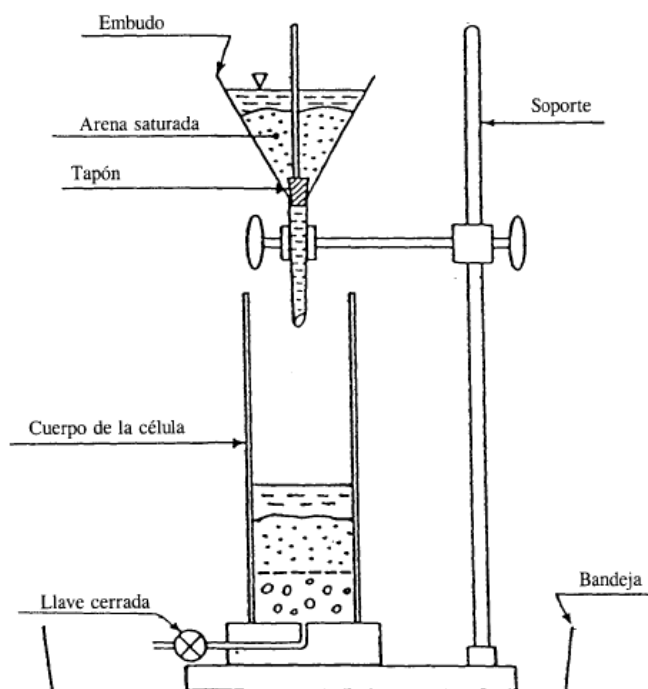


Figura 2.5. Vertido con arena saturada. Fuente: UNE 103403.

Después de verter la muestra con cualquiera de los 3 métodos anteriores se procede a colocar la malla de alambre o disco poroso, el material de filtro y la placa perforada. Se conectan todos mediante tubería flexibles de la manera que se representa en la Figura 2.3. Se abren las llaves E, F, y W dejando fluir el agua. Para eliminar el aire ocluido cerrados la llave W. Después abrimos las llaves Y, a, b, c y dejamos fluir el agua hasta que se estabilicen los tubos piezométricos. Se mide la altura L de la muestra del permeámetro. Se regula la altura del depósito de nivel constante para establecer un gradiente hidráulico adecuado al tipo de suelo y colocamos una probeta graduada en la salida del sistema. Los cálculos que se harán serán los siguientes:

- a) El caudal de agua q_i , en ml/s, calculado mediante el agua recogida en la probeta durante un intervalo de tiempo dado o el tiempo transcurrido hasta completar un volumen de agua determinado:

$$q_i = \frac{V}{t}$$

siendo V el volumen de agua recogido en la probeta y t el tiempo que ha transcurrido para recoger ese volumen.

- b) El gradiente hidráulico, i , entre los tubos piezométricos extremos. Para ello medimos los niveles de agua en los tubos piezométricos, h_a , h_b , h_c , en mm. Si los niveles no son equidistantes, indica que la muestra no está homogénea y hay que desmontarla. El gradiente hidráulico se calcula con la siguiente fórmula:

$$i = \frac{h}{Z}$$

siendo h la diferencia de nivel de los tubos piezométricos extremos, expresada en mm, y $Z = L_1 + L_2$. Esta distancia es la distancia entre las salidas extremas sobre el cuerpo de la célula de permeabilidad, expresada en mm (Figura 2.2).

- c) El coeficiente de permeabilidad, k , en m/s, mediante la siguiente formula:

$$k = \frac{q R_t}{i A}$$

donde:

q es el valor calculado en el apartado a) (ml/s)

R_t es el factor de corrección de la viscosidad del agua por la temperatura (Figura 2.6).

i es el gradiente hidráulico calculado en el apartado b)

A es el área media de la muestra, en mm², calculada con el diámetro medio, D , de la célula.

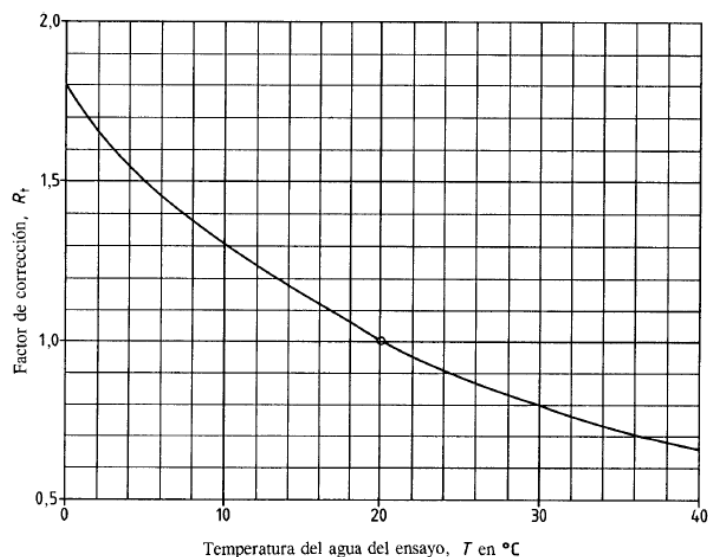


Figura 2.6. Factor de corrección por temperatura. Fuente: UNE 103403.

Finalmente podemos calcular otros parámetros como la densidad seca o el índice de huecos de la muestra contenida en la célula de permeabilidad.

La densidad seca, ρ_d (en Mg/m^3) se calcula con la siguiente fórmula:

$$\rho_d = \frac{4000 m}{\pi D^2 L}$$

siendo m , la masa de la muestra en seco, D , el diámetro de la célula y L , la longitud de la muestra en la célula.

El índice de huecos de la muestra de ensayo, e , se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$e = \frac{\rho_s \gamma_w}{\rho_d} - 1$$

siendo ρ_d , la densidad seca de la muestra, γ_w , la densidad del agua y ρ_s , la densidad relativa de las partículas.

2.4 Otros ensayos necesarios para el desarrollo del trabajo

Para realizar satisfactoriamente el ensayo de permeabilidad de una muestra se debe realizar otra serie de ensayos que se enumeran a continuación. Pero antes de realizar cualquier ensayo se dará uso a la norma UNE 103 100 relativa a la preparación de muestras para ensayos de suelo de manera generalizada. El objeto de esta norma es describir la manera de efectuar la recepción y el almacenamiento de las muestras de suelo destinadas a ensayos de laboratorio. En el laboratorio se debe disponer de una cámara húmeda afín de evitar las variaciones de humedad en caso de muestras inalteradas. Dichas muestras tampoco deben sufrir golpes ni manipulaciones excesivas que puedan producir roturas, fisuras u otros daños. Para realizar cualquier ensayo se requiere un secado previo. Esto se realizará en una estufa o mediante secadores de circulación de aire frío o caliente pero siempre a menos de 60° C. Para realizar un secado de la muestra al aire se debe extender sobre una lona, bandeja o el suelo del laboratorio siempre y cuando los elementos mencionados estén limpios.

Para realizar el cuarteo de la muestra, hay que dividirla en dos porciones aproximadamente iguales, mediante cuarteadores adecuados, y repetir la operación con cada una de ellas, así sucesivamente hasta obtener la cantidad de suelo que se necesita.

Si se quiere dividir la muestra en dos fracciones se debe pasar por el tamiz elegido. Se disgregan los terrones de suelo que puedan haber quedado retenidos y se vuelve a pasar lo disgregado, por dicho tamiz. Se repite la operación las veces que se precise para dejar el material bien limpio de finos.

Esta normativa es una guía orientativa para la preparación de muestras de carácter general. Cada normativa correspondiente a un ensayo especifica el método que se debe de seguir para preparar la muestra. A continuación, se verán los diferentes ensayos necesarios para llevar a cabo el ensayo de permeabilidad.

Granulometría

Para realizar este ensayo se dará uso a la norma UNE 103 101. Esta norma tiene por objeto especificar el método para determinar los diferentes tamaños de las partículas de un suelo y obtener la cantidad, expresada en tanto por ciento de estas, que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta el 0,08 mm.

Los aparatos y material necesario para este ensayo serán una serie de tamices de malla cuadrada y tejido de alambre cuyas aberturas serán de 100 a 0,08 mm. También se necesitará una balanza que aprecie hasta 1 g y otra que aprecie 0,01 g. Un agitador mecánico en el cual se pueda regular la intensidad y el tiempo que se quiera mantener su funcionamiento. Se dispondrá de cepillos y brochas, entre otros materiales, para limpiar los tamices.

El procedimiento a seguir será colocar la muestra en un recipiente y tomar la masa total, habiendo tomado previamente la masa del recipiente. Se pondrán los tamices deseados de mayor a menor, vertiendo la muestra y se colocarán en el agitador mecánico dejándolo unos 20 minutos y a media potencia. Una vez pasado este tiempo sacamos la cantidad de suelo retenido en cada uno de ellos y obtenemos su masa. Los datos se expresarán siguiendo la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Tabla de resultados después de realizar el tamizado.

Abertura tamiz (mm)	Peso parcial (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
Fondo				
Total				

También tomaremos otros datos tal y como muestra la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Tabla de datos adicionales a tener en cuenta.

Masa recipiente + muestra	
Masa recipiente	
Masa de muestra	
Masa de muestra tras tamizado	
Porcentaje de error (<5%)	

Los datos de la Tabla 2.1 serán representados en un gráfico semilogarítmico, cuyo eje vertical será el porcentaje pasante acumulado y el horizontal será el tamaño de la abertura del tamiz, donde se obtendrá la curva granulométrica, como se muestra en la Figura 2.7.

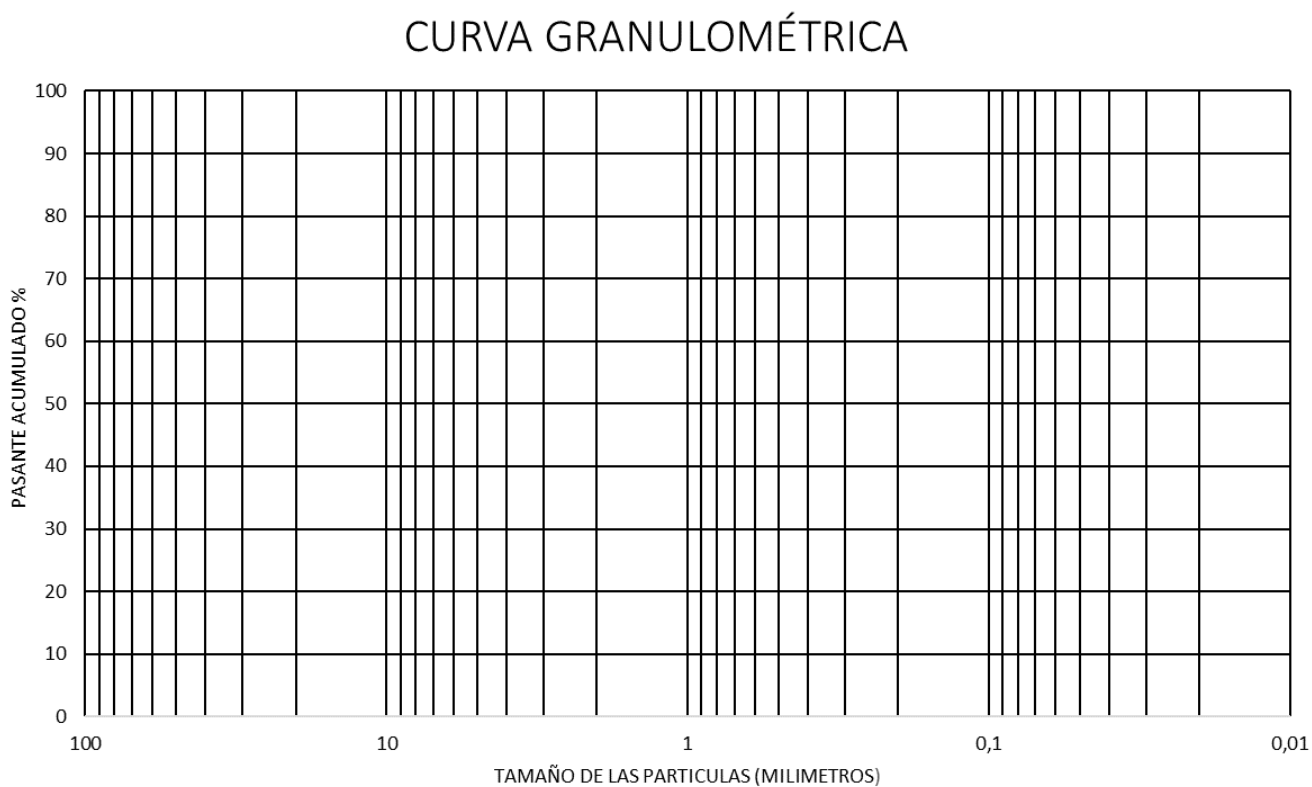


Figura 2.7. Gráfico semilogarítmico.

Densidad relativa de las partículas de un suelo (Gs)

Para calcular este parámetro se dará uso a la norma UNE 103-302-94. Esta norma tiene por objeto la determinación de la densidad relativa de las partículas menores de 5 mm, de un suelo, definida como cociente entre la masa de un determinado volumen de suelo exento de poros, a una temperatura y la masa del mismo volumen de agua destilada exenta de aire, a la misma temperatura.

El material necesario para realizar este ensayo será 3 picnómetros, como se muestra en la Figura 2.8, de capacidad entre 50 y 100 cm³.



Figura 2.8. Picnómetro. Fuente: <http://www.simela.com.ec/web/index.php/es/producto/item/picnometro-en-vidrio>.

A parte de los picnómetros se dispondrá de una balanza de precisión de 0,001g, agua destilada, paño y papel de filtro, entre otros materiales.

La norma indica que hay que secar la muestra al aire o en una estufa a 60 °C y pasarla por el tamiz de 5 mm. Después de eso se va a desecar la muestra en la estufa a unos 110 °C hasta que la masa quede constante y dividir en 3 porciones de aproximadamente 15 g cada una.

El método que se seguirá será el siguiente. Se introduce el picnómetro en un baño termostático de 20 – 25 °C para conseguir que la temperatura del picnómetro no cambie la del agua a introducir posteriormente. Llenamos el picnómetro hasta la línea de enrase. Se extrae el picnómetro del baño y se determina su masa M_1 . Se retira el cuello del picnómetro y se vacía hasta la mitad aproximadamente. Se seca y se determina la masa M_2 sin colocar el cuello. Con la ayuda de un embudo se vierte la primera porción, de unos 15 g aproximadamente, y se determina su masa M_3 sin colocar el cuello. Una vez colocado el cuello del picnómetro calculamos su masa, o sea la que sería M_4 .

La densidad relativa de las partículas sólidas viene dada por la siguiente expresión:

$$G_s = \frac{M_3 - M_2}{(M_3 - M_2) + (M_1 - M_4)}$$

Se adopta la densidad relativa de un suelo, la media aritmética de los resultados obtenidos con las tres porciones ensayadas.

Densidad mínima de una arena

Para determinar la densidad mínima de una arena se utilizará la norma UNE 103-105-93. Esta norma tiene por objeto especificar el método para determinar la densidad mínima de una arena seca que pase por el tamiz de 5 mm, así como que no contenga más de un 10% del material que pase por el tamiz de 0,08 mm.

Para ello se necesitarán un molde cilíndrico de dimensiones conocidas, entre otros materiales usualmente disponibles en el laboratorio.

Se tomará una muestra y se secará en la estufa a 105 – 115 °C. Del material resultante se tomarán dos porciones iguales por cuarteo.

Se medirán las dimensiones del molde cilíndrico (diámetro y altura) para calcular su volumen V y se tomara su masa M_1 .

La muestra se verterá al molde mediante un embudo de dimensiones similares a las de la Figura 2.9. El método que se seguirá se detalla a continuación. Colocamos el dedo en la parte inferior del embudo y llenamos el embudo de material hasta la sección AA'. Se quita el dedo, y se vierte la muestra con la menor altura posible hasta formar un cono en la boca del molde. Se enrasa la arena con la boca del molde y se van tomando sucesivos troncos de conos de bases paralelas. Hay que evitar al máximo la compactación de la arena, evitando también cualquier golpe o vibración sobre el recipiente durante el enrase. Se determina la masa del molde lleno, M_2 . Repetir la operación con la otra muestra.

La densidad mínima vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\rho_{\min} = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

Se adoptará como densidad mínima la media aritmética de los resultados obtenidos en las dos operaciones realizadas.

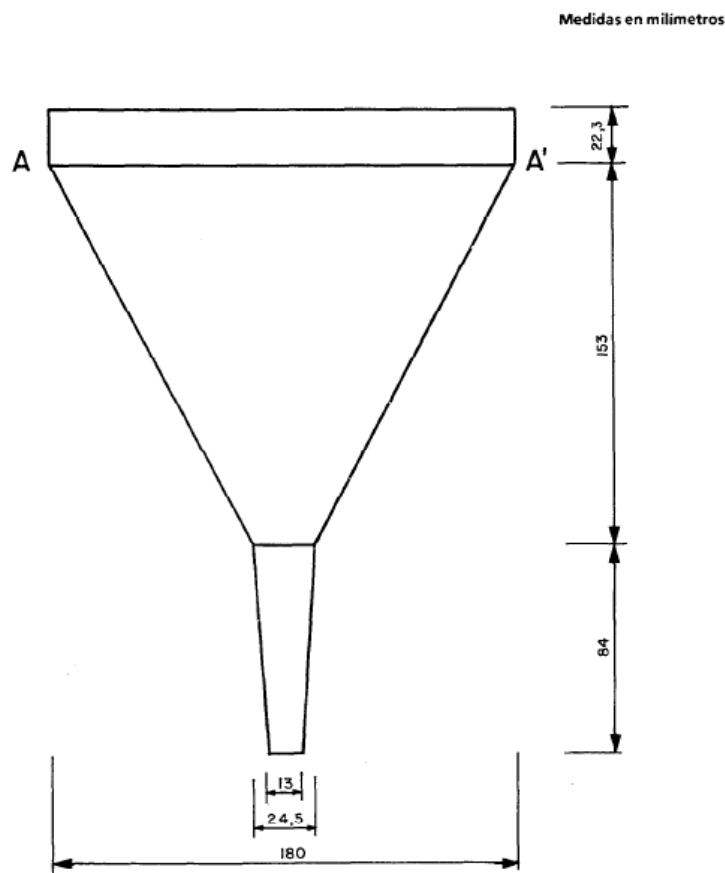


Figura 2.9. Embudo para verter la muestra. Fuente: UNE 103-105-93.

Densidad máxima de una arena

Para determinar la densidad máxima de una arena se utilizará la norma UNE 103-106-93. Esta norma tiene por objeto especificar el método para determinar la densidad máxima de una arena seca que pase por el tamiz de 5 mm, así como que no contenga más de un 10% del material que pase por el tamiz de 0,08 mm.

Para realizar este ensayo se necesitará, igual que en el caso anterior, un molde cilíndrico de dimensiones conocidas o a medir.

La norma indica que se utilice una maza con un pistón de 4,54 kg y una altura de caída controlada accionada a mano o mediante un compactador mecánico. Debido a que este aparato no estaba a nuestra disposición se deberán utilizar otros métodos para compactar la muestra como el de vibración o el de verter la muestra húmeda y facilitar su compactación.

Por lo demás el procedimiento es idéntico al método anterior. Se determina la masa del molde M_1 , así como sus dimensiones y su volumen. Se vierte la muestra en el molde donde se intentará la máxima compactación y se determina su masa, M_2 . La densidad máxima vendrá dada por la siguiente expresión.

$$\rho_{\max} = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

Se adoptará como densidad máxima la media aritmética de los resultados obtenidos en las dos operaciones realizadas.

Porosidad de áridos

La porosidad de áridos se calculará mediante la siguiente expresión:

$$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} * 100$$

donde:

v es el porcentaje de huecos

ρ_b es la densidad aparente de arena suelta, valor correspondiente al tercer método de este apartado (densidad mínima de una arena)

ρ_p es la densidad de las partículas sólidas, valor correspondiente al segundo método de este apartado (Gs).

2.5 Correlación entre los distintos parámetros medidos en laboratorio

Es interesante señalar la relación que hay entre los parámetros de permeabilidad y de las curvas granulométricas.

Hace aproximadamente un siglo, Hazen desarrolló la siguiente fórmula empírica para predecir la permeabilidad (o conductividad hidráulica) de las arenas saturadas:

$$k = C_H * D_{10}^2$$

donde:

k es la permeabilidad expresada en cm/s

C_H es el coeficiente empírico de Hazen

D_{10} es el tamaño de la partícula para el cual el 10% es más fino en cm.

A pesar de que Hazen desarrolló su fórmula para el diseño de filtros de arena para la purificación del agua, es decir, arena suelta y limpia con un coeficiente de uniformidad D_{60} / D_{10} , de aproximadamente 2, se usa frecuentemente para estimar la permeabilidad del suelo in situ.

El valor de C_H generalmente se supone que es igual a 100, pero en diferentes bibliografías se han dado unos rangos de valores con variaciones.

3. MONTAJE DEL ENSAYO DE PERMEABILIDAD BAJO CARGA CONSTANTE

3.1 Metodología de trabajo

La metodología que se ha seguido se explica a continuación en los siguientes pasos:

- a) Se han observado varias muestras en el laboratorio de geotecnia contenidas en diversos capazos y se ha elegido una muestra con apariencia de arena, como la de la Figura 3.1, apta para los ensayos que eran objeto de este proyecto. Esos ensayos sirven, como se ha especificado en el apartado de fundamentos teóricos, para la obtención de las curvas granulométricas, de la densidad relativa de partículas de un suelo, de la densidad mínima de una arena y de la densidad máxima de una arena. Posteriormente se reflejarán los datos tomados en dichos ensayos.



Figura 3.1. Ejemplo de muestra de arena para realizar los ensayos.

- b) Montaje del permeámetro y de todos los elementos necesarios, para después realizar los ensayos iniciales marcados que eran, la permeabilidad de una arena con densidad mínima y, por lo tanto, con porosidad máxima, y la permeabilidad de una arena con densidad máxima y por lo tanto con la mínima porosidad posible. Después de observar los resultados se verían las distintas relaciones entre estos parámetros y la conductividad hidráulica de una muestra de arena.

El montaje del permeámetro se detallará a continuación, en el apartado 3.2.

3.2 Montaje

El laboratorio de geotecnia de la Universidad Politécnica de Cartagena ya disponía de un aparato de estas características. La idea de instalar un segundo permeámetro nació del director de este proyecto, Iván Alhama, ya que el departamento había adquirido uno nuevo y listo para montar.

El nuevo aparato contaba con todos los elementos necesarios especificados en la norma como se puede observar en la Figura 3.2.



Figura 3.2. Diferentes piezas del permeámetro.

Inicialmente se instaló el tablero que contiene los tubos piezométricos al lado del que correspondía al permeámetro anterior (Figura 3.3).

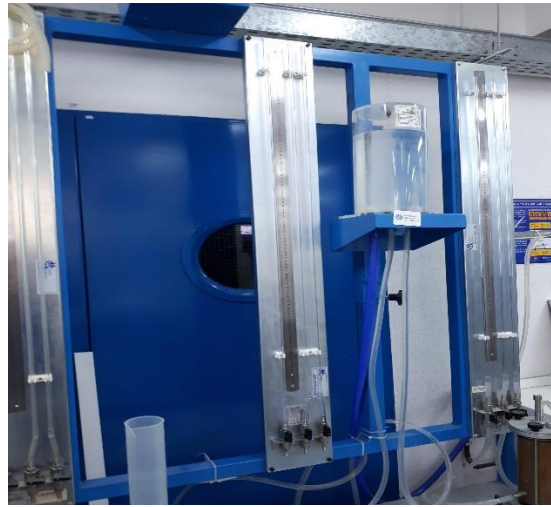


Figura 3.3. Tablero con los tubos piezométricos.

Se tomó la decisión de mantener el mismo depósito de agua desaireada para las dos células, tanto para la que había antes como para la que se iba a instalar. Para ello el tubo flexible procedente del depósito de agua desaireada tendría que divergir a dos tubos flexibles, uno para cada célula. La manera de realizar esta divergencia fue la de utilizar una unión en forma de T. Al principio se compró una pieza de estas características de material plástico, como se observa en la Figura 3.4, pero era más propia para ámbitos de jardinería.



Figura 3.4. Unión plástica en forma de T.

Ya que esta unión solo permitía la unión con tubos gruesos, se tuvo que hacer un empalme entre 3 tubos gruesos con tubos finos (Figura 3.5).



Figura 3.5. Unión plástica en forma de T unida a tubos flexibles.

Después de realizar varios ensayos y poner en marcha el primer permeámetro del laboratorio se observó que la unión en forma de T tenía fugas de agua y era imposible realizar ensayos con resultados fiables. Con lo cual se decidió adquirir una pieza en forma de T más propia del ámbito hidráulico, que sustituiría la anterior, y de material metálico que garantizaría la ausencia de fugas importantes (Figura 3.6).



Figura 3.6. Unión en forma de T metálica.

Una vez colocada la T se procedió al montaje la célula. Se unieron los tres tubos piezométricos con las aberturas del cuerpo de la célula mediante tubos flexibles, como se observa en la Figura 3.7.



Figura 3.7. Unión de las salidas de la célula a los tubos piezométricos.

Se unió con un tubo flexible la cabeza de la célula, que contiene el pistón, con el extremo libre de la unión en forma de T mencionada anteriormente (Figura 3.8).

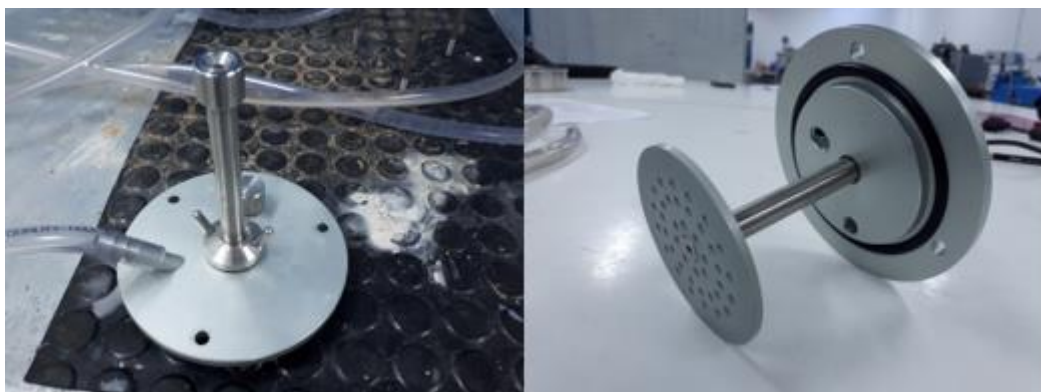


Figura 3.8. Cabeza de la célula.

Se colocó un tubo flexible en el orificio de la base para descargar el agua de salida y calcular el caudal (Figura 3.9).

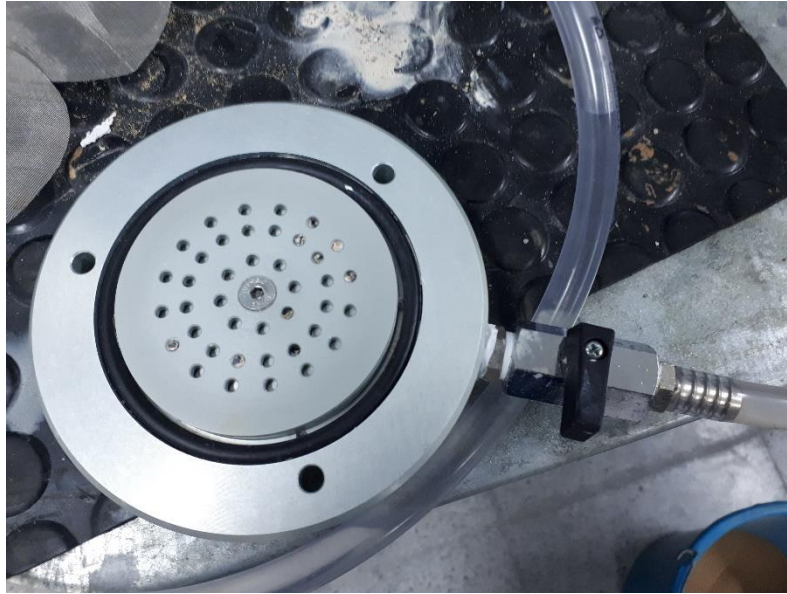


Figura 3.9. Base de la célula.

Después de esto se colocó el cuerpo cilíndrico transparente de la célula sobre la base ajustando lo mejor posible a la goma que rodea la placa perforada. Se colocaron las tres varas con rosca en sus extremos en los tres orificios de la base y en los tres orificios de la pieza circular de acero inoxidable que sostiene la cabeza. Mediante los tres tornillos de la base y los tres tornillos de la cabeza (Figura 3.10) se ajustaron las tres varas de la forma más adecuada para que el cuerpo de la célula quedara aislado e inmobilizado.



Figura 3.10. Tornillos de ajuste.

El aspecto final del permeámetro es el que se refleja en la Figura 3.11.

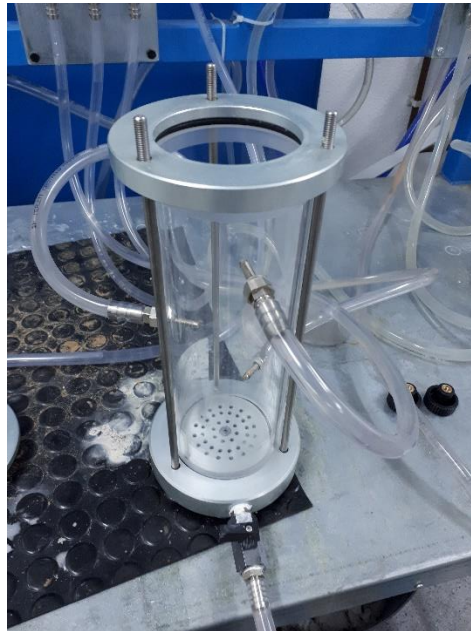


Figura 3.11. Permeámetro montado sin la cabeza.

Finalmente se realizó una prueba solo con agua para comprobar que el sistema no tenía fugas en los distintos elementos. Se reguló la altura del depósito de agua desaireada para establecer el gradiente hidráulico razonable y se abrieron las diferentes llaves para estabilizar al sistema (Figura 3.12).

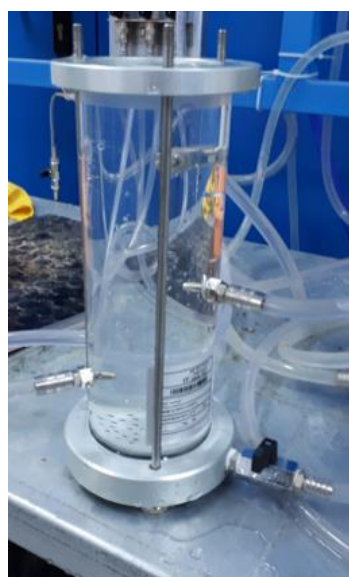


Figura 3.12. Célula de permeabilidad llena de agua.

4. PRUEBAS DE LABORATORIO

4.1 Selección de muestras

Inicialmente se escogió una muestra de arena del capazo que aparece en la Figura 3.1, del apartado 3 (Metodología de trabajo). Con esa muestra se realizaron diversos ensayos, como el de granulometría, G_s (densidad relativa de las partículas), densidad mínima, etc. En este capazo no había arena de manera abundante, por lo que por precaución se cambió a otro capazo que también contenía una arena similar a la anterior y una cantidad mucho más significativa. Antes de empezar a hacer todos los ensayos planeados, se decidió limitar esta muestra de arena entre los diámetros 0.63 mm y 0.2 mm. Para ello se realizó un cribado previo utilizando los tamices de dichos diámetros. El procedimiento del cribado consistió en coger varias muestras de aproximadamente 1 kg del capazo grande y colocarlas en el agitador durante 10 minutos a potencia 6 (Figura 4.1).



Figura 4.1. Cribado previo.

La nueva arena a utilizar, resultado del cribado mencionado anteriormente, se vertería a un cubo más pequeño de color azul (Figura 4.2).



Figura 4.2. Arena de estudio.

Todos los ensayos se harían con la arena contenida en el cubo azul.

4.2 Ensayos

Los ensayos realizados se ajustaron en la medida de lo posible a las especificaciones de las diversas normativas.

4.2.1 Curva granulométrica

El primer ensayo que se realizó fue la obtención de las curvas granulométricas de dos muestras representativas de la arena que contenía el cubo azul. Los tamices disponibles en el laboratorio son los de los siguientes tamaños: 40, 28, 20, 12.5, 5, 2, 0.63, 0.4, 0.3, 0.2, 0.15, 0.106, 0.075, 0.063, 0.045 (mm). Se utilizaron los tamices de 0.63, 0.4, 0.3, 0.2 y 0.15 mm (Figura 4.3), colocados en orden descendente de arriba abajo.



Figura 4.3. Tamices utilizados.

Se colocaron los tamices con cada una de las muestras en el agitador mecánico durante 15 min a potencia 7 (Figura 4.4).



Figura 4.4. Agitador mecánico.

El procedimiento sería el mismo para las dos muestras. Después de dejar durante ese tiempo los tamices en el agitador mecánico, se midió la masa de arena retenida en cada uno de los tamices. Los resultados obtenidos para las dos muestras se detallan a continuación.

Muestra 1

Las Tablas 4.1 y 4.2 detallan los resultados obtenidos de la muestra 1.

Tabla 4.1. Resumen de resultados de la muestra 1.

Masa recipiente + muestra	1.21 kg
Masa recipiente	0.25 kg
Masa de muestra	0.96 kg
Masa de muestra tras tamizado	0.95941 kg
Porcentaje de error (<5%)	0.06 %

Tabla 4.2. Tabla de resultados después del tamizado de la muestra 1.

Abertura tamiz (mm)	Peso parcial (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
0.63	0.15	0.015	0.015	99.985
0.4	9.98	1.040	1.055	98.945
0.3	37.64	3.923	4.978	95.022
0.2	733	76.400	81.378	18.622
0.15	141.94	14.794	96.172	3.828
Fondo	36.7	3.825	100	0
Total	959.41	100		

Con los datos de la Tabla 4.2 obtendremos la curva granulométrica (Figura 4.5).

CURVA GRANULOMETRICA MUESTRA 1

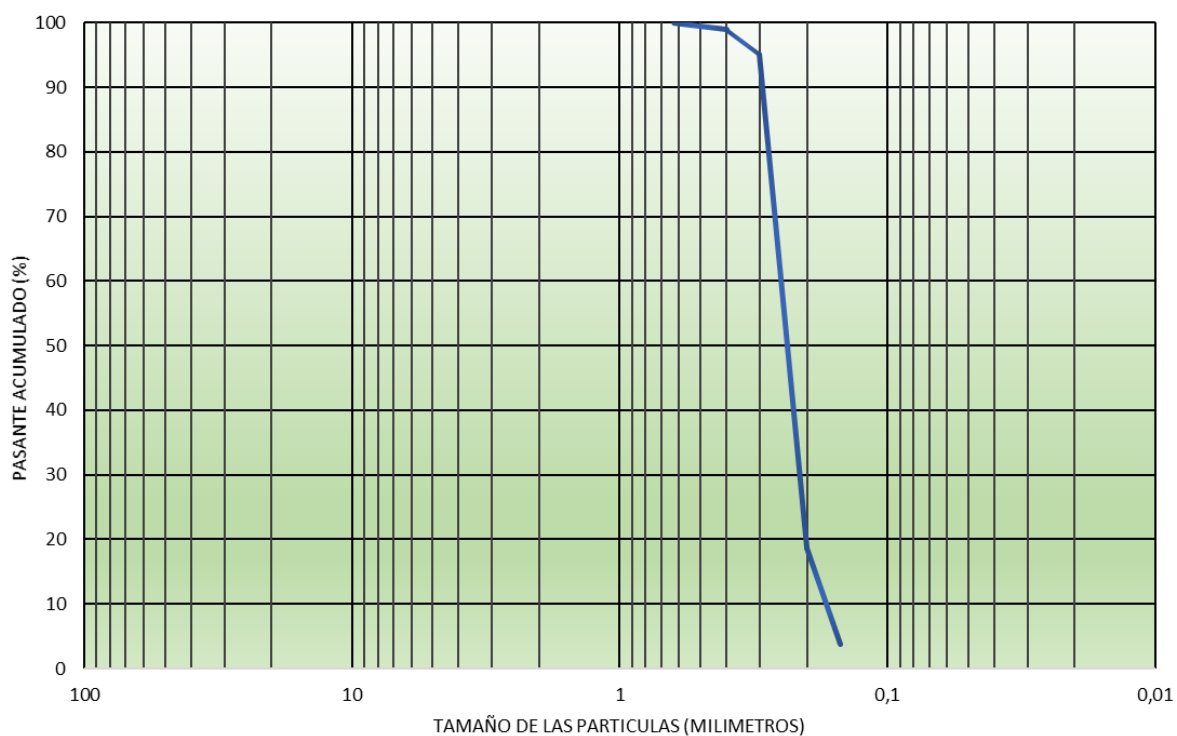


Figura 4.5. Curva granulométrica de la muestra 1.

Muestra 2

Las Tablas 4.3 y 4.4 detallan los resultados obtenidos de la muestra 2.

Tabla 4.3. Resumen de resultados de la muestra 2.

Masa recipiente + muestra	1.468 kg
Masa recipiente	0.25 kg
Masa de muestra	1.218 kg
Masa de muestra tras tamizado	1.21708 kg
Porcentaje de error (<5%)	0.0755 %

Tabla 4.4. Tabla de resultados después del tamizado de la muestra 2.

Abertura tamiz (mm)	Peso parcial (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
0.63	0.27	0.022	0.022	99.978
0.4	13.6	1.117	1.139	98.861
0.3	55.82	4.586	5.725	94.275
0.2	1006	82.657	88.382	11.618
0.15	111.45	9.157	97.539	2.460
Fondo	29.94	2.460	100	0
Total	1217.08	100		

Con los datos de la Tabla 4.4 obtendremos la curva granulométrica (Figura 4.6).

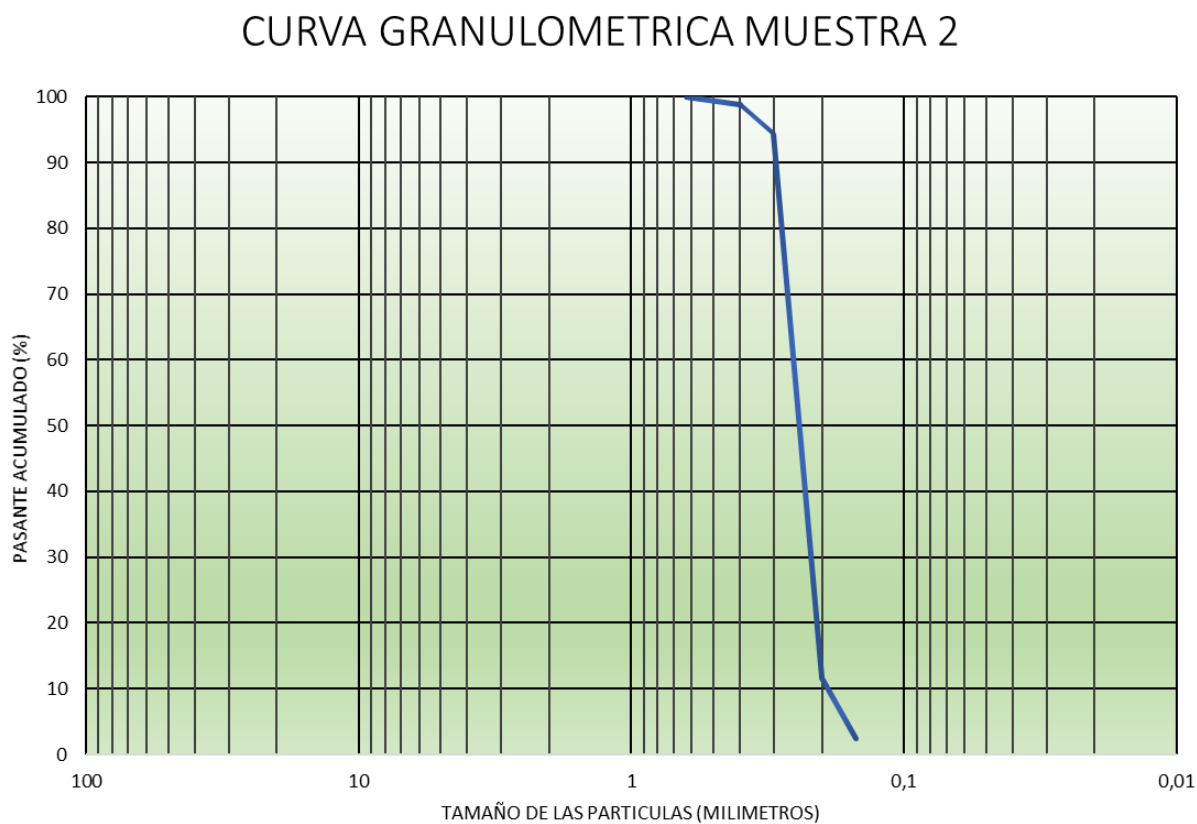


Figura 4.6. Curva granulométrica de la muestra 2.

4.2.2 G_s (Densidad relativa de las partículas de un suelo)

Para calcular G_s tomamos una muestra de aproximadamente 50 g del cubo azul y la dividimos en tres porciones de unos 15 g cada una. Se calculó la densidad relativa de las partículas de cada una de esas porciones, aunque se detallarán únicamente los pasos que se siguieron con la primera porción ya que con las otras dos el procedimiento fue idéntico.

Porción 1. Masa Porción 1 = 15.32 g.

1. Rellenamos el picnómetro con agua destilada hasta la línea de enrase (Figura 4.7).



Figura 4.7. Picnómetro lleno con cuello.

2. Tomamos la masa (M_1) del picnómetro con el cuello puesto. $M_1 = 170.26$ g (Figura 4.8).



Figura 4.8. Masa del picnómetro lleno con cuello.

- Retiramos el cuello del picnómetro y vaciamos hasta la mitad (Figura 4.9).



Figura 4.9. Picnómetro lleno hasta la mitad sin cuello.

- Tomamos la masa (M_2) del picnómetro sin cuello y medio vacío. $M_2 = 119.25$ g (Figura 4.10).



Figura 4.10. Masa del picnómetro lleno hasta la mitad sin cuello.

- Vertimos la porción de muestra con un embudo seco y sacamos su masa (M_3). $M_3 = 134.57$ g (Figura 4.11).



Figura 4.11. Masa del picnómetro lleno hasta la mitad con la porción y sin cuello.

6. Rellenamos el picnómetro con agua destilada hasta la línea de enrase y con el cuello puesto calculamos su masa (M_4). $M_4 = 179,75$ g (Figuras 4.12 y 4.13).



Figura 4.12. Picnómetro lleno con la porción y con el cuello puesto.



Figura 4.13. Masa del picnómetro lleno con la porción y con el cuello puesto.

Los resultados de las otras dos porciones y de la que se mostraba anteriormente vienen recogidos en la Tabla 4.5. La densidad relativa de las partículas, G_s , se calculará con la siguiente fórmula:

$$G_s = \frac{M_3 - M_2}{(M_3 - M_2) + (M_1 - M_4)}$$

Tabla 4.5. Tabla de resultados de la densidad relativa de las partículas de las tres porciones de la muestra.

Porción	M_1 (g)	M_2 (g)	M_3 (g)	M_4 (g)	G_s
1	170.26	119,25	134,57	179,95	2,72
2	169.16	114.16	130.18	179.32	2.73
3	151.60	92.63	112.87	164.46	2.74

Después de obtener los G_s de las tres porciones obtenemos su media aritmética. El valor medio de G_s es 2.73.

4.2.3 Densidad mínima de una arena

Para calcular la densidad mínima de una arena se utilizará un molde cilíndrico de aluminio del cual se obtendrá su diámetro y su altura con un calibre (Figura 4.14).



Figura 4.14. Molde cilíndrico de aluminio y calibre.

Posteriormente se calculará su masa M_1 (Figura 4.15).



Figura 4.15. Masa del molde cilíndrico vacío.

$$M_1 = 33.16 \text{ g}$$

$$D = 0.6 \text{ dm}$$

$$h = 0.615 \text{ dm}$$

En cuanto a la arena, se cogerán aproximadamente 1.5 kg de muestra y se dividirá en 4 porciones iguales. Se seguirá la metodología de la norma UNE 103-105-93 para verter la muestra. Se vierte la muestra con la menor altura posible hasta formar un cono en la boca del molde. Se enrasa la arena con la boca del molde y se van tomando sucesivos troncos de conos de bases paralelas. Hay que evitar al máximo la compactación de la arena, evitando también cualquier golpe o vibración sobre el recipiente durante el enrase. Después de esta operación se tomará la masa del molde lleno M_2 . En el caso de la primera porción, $M_2 = 284.53 \text{ g}$ (Figura 4.16).



Figura 4.16. Masa del molde cilíndrico lleno.

Se repitió el proceso con las otras tres porciones. Para calcular la densidad mínima de cada una de ellas se utilizó la siguiente ecuación:

$$\rho_{\min} = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

$$V = \frac{\pi * 0.6^2}{4} * 0.615 = 0.1739 \text{ dm}^3.$$

Los datos quedan reflejados en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Tabla de resultados de la densidad mínima de las cuatro porciones de la muestra.

Porción	Volumen molde (dm ³)	M ₁ (kg)	M ₂ (kg)	ρ _{min} (kg/dm ³)
1	0.1739	0.03316	0.28453	1.4456
2	0.1739	0.03316	0.28407	1.4429
3	0.1739	0.03316	0.28583	1.4530
4	0.1739	0.03316	0.28410	1.4431

Se obtendrá la media aritmética de las cuatro densidades:

$$\rho_{\min} (\text{Media}) = \frac{1.4456 + 1.4429 + 1.4530 + 1.4431}{4} = 1.44615 \text{ kg/dm}^3$$

Por tanto, la densidad mínima de la arena será 1.44615 kg/dm³.

4.2.4 Densidad máxima de una arena

Debido a la falta de disponibilidad de una maza con pistón de 4,54 kg y una altura de caída controlada accionada a mano o mediante un compactador mecánico, se ha procedido a utilizar otros dos métodos para comparar y ver cuál de los dos es más eficaz.

Método I

El primer método consistirá en obtener la máxima compactación posible de la arena en los moldes mediante el agitador mecánico. Para ello se utilizarán 4 moldes enumerados distintos de aluminio de los cuales se tomarán su diámetro, altura y masa (Figura 4.17).



Figura 4.17. Moldes cilíndricos para calcular densidad máxima.

Obtendremos una muestra de arena de unos 2 kg la cual dividiremos por cuarteo en cuatro porciones iguales que se verterán en cada uno de los cuatro moldes.

El procedimiento se resume en los siguientes pasos:

1. Echamos 150 g de cada una de las porciones a cada uno de los moldes y los colocamos en el agitador de dos en dos, 5 minutos con potencia 7 (Figura 4.18).



Figura 4.18. Dos moldes cilíndricos en agitador mecánico.

2. Agregamos unos 100 g más a cada molde y dejamos 5 minutos con potencia 7.
3. Repetimos una vez más el proceso, pero esta vez con la tapa puesta y los moldes llenos para después enrasar cada molde intentando compactar al máximo la muestra.
4. Finalmente se quita la tapa y se toma la masa (M_2) de cada uno de esos moldes llenos y con la arena compactada.

Para calcular la densidad máxima se utilizó la siguiente ecuación:

$$\rho_{\max} = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

En las Tablas 4.7 y 4.8, se recogen las características de los cuatro moldes y los datos obtenidos de las masas de los moldes llenos.

Tabla 4.7. Tabla de características de los cuatro moldes utilizados en el Método I.

Molde	Diámetro (dm)	h (dm)	Volumen (dm ³)	Masa, M_1 (kg)
1	0.600	0.615	0.1739	0.03316
2	0.625	0.610	0.1871	0.03415
3	0.595	0.590	0.1640	0.03225
4	0.600	0.593	0.1677	0.03427

Tabla 4.8. Tabla de resultados de las densidades máximas con el Método I.

Porción	Vol (dm ³)	M_1 (kg)	M_2 (kg)	ρ_{\max} (kg/dm ³)
1	0.1739	0.03316	***	***
2	0.1871	0.03415	0.32202	1.5382
3	0.1640	0.03225	0.31246	1.7081
4	0.1677	0.03427	0.31631	1.6821

Al sacar el molde 1 del agitador, la tapa se había quedado acoplada y fue imposible poder retirarla, probablemente por la incrustación de pequeños granos de arena, con lo cual no se pudieron obtener los resultados del molde 1.

Se obtuvo la media aritmética de las otras tres densidades:

$$\rho_{\max} (\text{Media}) = \frac{1.5382 + 1.7081 + 1.6821}{3} = 1.643 \text{ kg/dm}^3$$

Por tanto, la densidad máxima de la arena obtenida con el método I será 1.643 kg/dm³.

Método II

El segundo método consistirá en humidificar la arena hasta darle cierta plasticidad para facilitar la compactación de ésta en el molde. Posteriormente se deberá desecar en la estufa el tiempo necesario para que se alcance una humedad cercana al cero.

Se utilizarán 3 moldes distintos cuyas características vienen recogidas en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Tabla de características de los tres moldes utilizados en el Método II.

Molde	Diámetro (dm)	h (dm)	Volumen (dm ³)	Masa, M ₁ (kg)
1	0.599	0.599	0.1688	0.03294
2	0.592	0.592	0.1629	0.03414
3	0.5955	0.5985	0.1664	0.03224

Primero se metieron los moldes en la estufa durante una hora a 90°C. Después de eso se dejaron secándose al aire durante 6 días. Finalmente, se dejaron 24 horas más, en la estufa a 90°C. Para calcular la densidad máxima se utilizó la siguiente ecuación:

$$\rho_{\max} = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

En la Tabla 4.10 se recogen los resultados de las masas de los moldes después de varios periodos de tiempo.

Tabla 4.10. Tabla de características de los tres moldes utilizados en el Método II.

Porción	M ₁ (kg)	Volumen (dm ³)	M ₂ , 1h, 90°C (kg)	M ₂ , 6 días (kg)	M ₂ , 24 h, 90°C (kg)	ρ _{max} (kg/dm ³)
1	0.03294	0.1688	0.33796	0.31783	0.31348	1.6619
2	0.03414	0.1629	0.34652	0.32389	0.31808	1.7425
3	0.03224	0.1664	0.34888	0.32334	0.31204	1.6813

Se obtuvo la media aritmética de las otras tres densidades:

$$\rho_{\max} (\text{Media}) = \frac{1.6619 + 1.7425 + 1.6813}{3} = 1.6952 \text{ kg/dm}^3$$

Por tanto, la densidad máxima de la arena obtenida con el método II será 1.6952 kg/dm³.

Vemos que los dos métodos dan densidades similares 1.64 – 1.69 kg/dm³, con lo cual podemos suponer que los métodos son hasta cierto punto correctos.

4.2.5 Ensayos de permeabilidad

Conviene aclarar, que finalmente no se hará un ensayo de permeabilidad con la arena a máxima densidad debido a las dificultades que supondría conseguir compactar la arena dentro de la célula.

Por tanto, en vez de realizar el análisis de permeabilidad de arenas sueltas y arenas compactadas, se realizarán ensayos de permeabilidad dependiendo de la manera de vertido de la muestra en la célula del permeámetro. Se observarán los resultados procedentes del ensayo de permeabilidad de una arena suelta vertida en seco en la célula, según especifica la norma, y de una arena vertida con la célula saturada de agua.

Antes de empezar a detallar los ensayos de permeabilidad, es imprescindible describir la obtención de material de filtro que debe de estar en la parte superior e inferior de la muestra dentro de la célula para su correcto funcionamiento. Según la norma, la granulometría del material de filtro depende de la muestra a ensayar. El material de filtro deberá tener una curva granulométrica cuatro veces el D_{15} y cuatro veces el D_{85} de la granulometría de la muestra. A título orientativo, para células de 75 mm de diámetro, la altura de filtro será de unos 40 mm.

Si multiplicamos por cuatro el D_{15} de la curva granulométrica nos da un valor aproximado de 0,7 mm. Si multiplicamos por cuatro el D_{85} de la curva granulométrica de la arena nos da un valor aproximado a 1.2 mm.

Para sacar el filtro escogeremos una gravilla contenida en un cubo del laboratorio (Figura 4.19).



Figura 4.19. Material de gravilla del que se obtendrá el filtro.

Haremos un cribado del material contenido en ese cubo utilizando los tamices de 0.63 y 2 mm y colocándolos en el agitador mecánico un tiempo y potencia razonable. La apariencia final del material de filtro se refleja en la Figura 4.20.



Figura 4.20. Material de filtro del permeámetro.

Es preciso eliminar los finos que se han quedado atrapados en el material de filtro durante el cribado. Para ello colocaremos el material de filtro sobre el tamiz de 0.63 mm y verteremos agua para que el polvo contenido se diluya a través del tamiz.

Una vez obtenido el material de filtro podremos comenzar con los ensayos de permeabilidad.

4.2.5.1 Ensayos de permeabilidad de una muestra de arena vertida en seco.

Antes de comenzar con los ensayos se ha medido el diámetro interior de la célula y las distancias, L_1 y L_2 , entre las salidas de los tubos piezométricos a lo largo de una generatriz común.

$$D = 80 \text{ mm}$$

$$L_1 = L_2 = 74 \text{ mm}$$

Estos ensayos se realizarán siguiendo los pasos que se detallan a continuación:

1. Empezamos echando una capa de unos 40 mm del material de filtro por encima de la placa perforada de la base (Figura 4.21).

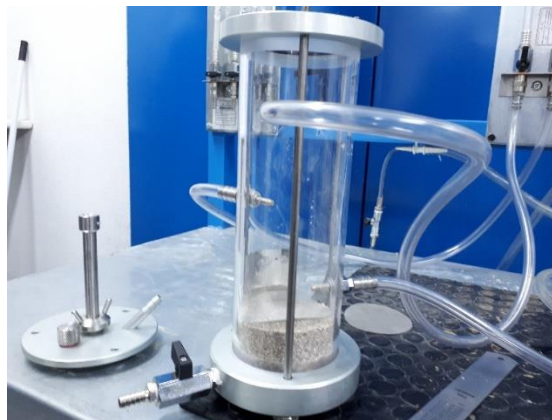


Figura 4.21. Primera capa de material de filtro en el permeámetro.

2. Colocamos la malla de alambre de material poroso (Figura 4.22) por encima de la capa de filtro.

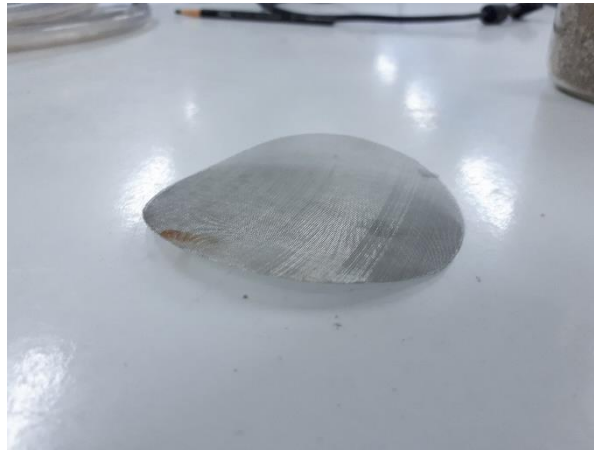


Figura 4.22. Malla de alambre de material poroso.

3. Vertemos la muestra tal y como se refleja en la Figura 4.23.



Figura 4.23. Vertido en seco de la muestra.

4. Una vez vertida la muestra, ponemos la segunda malla de alambre y vertemos la segunda capa de filtro. Después colocamos la cabeza del permeámetro y nos aseguramos de que está bien cerrado y no tiene fugas (Figura 4.24).

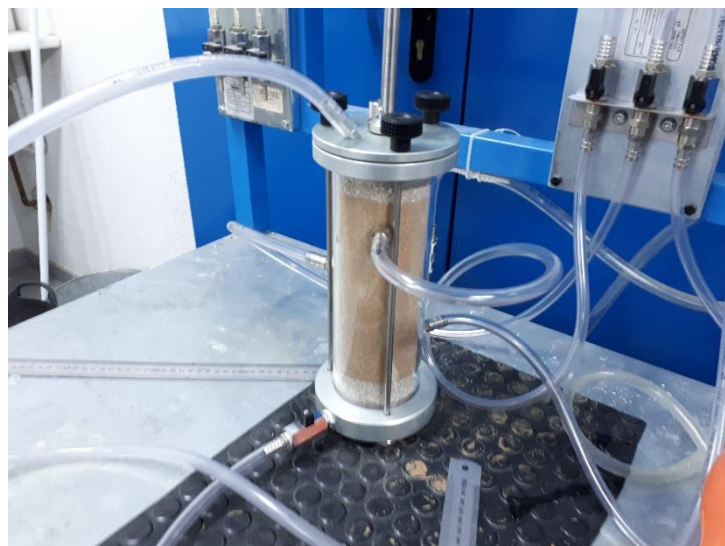


Figura 4.24. Permeámetro con muestra vertida en seco.

Antes de haber echado la muestra al permeámetro se ha tomado la masa inicial contenida en el recipiente que se ha utilizado y la masa sobrante una vez ya vertida la arena, para poder así saber la masa en el interior del permeámetro.

$$M_a = 1.512 \text{ kg}$$

$$M_{\text{SOBRANTE}} = 0.189 \text{ kg}$$

$$M_{\text{PERMEAMETRO}} = 1.512 - 0.189 = 1.323 \text{ kg}$$

También se ha medido la altura L media de la muestra. Se han tomado 3 medidas: $L_1 = 17.9 \text{ cm}$, $L_2 = 17.6 \text{ cm}$ y $L_3 = 17.7 \text{ cm}$. Con lo cual la altura media de la muestra será $L = 17.73$.

Una vez completados estos pasos, ya podemos poner en marcha el permeámetro. Abrimos la llave de suministro de agua al depósito de agua desaireada y el orificio de purga, situado en la cabeza del permeámetro para expulsar el aire. Después abrimos las llaves de los tres tubos piezométricos y la llave situada en la base que libera el paso de agua al depósito de descarga. El sistema necesitará un tiempo para estabilizarse. Una vez que el sistema esté estable empezaremos los ensayos. Se tomarán tres medidas de permeabilidad con el siguiente procedimiento:

- a) Se medirá el caudal que hay en la descarga mediante una probeta milimetrada (Figura 4.25). Para ello mediremos el tiempo que se necesita para llenar 100 o 200 ml de la probeta.



Figura 4.25. Descarga del permeámetro en la probeta.

- b) Se tomarán las medidas de los tres piezómetros y se calculará la diferencia de altura que hay entre el superior y el inferior, $h = h_c - h_a$ (Figura 4.26).

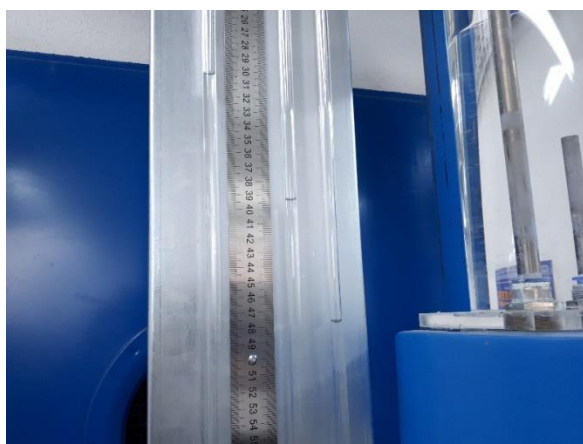


Figura 4.26. Lectura de los piezómetros.

- c) Se calculará el gradiente hidráulico con la siguiente expresión:

$$i = \frac{h}{Z} = \frac{h_c - h_a}{L_1 + L_2}$$

- d) Calcularemos el coeficiente de permeabilidad k mediante la ecuación que se muestra a continuación:

$$k = \frac{q R_t}{i A}$$

Como se mencionaba antes, se han tomado tres medidas siguiendo el procedimiento anterior, que quedan recogidas en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Tabla de medidas del ensayo de permeabilidad.

Ensayo	Vol (ml)	t (s)	ha (cm)	hb (cm)	hc (cm)	L ₁ + L ₂ (cm)	D (mm)
1	200	112	30.7	39.5	48.3	14.8	80
2	200	127	30	39.9	47.8	14.8	80
3	200	130	34.3	42.3	50.3	14.8	80

En la Tabla 4.12 se reflejan los valores de permeabilidad.

Tabla 4.12. Tabla de coeficientes de permeabilidad.

Ensayo	q (ml/s)	hc – ha (cm)	i (gradiente hidráulico)	A (mm ²)	k (m/s)
1	1.7857	17.6	1.19	5026.55	2.9873*10 ⁻⁴
2	1.5748	17.8	1.20	5026.55	2.6050*10 ⁻⁴
3	1.5384	16	1.08	5026.55	2.8312*10 ⁻⁴

A partir de esos valores podemos obtener un coeficiente de permeabilidad medio:

$$k = \frac{(2.9873+2.6050+2.8312)*10^{-4}}{3} = 2.808*10^{-4} \text{ m/s}$$

También se calcularán los parámetros de densidad seca de la muestra y el índice de huecos.

La densidad seca, ρ_d (en Mg/m^3), se calcula con la siguiente fórmula:

$$\rho_d = \frac{4 m}{\pi D^2 L} = \frac{4 * 1.323 * 10^{-3}}{\pi * 0.08^2 * 0.1773}$$

$$\rho_d = 1.4845 \text{ Mg/m}^3$$

El índice de huecos y la porosidad, se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$e = \frac{\rho_s \gamma_w}{\rho_d} - 1 = \frac{2.73 * 1}{1.4845} - 1$$

$$e = 0.84; \quad n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.84}{1+0.84} = 0.45 \rightarrow 45\%$$

Es importante señalar que la muestra, dentro de la célula de permeabilidad, presentaba una grieta (Figura 4.27), por la cual cabía la posibilidad que los resultados saliesen truncados. Debido a esto se volvió a desmontar para proceder al vertido de la arena con la célula saturada.



Figura 4.27. Grieta en la muestra dentro de la célula de permeabilidad.

4.2.5.2 Ensayos de permeabilidad de una arena vertida con la célula saturada de agua.

Este ensayo consistirá en calcular la permeabilidad de una muestra de arena, pero el modo de vertido esta vez se hará con la célula totalmente saturada de agua para facilitar que la caída de los granos de arena sea igual y se sedimenten de forma homogénea.

Los pasos que se seguirán para el llenado de la célula serán los siguientes:

1. Se llena la célula de agua hasta lo más arriba posible.
2. Se vierte la primera capa de material de filtro, con un espesor aproximadamente de 40 mm.
3. Se coloca la malla de alambre de material poroso.
4. Se vierte la muestra de arena hasta la altura a la que se considerara razonable.
5. Se coloca la segunda malla de alambre y se vierte la capa de material de filtro que irá en la parte de arriba.
6. Se coloca la cabeza de la célula, asegurándonos de que no hay fugas de agua en los distintos puntos de ésta.

Antes de haber echado la muestra al permeámetro se ha tomado la masa inicial contenida en el recipiente que se ha utilizado y la masa sobrante una vez ya vertida la arena, para poder así saber la masa en el interior del permeámetro.

$$M_a = 1.594 \text{ kg}$$

$$M_{\text{SOBRANTE}} = 0.196 \text{ kg}$$

$$M_{\text{PERMEAMETRO}} = 1.512 - 0.189 = 1.398 \text{ kg}$$

También se medirá la altura L media de la muestra. Se han tomado 3 medidas: $L_1 = 17.9$ cm, $L_2 = 18$ cm y $L_3 = 17.8$ cm. Con lo cual la altura media de la muestra será $L = 17.9$.

Una vez completados estos pasos, como se especificaba en el procedimiento anterior, ya podemos poner en marcha el permeámetro. Se abre la llave de suministro de agua al depósito de agua desaireada y el orificio de purga, situado en la cabeza del permeámetro para expulsar el aire. Después abrimos las llaves de los tres tubos piezométricos y la llave

situada en la base que libera el paso de agua al depósito de descarga. El sistema necesitará un tiempo para estabilizarse.

En esta ocasión, una vez estabilizado el sistema se observó que los piezómetros no marcaban alturas equidistantes (Figura 4.28). La distancia $h_a - h_b$ era mayor que la distancia $h_b - h_c$. Probablemente esta mayor distancia de $h_a - h_b$ se debió a que el tramo a-b de la muestra estuviera ligeramente más compactada que el tramo b-c, ya que, a mayor diferencia de lecturas de piezómetros, mayor gradiente, y a mayor gradiente menor permeabilidad de la muestra. Esta afirmación se hace en base a la lógica que, si la muestra está más compactada, la porosidad es menor con lo cual la permeabilidad también es menor.



Figura 4.28. Lectura desigual de los piezómetros.

A pesar de este problema, se decidieron realizar los ensayos de permeabilidad de la manera que se explica a continuación. Se calculará el coeficiente de permeabilidad del tramo a-b de la muestra y el tramo b-c de la muestra. Finalmente se calculará, también el coeficiente de permeabilidad de toda la muestra a lo largo de la célula (tramo a-c). Para cada uno de ellos se realizaron tres ensayos.

Tramo a-b

Los resultados vendrán recogidos en las Tablas 4.13 y 4.14.

Tabla 4.13. Tabla de medidas del ensayo de permeabilidad del tramo a-b.

Ensayo	Vol (ml)	t (s)	ha (cm)	hb (cm)	L ₁ (cm)	D (mm)
1	100	45.4	25.5	42	7.4	80
2	100	47.15	25.5	42	7.4	80
3	100	49.63	25.1	42.4	7.4	80

Tabla 4.14. Tabla de coeficientes de permeabilidad del tramo a-b.

Ensayo	q (ml/s)	hb – ha (cm)	i (gradiente hidráulico)	A (mm ²)	k (m/s)
1	2.2026	16.5	2.23	5026.55	1.9650*10 ⁻⁴
2	2.1209	16.5	2.23	5026.55	1.8921*10 ⁻⁴
3	2.0149	17.3	2.33	5026.55	1.7204*10 ⁻⁴

Tramo b-c

Los resultados vendrán recogidos en las Tablas 4.15 y 4.16.

Tabla 4.15. Tabla de medidas del ensayo de permeabilidad del tramo b-c.

Ensayo	Vol (ml)	t (s)	hb (cm)	hc (cm)	L ₂ (cm)	D (mm)
1	100	51.25	42.4	52.6	7.4	80
2	100	46.35	42.4	52.5	7.4	80
3	100	49.63	42.4	52.5	7.4	80

Tabla 4.16. Tabla de coeficientes de permeabilidad del tramo b-c.

Ensayo	q (ml/s)	hc – hb (cm)	i (gradiente hidráulico)	A (mm ²)	k (m/s)
1	1.9512	10.2	1.37	5026.55	2.8334*10 ⁻⁴
2	2.1575	10.1	1.36	5026.55	3.1560*10 ⁻⁴
3	2.0149	10.1	1.36	5026.55	2.9474*10 ⁻⁴

Tramos a-c

Los resultados vendrán recogidos en las Tablas 4.17 y 4.18.

Tabla 4.17. Tabla de medidas del ensayo de permeabilidad del tramo a-c.

Ensayo	Vol (ml)	t (s)	ha (cm)	hc (cm)	L ₁ + L ₂ (cm)	D (mm)
1	100	48.19	25.5	52.6	14.8	80
2	100	49.64	25.3	52.7	14.8	80
3	100	49.28	25.3	52.6	14.8	80

Tabla 4.18. Tabla de coeficientes de permeabilidad del tramo a-c.

Ensayo	q (ml/s)	hc – ha (cm)	i (gradiente hidráulico)	A (mm ²)	k (m/s)
1	2.0751	27.1	1.83	5026.55	2.2559*10 ⁻⁴
2	2.0145	27.4	1.85	5026.55	2.1663*10 ⁻⁴
3	2.0292	27.3	1.84	5026.55	2.1940*10 ⁻⁴

Media de coeficiente de permeabilidad del tramo a-b:

$$k = \frac{(1.9650+1.8921+1.7204)*10^{-4}}{3} = 1.8591*10^{-4} \text{ m/s}$$

Media de coeficiente de permeabilidad del tramo b-c:

$$k = \frac{(2.8334+3.1560+2.9474)*10^{-4}}{3} = 2.9789*10^{-4} \text{ m/s}$$

Media de coeficiente de permeabilidad del tramo a-c:

$$k = \frac{(2.2559+2.1663+2.1940)*10^{-4}}{3} = 2.2054*10^{-4} \text{ m/s}$$

Para obtener un valor representativo del coeficiente de permeabilidad de este ensayo se obtendrá la media aritmética entre los valores de los tramos a-b y b-c, y con el valor resultante se hará la media con el valor del tramo a-c.

$$k = \frac{(1.8591+2.9789)*10^{-4}}{2} = 2.4190*10^{-4} \text{ m/s}$$

$$k = \frac{(2.2054+2.419)*10^{-4}}{2} = 2.3122*10^{-4} \text{ m/s}$$

Igual que en el apartado anterior, se calcularán los parámetros de densidad seca de la muestra y el índice de huecos.

La densidad seca, ρ_d (en Mg/m^3), se calcula con la siguiente fórmula:

$$\rho_d = \frac{4 m}{\pi D^2 L} = \frac{4 * 1.398 * 10^{-3}}{\pi * 0.08^2 * 0.179}$$

$$\rho_d = 1.5538 \text{ Mg/m}^3$$

El índice de huecos y la porosidad se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$e = \frac{\rho_s \gamma_w}{\rho_d} - 1 = \frac{2.73 * 1}{1.5538} - 1$$

$$e = 0.757; \quad n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.757}{1+0.757} = 0.43 \rightarrow 43\%$$

4.3 Discusión de resultados.

Después de realizar todos los ensayos descritos anteriormente es interesante hacer un análisis de los resultados obtenidos en ellos. Para ello se harán comparaciones con datos procedentes de diversos libros del ámbito geotécnico.

Empezaremos por realizar una clasificación de la muestra de arena que hemos utilizado según diversos libros.

Utilizaremos la Tabla 4.19, procedente del libro “*Soil mechanics in engineering practice*”. El tamaño de la muestra de arena utilizada oscila entre 0.6 y 0.2 mm, por tanto, se puede clasificar como una arena media-fina.

Tabla 4.19. Clasificación de suelos según el tamaño de su grano. Fuente: *Soil mechanics in engineering practice*. Terzaghi, 1996.

Soil	Diameter (mm)	Sieve Size*
Boulders	Over 300	12 in.
Cobbles (rounded)	300–75	12 in.–3 in.
Gravel	75–4.76	3 in.–No. 4
Coarse	75–19	3 in.–3/4 in.
Fine	19–4.76	3/4 in.–No. 4
Sand	4.76–0.074	No. 4–No. 200
Coarse	4.76–2.0	No. 4–No. 10
Medium	2.0–0.42	No. 10–No. 40
Fine	0.42–0.074	No. 40–No. 200
Fines	Less than 0.074	No. 200
(Silt size)	0.074–0.002	
(Clay size)	Less than 0.002	

Según la Tabla 4.20, en diversas normas (Normas británicas, AASHTO, etc) la muestra recibe la clasificación de arena.

Tabla 4.20. Definiciones del tamaño de las partículas. Fuente: *Mecánica de suelos*. Berry, 1993.

Descripción de las partículas	Tamaño de las partículas (mm)			
	Normas británicas [†]	AASHTO [‡]	ASTM [§]	Unificado [¶]
Grava	60–2	75–2	> 2	75–4.75
Arena	2–0.06	2–0.05	2–0.075	4.75–0.075
Limo	0.06–0.002	0.05–0.002	0.075–0.005	< 0.075 finos
Arcilla	< 0.002	< 0.002	< 0.005	

Según la Tabla 4.21 procedente de CTE-DB-SE-C, el suelo que se ha utilizado se puede clasificar como una arena media.

Tabla 4.21. Clasificación de suelos. Fuente: Documento Básico SE-C Cimientos, 2008.

Suelos gruesos ⁽¹⁾		
Gravas	Gruesas	20,0-60,0 mm
	Medias	6,0-20,0 mm
	Finas	2,0-6,0 mm
Arenas ⁽²⁾	Gruesas	0,60-2,00 mm
	Medias	0,20-0,60 mm
	Finas	0,06-0,20 mm
Suelos finos		
Limos	Gruesos	0,020-0,060 mm
	Medios	0,006-0,020 mm
	Finos	0,002-0,006 mm
Arcillas ⁽⁴⁾	< 0,002 mm	

Por último, según la Tabla 4.22, la muestra también se clasifica como una arena según su tamaño.

Tabla 4.22. Designación de las partículas según su tamaño. Fuente: Mecánica de suelos. Lambe, Whitman, 2005.

Bloques	> 30 cm
Boleos (bolos)	15 a 30 cm
Grava	2.0 mm (ó 4.76 mm) a 15 cm
Arena	0.06 (ó 0.076 mm) a 2.0 mm (ó 4.76 mm)
Limo	0.002 a 0.06 mm (ó 0.074 mm)
Arcilla	< 0.002 mm

El siguiente parámetro que vamos a analizar será G_s . Nuestra arena tiene un $G_s = 2.73$. Para ello se utilizará a Tabla 4.23, procedente del libro de “Mecánica de suelos”, de Berry.

Tabla 4.23. Valores típicos de la densidad específica de las partículas. Fuente: Mecánica de suelos. Berry, 1993.

Tipo de suelo	G_s
Grava, arena y limo	2.65
Arcilla inorgánica	2.70
Arcilla orgánica	2.60
Turba amorfa	2.00
Turba fibrosa	1.50

El valor de G_s de la arena de ensayo es superior al que marca la tabla ($G_s = 2.65$). Pero eso puede ser debido a la presencia de mayor cantidad de limo que incrementa el resultado.

Los siguientes datos que se analizarán serán los de densidad máxima, mínima e índice de poros según diversas tablas.

Tabla 4.24. Propiedades típicas de algunos suelos naturales. Fuente: Mecánica de suelos. Berry, 1993.

Descripción	Porosidad n (%)	Relación de vacíos e	Contenido de humedad		
			$S_r = 1$ w (%)	Densidad (Mg/m^3)	
				ρ_d	ρ_s
Arena uniforme suelta	46	0.85	32	1.44	1.89
Arena uniforme densa	34	0.51	19	1.75	2.08
Arena bien gradada suelta	40	0.67	25	1.59	1.98
Arena bien gradada densa	30	0.43	16	1.86	2.16
Tilita glacial bien gradada	20	0.25	9	2.11	2.32
Arcilla glacial blanda	55	1.20	45	1.21	1.76
Arcilla glacial dura	37	0.60	22	1.69	2.06
Arcilla ligeramente orgánica blanda	66	1.90	70	0.92	1.57
Arcilla muy orgánica blanda	75	3.00	110	0.68	1.43
Arcilla montmorilonítica blanda (bentonita)	84	5.20	194	0.44	1.28
Turba amorfa	91	10	500	0.18	1.09
Turba fibrosa	94	15	1,000	0.09	1.03

El índice de poros, en los dos ensayos de permeabilidad realizados, tiene un valor de 0.84 y 0.76 respectivamente. Este valor es un valor bastante coherente teniendo en cuenta la Tabla 4.24, que especifica que para arenas uniformes sueltas la relación de vacíos es de 0.85.

En cuanto a la densidad mínima el resultado que nos da es de 1.44615 Mg/m^3 , un valor muy similar al correspondiente a arenas uniforme sueltas de la Tabla 4.24.

El resultado de densidad máxima de nuestra arena oscila entre $1.64 - 1.69 \text{ Mg/m}^3$, es inferior al valor de 1.75 Mg/m^3 que se refleja en la Tabla 4.24 para una arena uniforme densa. Esto significa que, en los ensayos realizados siguiendo los dos métodos, la arena no se compactó de la manera más eficiente.

Por último, se analizarán los resultados de permeabilidad obtenidos en los dos ensayos descritos anteriormente. Según la Tabla 4.25 el coeficiente de permeabilidad de arenas limpias y gravas mixtas oscila entre 10^{-2} y 10^{-4} m/s . El rango de valores del coeficiente

de permeabilidad obtenidos de los dos ensayos es de $2.3 \cdot 10^{-4}$ - $2.8 \cdot 10^{-4}$ m/s, por lo tanto, parece un valor coherente.

Tabla 4.25. Permeabilidad y características de drenaje de los suelos. Fuente: *Soil mechanics in engineering practice. Terzaghi, 1996.*

		Coefficient of Permeability k (m/s)											
		10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Drainage		Good					Poor			Practically Impervious			
Soil types		Clean gravel	Clean sands, clean sand and gravel mixtures			Very fine sands, organic and inorganic silts, mixtures of sand silt and clay, glacial till, stratified clay deposits, etc.			"Impervious" soils, e.g., homogeneous clays below zone of weathering				
						"Impervious" soils modified by effects of vegetation and weathering							

La Tabla 4.26 arroja los siguientes resultados:

Tabla 4.26. Coeficientes de permeabilidad de algunos suelos naturales. Fuente: *Mecánica de suelos. Berry, 1993.*

Tipo de suelo	Coefficiente de permeabilidad (m/s)
Arcilla	$< 10^{-9}$
Arcilla arenosa	10^{-9} a 10^{-8}
Limo	10^{-8} a 10^{-7}
Turba	10^{-9} a 10^{-6}
Arena fina	10^{-6} a 10^{-4}
Arena gruesa	10^{-4} a 10^{-3}
Arena gravosa	10^{-3} a 10^{-2}
Grava	$> 10^{-2}$

De nuevo el valor de los ensayos entra dentro del rango de arena gruesa.

Finalmente se utilizará la fórmula empírica de Hazen que relaciona el coeficiente de permeabilidad con las curvas granulométricas, descrita en el apartado 2.5:

$$k = C_H * D_{10}^2$$

donde:

k es la permeabilidad expresada en cm/s

C_H es el coeficiente empírico de Hazen (generalmente $C_H = 100$)

D_{10} es el tamaño de la partícula para el cual el 10% es más fino en cm.

Se calculará a partir de las dos curvas granulométricas.

Curva granulométrica 1:

$$k = 100 * 0.0175^2 = 3.062 * 10^{-2} \text{ cm/s} = 3.062 * 10^{-4} \text{ m/s}$$

Curva granulométrica 2:

$$k = 100 * 0.019^2 = 3.610 * 10^{-2} \text{ cm/s} = 3.610 * 10^{-4} \text{ m/s}$$

Vemos que el coeficiente de permeabilidad obtenido por la formula empírica de Hazen sale ligeramente superior, pero, aun así, como valor orientativo nos indica que las medidas obtenidas de los ensayos de permeabilidad en el laboratorio no están tan lejos de la realidad.

5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Se ha escogido una muestra de arena en uno de los capazos del laboratorio. Se ha realizado un cribado inicial de la muestra para intentar limitar al máximo su tamaño de grano entre 0.6 y 0.2 mm, tal y como indica el código técnico DB-SE-C de cimientos, para poder obtener una arena media. Se ha sacado las curvas granulométricas de dos muestras procedentes de esa arena ya cribada, mediante tamizado. Los resultados han dado que la mayor parte de los granos era de un tamaño de entre 0.2 y 0.3 mm.

Posteriormente se han realizado diversos ensayos en el laboratorio para obtener los parámetros físicos del suelo de densidad mínima seca, densidad máxima de la arena, densidad relativa de las partículas, y porosidad. Hay que señalar que la densidad máxima no se pudo calcular conforme a la norma debido a la ausencia de una maza con un pistón de 4.54 kg en el laboratorio. Los valores medios de estos parámetros se reflejan a continuación:

- Densidad relativa de las partículas sólidas (Gs): 2.73
- Densidad mínima: 1.44615 kg/dm³
- Densidad máxima obtenida por el método I: 1.643 kg/dm³
- Densidad máxima obtenida por el método II: 1.6952 kg/dm³

El objetivo inicial del proyecto era comprar los diferentes valores de permeabilidad que salían a partir de una muestra de arena compactada dentro de la célula, con los valores de permeabilidad con una muestra de arena suelta. Finalmente debido a la dificultad que suponía compactar la arena dentro de la célula se cambió el objetivo a perseguir. Se decidió comparar los valores resultantes de un vertido en seco de arena a la célula con un vertido de la arena con la célula de permeabilidad saturada.

Cuando se vertió la arena en seco, al poner en marcha el permeámetro apareció una grieta dentro de la muestra una vez saturada la célula. A pesar de ello se tomaron los resultados y el coeficiente de permeabilidad medio fue $k = 2.808 \cdot 10^{-4}$ m/s. El índice de poros es $e = 0.84$ y la porosidad es $n = 0.45$ (45%).

Cuando se vertió la arena con la célula saturada de agua, surgió el inconveniente de que las lecturas de los piezómetros no eran equidistantes. La distancia entre los piezómetros h_a y h_b era superior a la distancia de los piezómetros h_b y h_c . Eso se debía a que la muestra no estaba compactada de manera homogénea. Se decidió tomar las medidas de k

(coeficiente de permeabilidad) en el tramo a-b y en el tramo b-c para después realizar una medida completa del tramo a-c. los resultados que se obtuvieron se recogen a continuación:

- Tramo a-b: $k = 1.8591 \cdot 10^{-4}$ m/s
- Tramo b-c: $k = 2.9789 \cdot 10^{-4}$ m/s
- Tramo a-c: $k = 2.2054 \cdot 10^{-4}$ m/s

El índice de poros es $e = 0.757$ y la porosidad es $n = 0.43$ (43%).

Efectivamente se observa que la permeabilidad del tramo a-b es inferior a la permeabilidad del tramo b-c debido a su mayor compactación. También se observa que una arena con mayor índice de poros arroja valores de permeabilidad mayores.

Para concluir, es importante señalar que a pesar de los varios inconvenientes surgidos en los ensayos realizados en el laboratorio los resultados obtenidos son satisfactorios y más que dar un valor exacto reflejan valores representativos, de acuerdo con las comparaciones hechas con datos obtenidos en la bibliografía.

6. REFERENCIAS

- GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis Ignacio. *Ingeniería geológica*. Mercedes Ferrer, Luis Ortuño, Carlos Oteo. Pearson Educación, Madrid, 2002. ISBN: 84-205-3104-9.
- BERRY, Peter L., REID, David. *Mecánica de suelos*. Editado por Martha Edna Suárez R. *McGraw Hill*: Santafé de Bogotá, 1993. Traducido de la primera edición en inglés de *An introduction to soil mechanics*. ISBN: 958-600-172-5.
- TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons Inc. New York, 1996. ISBN 0-471-08658-4.
- LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. *Mecánica de suelos*. Editorial Limusa, S.A, de C V. México, 2005. Traducido de la versión en inglés: *Soil Mechanics*. ISBN 968-18-1894-6.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. *Preparación de muestras para ensayos de suelos*, UNE 103 100. Madrid, España, 1995.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. *Análisis granulométrico de suelos por tamizado*, UNE 103 101. Madrid, España, 1995.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. *Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo*, UNE 103-302-94. Madrid, España, 1994.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. *Determinación de la densidad mínima de una arena*, UNE 103-105-93. Madrid, España, 1993.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. *Determinación de la densidad máxima de una arena por el método del apisonado*, UNE 103-106-93. Madrid, España, 1993.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. *Determinación de la permeabilidad de una muestra de suelo con carga constante*, UNE 103 403. Madrid, España, 1999.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. *Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad*, UNE-EN 1097-3. Madrid, España, 1999.
- Código Técnico de la Edificación (CTE) Documento Básico de seguridad estructural de cimientos, CTE-DB-SE-C.