

Comparativa entre permeabilidades de arenas  
preparadas con diferentes densidades  
mediante el permeámetro de carga  
constante.

Alumno: ABEL GARCÍA ALARCÓN  
Director: IVAN ALHAMA MANTECA  
Codirector: GONZALO GARCÍA ROS



## Agradecimientos

Quiero dar las gracias a mi familia que siempre me han ayudado a lo largo de mi vida. A ti Ángela por estar en los buenos y no tan buenos momentos. A mis amigos y compañeros de grado que me han servido de gran apoyo durante estos cuatro años.

Agradecer al director de este trabajo, Iván Alhama Manteca, por darme la oportunidad de realizar este proyecto y prestarse en todo momento a ofrecerme su ayuda, también agradecer a Gonzalo García Ros, codirector de este trabajo, que siempre se ha mostrado disponible a ofrecer su ayuda y por último agradecer a Calixto, técnico del laboratorio de geotecnia, por su ayuda ofrecida durante los ensayos de laboratorio.



# Índice

1	Introducción .....	9
1.1	Resumen.....	9
1.2	Objetivos y alcance .....	9
2	Fundamentos teóricos .....	10
2.1	La ley de Darcy .....	10
2.2	Porosidad, permeabilidad hidráulica y permeabilidad intrínseca.....	12
2.3	El ensayo de permeabilidad bajo carga constante. La norma UNE 103-403:1999. ....	14
2.3.1	Preparación de la muestra .....	17
2.4	Otros ensayos necesarios para el desarrollo del trabajo. ....	21
2.4.1	Análisis granulométrico .....	22
2.4.2	Densidad relativa de las partículas .....	23
2.4.3	Densidad mínima de una arena .....	24
2.4.4	Densidad máxima de una arena.....	25
2.5	Correlación entre los distintos parámetros medidos en laboratorio .....	25
3	Metodología de trabajo .....	27
3.1	Selección de la muestra .....	29
3.2	Ensayos previos.....	29
3.2.1	Curva granulométrica.....	29
3.2.2	Densidad relativa de las partículas, Gs.....	31
3.2.3	Densidad mínima de la arena. ....	33
3.2.4	Densidad máxima de la arena.....	35
3.3	Montaje del permeámetro.....	38
4	Realización del ensayo de permeabilidad .....	42
4.1	Ensayo de permeabilidad para una arena con densidad máxima .....	42
4.2	Ensayo de permeabilidad para una arena con densidad mínima .....	51
5	Discusión de resultados.....	53
6	Conclusiones y comentarios finales.....	63
7	Referencias.....	67



## Índice de figuras

Figura 1. Experiencia de Darcy. ....	11
Figura 2. Régimen del flujo. ....	12
Figura 3. Sección de una célula típica de permeabilidad. ....	16
Figura 4. Montaje general del ensayo de permeabilidad de carga constante con flujo descendente. ....	17
Figura 5. Vertido en seco de la muestra. ....	18
Figura 6. Vertido con arena saturada. ....	19
Figura 7. Factor de corrección por temperatura. ....	21
Figura 8. Gráfica semilogarítmica. ....	23
Figura 9. Valores del coeficiente de la fórmula de Slichter. ....	26
Figura 10. Muestra de arena en laboratorio. ....	27
Figura 11. Permeámetros de carga constante del laboratorio de geotecnia. ....	28
Figura 12. Plumas de sifonamiento. ....	28
Figura 13. Elementos volátiles en la arena. ....	29
Figura 14. Tamices con muestra en el vibrador. ....	30
Figura 15. Curva granulométrica de la muestra. ....	31
Figura 16. Cribado de la muestra. ....	31
Figura 17. Picnómetro lleno hasta línea de enrase con cuello. ....	32
Figura 18. Picnómetros con muestra llenados a mitad. ....	32
Figura 19. Medidas y masa del molde cilíndrico vacío. ....	34
Figura 20. Moldes llenos y enrasados. ....	34
Figura 21. Compactación mediante vibrador de la muestra. ....	36
Figura 22. Tongada compactada junto con maza. ....	37
Figura 23. Hongos de la muestra anterior. ....	38
Figura 24. Conexiones con cal. ....	39
Figura 25. Despiece de la célula de permeabilidad. ....	39
Figura 26. Depósito de agua desaireada. ....	40
Figura 27. Llave de cierre con adaptadores a tubos flexibles. ....	40
Figura 28. T con adaptadores a tubería flexible. ....	41
Figura 29. Depósito de agua desairada a distintas alturas junto con conexiones. ....	41
Figura 30. Prueba de estanqueidad. ....	42
Figura 31. Cribado de grava para filtro. ....	43
Figura 32. Ficha técnica permeámetro de carga constante Matest. ....	43
Figura 33. Filtro de malla metálica tras filtro de arena. ....	44
Figura 34. Vertido de la muestra por tongadas. ....	44

Figura 35. Vibrado de las tongadas. ....	45
Figura 36. Célula completa vibrada.....	45
Figura 37. Burbujas en el tubo piezométrico. ....	46
Figura 38. Elevado gradiente hidráulico.....	47
Figura 39. Gradiente hidráulico final. ....	47
Figura 40. Probeta usada en el ensayo de permeabilidad. ....	48
Figura 41. Medida de los tubos piezométricos. ....	49
Figura 42. Permeámetro con muestra de arena suelta. ....	51
Figura 43. Finos en las tuberías flexibles. ....	52
Figura 44. Curvas granulométricas para distintos materiales.....	55
Figura 45. Gráfica permeabilidad frente a densidad aparente.....	65
Figura 46. Grafica permeabilidad frente a índice de huecos. ....	65
Figura 47. Gráfica permeabilidad frente a porosidad.....	66



## Índice de tablas

Tabla 1. Tabla de resultados del análisis granulométrico.....	22
Tabla 2. Masas resultado de análisis granulométrico.....	30
Tabla 3. Resultado tras tamizado análisis granulométrico .....	30
Tabla 4. Resultados ensayo densidad relativa de las partículas, Gs.....	33
Tabla 5. Resultados obtenidos de un ensayo Gs anterior. ....	33
Tabla 6. Resultados ensayo de densidad mínima de la arena. ....	35
Tabla 7. Resultados obtenidos de un ensayo anterior de densidad mínima de la arena .....	35
Tabla 8. Resultados ensayo de densidad máxima de una arena. Método I.....	36
Tabla 9. Resultados ensayo de densidad máxima de una arena. Método II.....	38
Tabla 10. Medidas del ensayo de permeabilidad de una arena densa.....	49
Tabla 11. Resultados ensayo de permeabilidad de una arena densa. ....	50
Tabla 12. Medidas del ensayo de permeabilidad de una arena suelta. ....	52
Tabla 13. Resultados obtenidos del ensayo de permeabilidad de una arena suelta. ..	52
Tabla 14. Clasificación del suelo en función del tamaño de grano. ....	54
Tabla 15. Clasificación del suelo en función del tamaño de grano. ....	54
Tabla 16. Clasificación del suelo para diferentes normas en función del tamaño de grano. ....	54
Tabla 17. Clasificación de suelos. ....	55
Tabla 18. Valores típicos de la densidad específica de las partículas. ....	56
Tabla 19. Propiedades típicas de algunos suelos naturales.....	56
Tabla 20. Permeabilidad y drenaje de los suelos.. ....	57
Tabla 21. Grado de permeabilidad.....	58
Tabla 22. Clasificación del tipo de suelo en función del grado de permeabilidad. ....	58
Tabla 23. Clasificación del tipo de suelo en función del grado de permeabilidad .....	58
Tabla 24. Clasificación del tipo de suelo en función del grado de permeabilidad. ....	59
Tabla 25. Permeabilidades teóricas, obtenidas y % de error.....	62



# 1 Introducción

## 1.1 Resumen

En su trabajo práctico el ingeniero civil ha de enfrentarse con distintos e importantes problemas planteados por el terreno. La geotecnia, y en concreto los estudios geotécnicos, presentan una importancia esencial en el ámbito de la Ingeniería Civil, ya que gracias a estos podemos obtener diferentes características y parámetros del terreno que resolverán estos problemas planteados por el terreno donde se asentarán nuestras construcciones.

En este trabajo nos centramos en analizar la permeabilidad de varias muestras de arenas preparadas y analizadas de diferentes formas. Para la determinación del coeficiente de permeabilidad existen diferentes métodos; los ensayos de laboratorio, los efectuados en el lugar y los métodos empíricos, donde el valor del coeficiente de permeabilidad ( $K$ ) es obtenido indirectamente a través de relaciones empíricas con otras propiedades de los suelos.

La primera forma que usaremos en nuestro trabajo, es con ensayos en laboratorio mediante el uso de los permeámetros de carga constante que nos dará un coeficiente de permeabilidad ( $K$ ). La segunda, es mediante el uso de fórmulas empíricas propuestas por varios autores como pueden ser Hazen, Slichter, Terzaghi y Kozeny, que nos permiten obtener valores del coeficiente de permeabilidad ( $K$ ).

A raíz de la necesidad de usar los permeámetros de carga constante que se encuentran en el laboratorio de geotecnia de la Universidad Politécnica de Cartagena en este trabajo además, se detalla el montaje de uno de los aparatos, el cual se encontraba montado de forma incorrecta, produciendo errores en las medidas. Además se ha colocado un nuevo depósito de descarga de agua a nivel constante regulable en altura. Todas estas modificaciones se han hecho ajustándonos a la normativa vigente de ensayos de permeabilidad de carga constante española, la norma UNE 103-403:1999.

## 1.2 Objetivos y alcance

En el desarrollo de este proyecto se fija como principal objetivo la obtención de diferentes permeabilidades que permitan la comparativa de arenas preparadas con diferentes densidades mediante los dos permeámetros de carga constante disponibles en el laboratorio de geotecnia de la Escuela de Caminos y Minas de la UPCT.

Para ello se fijaron otros objetivos secundarios como son, la caracterización de la muestra que se encontraba en el laboratorio mediante diversos ensayos como son el de análisis granulométrico, peso específico relativo ( $G_s$ ) y porosidad, la preparación de muestras de densidad máxima y por último el desmontaje, limpieza, reposición de piezas, colocación de nuevas piezas para la descarga y puesta a punto del permeámetro de carga constante.

## 2 Fundamentos teóricos

### 2.1 La ley de Darcy

Fue enunciada por su autor en el año 1856, después de diversos trabajos y experimentaciones, para obtener una relación fundamental de la cantidad de caudal  $Q$  que es capaz de atravesar un medio permeable, teniendo en cuenta que el caudal es proporcional al área de paso del medio permeable  $A$ , normal al flujo, y al gradiente piezométrico entre el nivel de entrada y el de salida del flujo en el medio permeable,  $i$ .

La constante de proporcionalidad,  $k$ , es la permeabilidad del medio, en las que se incluyen las características del fluido, por lo tanto, es la permeabilidad efectiva, también conocida como conductividad de Darcy o conductividad hidráulica. Por consiguiente y con carácter global, la cantidad de caudal queda:

$$Q = k \cdot A \cdot i$$

Donde:  $Q$  = cantidad de caudal de paso  
 $k$  = conductividad de Darcy  
 $A$  = área de paso del medio permeable  
 $i$  = gradiente piezométrico.

Como sabemos, el gradiente de un escalar es un vector, dado por su módulo, dirección y sentido. El módulo es la derivada de dirección 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.

El flujo se mueve de zonas de mayor a menor nivel piezométrico, que es en este caso la función escalar, tanto el flujo como el gradiente tienen direcciones distintas, que justifica el signo negativo de la ecuación de Darcy.

Denominando  $h$  al nivel piezométrico y  $x$  al espacio en el sentido del flujo, la ecuación anterior puede expresarse en forma diferencial, considerando la variación de niveles piezométricos a lo largo del recorrido del flujo por el medio permeable. De esta forma la ecuación quedaría:

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{dh}{dx}$$

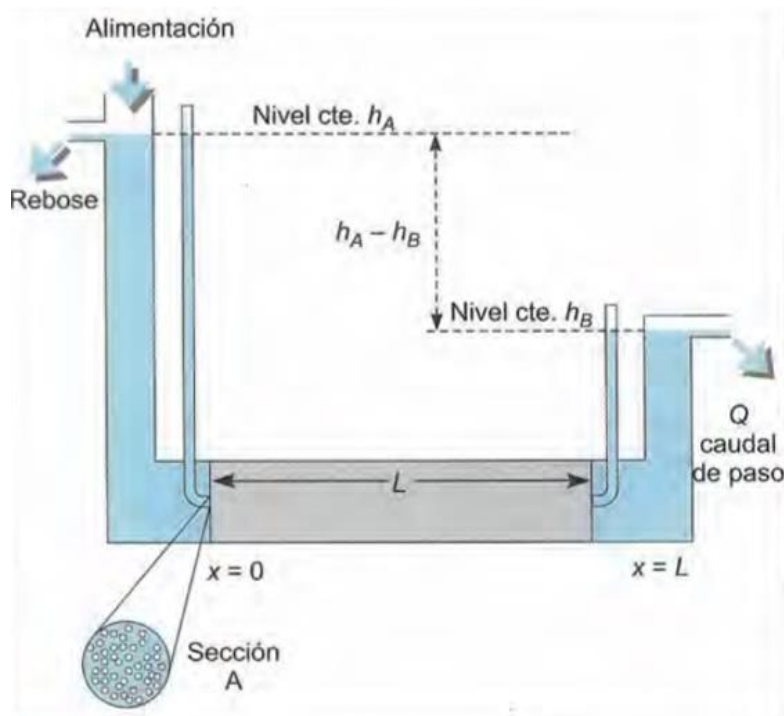


Figura 1. Experiencia de Darcy. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo, 2002.

En el caso de la Figura 1, la prueba mantiene constantes los niveles de  $h_A$  y  $h_B$ , por lo que al ser además constantes  $k$  y  $A$  para todo el medio permeable se establece la forma más sencilla de Darcy:

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

La ley de Darcy es únicamente válida para el caso en el que el régimen sea laminar, como descubrió Muskat en 1937. Para evaluar si el régimen es realmente laminar tenemos que acudir al número de Reynolds, que representa la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas en el seno de un fluido:

$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}$$

Donde:

$\rho$  = densidad del fluido

$v$  = velocidad del fluido

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

$\mu$  = viscosidad dinámica

Pese a que el número de Reynolds es adimensional, debemos usar para su cálculo unidades homogéneas como las que hemos puesto anteriormente para obtener un resultado adecuado.

Un valor del número de Reynolds comprendido entre 1 y 10 expresa un régimen laminar en el que podemos aplicar la ley de Darcy, aunque esta sea especialmente fiable para valores del número de Reynolds inferiores a 4. Para valores de 60 a 180, el régimen es turbulento pudiendo considerarse los valores intermedios como cuasi-turbulento. Para cualquiera de estos últimos valores la ley de Darcy no se cumpliría. En la Figura 2 quedan recogidos los regímenes del flujo en función del número de Reynolds.

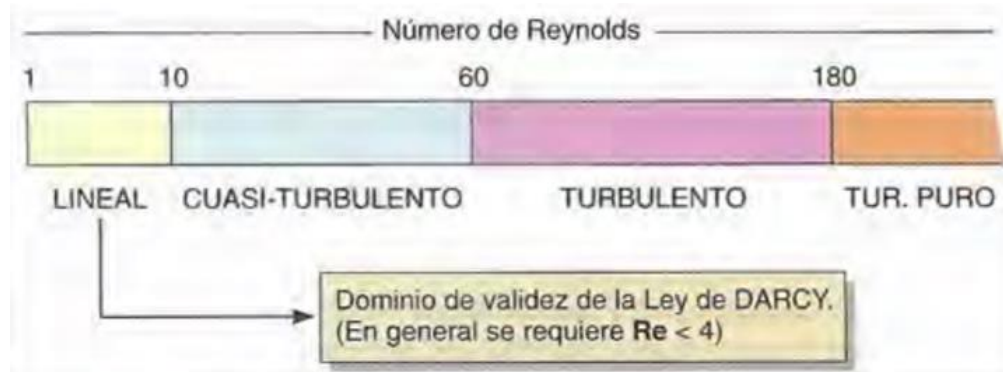


Figura 2. Régimen del flujo. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo, 2002.

## 2.2 Porosidad, permeabilidad hidráulica y permeabilidad intrínseca.

La porosidad se define como la relación entre el volumen de huecos y el volumen total de una roca. Es un parámetro adimensional y depende exclusivamente 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.

Dependiendo del 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 la misma 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:

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

El segundo concepto es la porosidad eficaz,  $n_e$ , también conocida como porosidad cinemática, referida al volumen de poros conectados, lo que facilita el transporte de fluido, quedando ligada no solo a la textura de la formación, sino también a las características del fluido obteniendo la siguiente expresión:

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

Por último, destacar que la porosidad real es la de interés en los estudios de ingeniería y es la que poseen las formaciones en su estado natural. Por lo tanto, las medidas obtenidas por muestras descomprimidas suelen dar valores mucho más elevados que las medidas in situ para la misma formación.

Cualquier masa de suelo está compuesta por partículas sólidas de varios tamaños con espacios huecos interconectados. Los espacios vacíos continuos permiten que el agua fluya desde un punto de mayor energía a un punto de menor energía. La permeabilidad se define como el parámetro de un suelo que permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación en función de la textura del mismo, sin relacionarla con su estructura o forma geométrica.

Dentro de este concepto se pueden definir otros dos:

- Permeabilidad efectiva o conductividad hidráulica, representada por el coeficiente de permeabilidad  $k$ , está ligada tanto a las características texturales tanto del medio físico como del fluido que transmite.
- Permeabilidad intrínseca,  $K$ , solamente depende de las características internas del medio permeable.

Por razones de su definición (caudal por unidad de superficie), las unidades de la permeabilidad efectiva pueden ser tanto cm/s como m/día, siendo la primera de estas la más utilizada en el ámbito de ingeniería en el que nos encontramos.

La permeabilidad efectiva o conductividad hidráulica y la permeabilidad intrínseca se relacionan únicamente por los parámetros que son capaces de definir las características del fluido.

$$k = K \cdot \frac{\gamma_w}{\mu} \quad \text{o bien} \quad k = K \cdot \frac{g}{\eta}$$

Donde:

- $k$  = permeabilidad efectiva
- $K$  = permeabilidad intrínseca
- $\gamma_w$  = peso específico del agua
- $\mu$  = viscosidad dinámica del fluido
- $g$  = aceleración de la gravedad

Ninguna relación ha sido capaz, con carácter generalista, de definir la permeabilidad intrínseca en función del medio, a pesar de grandes esfuerzos que se han realizado por diversos investigadores.

En cualquier caso, no influye únicamente el tamaño de las partículas que conforma el medio, sino también su forma y superficie, no admitiendo generalización en estas dos últimas características.

Varios autores relacionados con esta temática han establecido las siguientes relaciones:

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

Slichter	$K = c \cdot m^n \cdot d_e^2$
Terzaghi	$K = \lambda \cdot \left( \frac{m-0,13}{(1-m)^{1/3}} \right)^2 \cdot d_e^2$
Kozeny	$K = c \cdot \left( \frac{V}{S} \right)^2 \cdot \frac{m^3}{(1-m)^2} \cdot g$

Donde la variable  $d_e$  es el denominado diámetro eficaz que para el caso más habitual es el valor de  $d_{10}$  de la curva granulométrica de la muestra, es decir, es el tamaño de abertura de tamiz que permite el paso del 10% en peso de la muestra del material granular usado.

El resto de parámetros  $c$ ,  $m$ ,  $n$  y  $\lambda$  dependen de las características geométricas y de fricción de los granos, pudiendo por eso admitirse que para cualquier caso:

$$K = cte \cdot d_e^2 \text{ y que por lo tanto: } K = cte \cdot d_{10}^2$$

Estas expresiones serán válidas siempre que sea un mismo fluido a una misma temperatura.

Al contrario que ocurre con la porosidad, la permeabilidad, sí depende del tamaño del grano, ya que como hemos podido observar el valor  $d_{10}$  condiciona de forma directa el valor de la permeabilidad.

### 2.3 El ensayo de permeabilidad bajo carga constante. La norma UNE 103-403:1999.

La permeabilidad de un suelo puede obtenerse tanto en laboratorio como en el terreno, pero las medidas en el laboratorio son mucho más fáciles de realizar que las in situ. Sin embargo debido a que la permeabilidad depende en gran medida de la estructura del suelo y debido a la dificultad de obtener muestras representativas para analizar en laboratorio, suelen ser necesarias las determinaciones in situ de la permeabilidad.

Entre los métodos más usados en laboratorio para determinar la permeabilidad de una muestra se encuentran:

- El permeámetro de carga variable.
- El permeámetro de carga constante.
- La medida directa o indirecta mediante una prueba edométrica.

El método de carga constante es el más utilizado puesto que es válido para todo tipo de suelos. Los otros dos métodos presentan diferentes limitaciones, como son en el caso del permeámetro de carga variable, la variación del grado de saturación de la muestra durante el ensayo limita este ensayo a muestras saturadas, perdiendo precisión en los resultados, unido a que solo es válido para suelos permeables. En el caso de las pruebas edométricas, estas se suelen hacer a suelos plásticos, lo que limita la determinación de la permeabilidad únicamente a suelos de permeabilidad baja, por ejemplo limos o arcillas.



Por lo tanto, el objetivo del ensayo de permeabilidad mediante el permeámetro de carga constante es la determinación de un coeficiente de permeabilidad de una muestra expresada en unidades de velocidad, en el cual el flujo de agua que se realiza de forma vertical a través de una probeta es laminar.

Este ensayo es adecuado para suelos que presentan una permeabilidad comprendida entre  $10^{-2}$  m/s y  $10^{-5}$  m/s, además de que no contentan más de un 10% de material que pase por el tamiz de diámetro de abertura  $80\mu\text{m}$ .

En cuanto al permeámetro, este consta de varios componentes, como son:

- Una célula cilíndrica de permeabilidad, preferentemente de material plástico transparente aunque puede ser también metálica, con dos tapas estancas de metal inoxidable. El diámetro interior del cuerpo de la célula debe ser como mínimo 12 veces el tamaño máximo de partícula del material a ensayar. Por lo general, las células más usadas tiene 75 mm o 100 mm de diámetro interior, aunque existen de tamaños mayores.

La célula además debe incluir:

- Base y cabeza que se ajusten bien al cuerpo mediante tornillos para que no existan fugas en estos puntos.
- Un pistón que atraviese el cuerpo de la célula y que deberá de contener un bloqueo vertical además de una placa perforada en su extremo inferior. Estos orificios deben de tener una cantidad y diámetro adecuado que permita la circulación del flujo pero que no afecte a la permeabilidad. Además de la placa en el extremo del pistón se colocara otra similar en la base del cuerpo.
- Dos orificios, uno en la parte de base y otro en la de cabeza que permitan la apertura y cierre cuando se crea conveniente.
- Un cuerpo como anteriormente se ha comentado, que contenga tres orificios conectados a los tubos piezométricos y repartidos a lo largo de la generatriz. Se debe prestar especial atención a la distancia a la que se encuentren estos orificios de las placas perforadas, ya que esta distancia no debe ser nunca menor al radio interior de la célula.
- Dos discos de material poroso o de malla de alambre de diámetro poco menor el de la célula, estos discos deberán tener una permeabilidad mayor que la de la muestra a ensayar, pero sus aberturas serán lo suficientemente pequeñas para evitar el paso de partículas para así mantener la densidad y el volumen durante la saturación de la muestra. Entre las placas perforadas comentadas en el anterior punto y los discos poros se coloca un material de filtro de granulometría adecuada seleccionada dependiendo de la muestra a ensayar. El material de filtro tendrá en todos los casos una curva granulométrica entre cuatro veces el  $D_{15}$  y cuatro veces el  $D_{85}$  de la granulometría de la muestra, además de estar bien graduada.

La Figura 3, podemos ver todas las partes explicadas de la célula de permeabilidad.

- Un depósito que permita la entrada de agua desaireada y limpia, además de que tenga altura regulable y que sea capaz de suministrar el agua de forma constante a la célula. Este depósito debe contar con un orificio en la parte superior y tres en la inferior, estas tres últimas son las encargadas de: mantener y fijar el nivel la primera, permitir la entrada de agua desaireada la segunda y de abastecer a la célula la tercera.
- Tres tubos piezométricos montados en un tablero con escalas graduadas situados sus partes más bajas junto a la base de la célula y su parte superior al nivel del depósito de agua de nivel constante. Estos tubos deben ser vidrio o plástico transparente que permitan la percepción visual de forma adecuada así como tener el mismo diámetro interior.
- Tuberías flexibles de plástico o silicona que sirven de conexión entre los depósitos, tubos piezométricos y la célula. Además todos estos tubos deben de llevar sus correspondientes llaves de paso.

La Figura 4, nos muestra todas las partes que han sido detallas anteriormente de las que consta el ensayo de permeabilidad mediante el uso del permeámetro de carga constante.

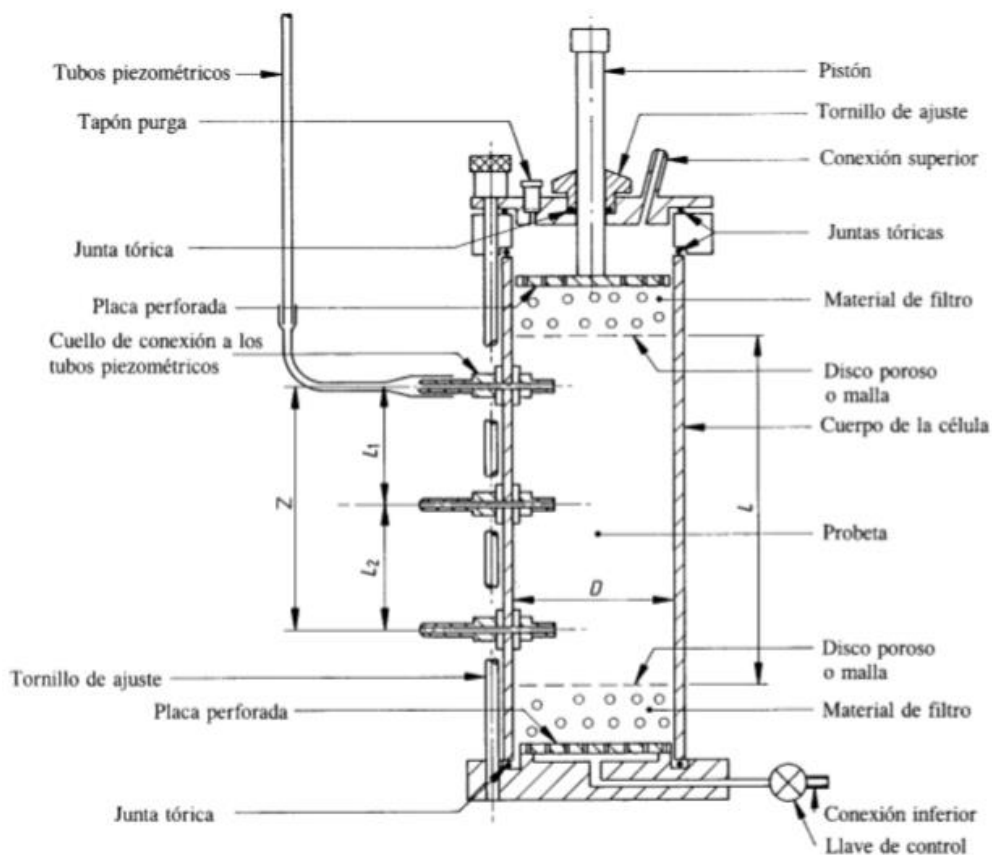


Figura 3. Sección de una célula típica de permeabilidad. Fuente: UNE 103403

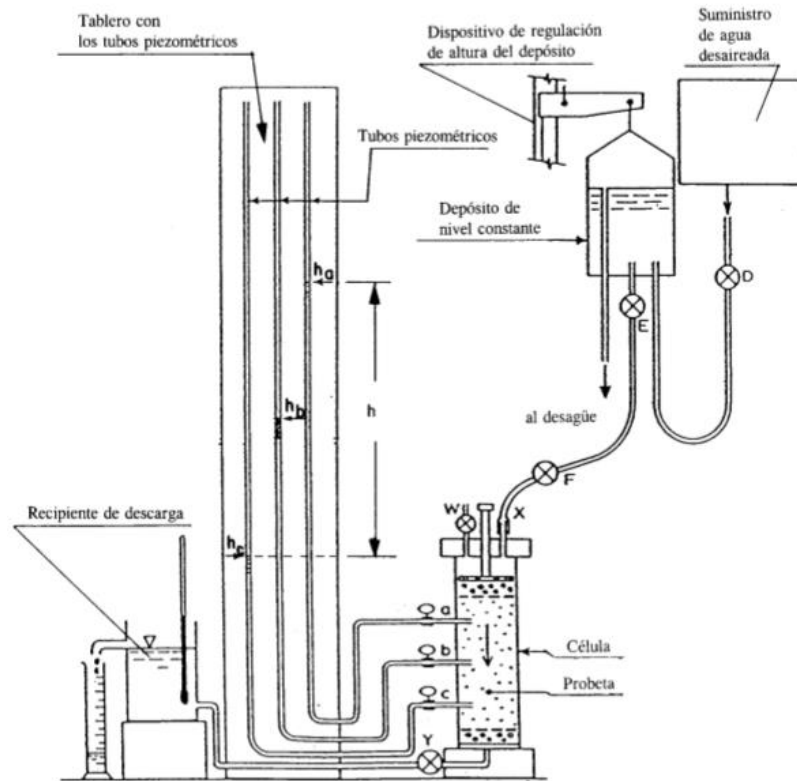


Figura 4. Montaje general del ensayo de permeabilidad de carga constante con flujo descendente. Fuente: UNE 103403

### 2.3.1 Preparación de la muestra

De la muestra recibida en el laboratorio se debe de tomar una cantidad suficiente y seca al aire (para una célula de diámetro 75 mm son necesarios unos 3.5 kg y para la de diámetro 100 mm unos 8 kg). Se toman dos porciones de muestra para determinar la humedad ( $W$ ) y la densidad relativa de las partículas ( $G_s$ ) mediante las normas UNE 103-300 y UNE 103-302 respectivamente. Se miden en primer lugar el diámetro interior de la célula del permeámetro a varias alturas y se toma el diámetro medio, y a continuación las distancias entre las salidas de los tubos piezométricos  $L_1$  y  $L_2$  como indica la Figura 3. Posteriormente se monta la célula de permeabilidad con la base, la placa perforada y el cuerpo cilíndrico. Sobre la placa perforada, se vierte el material de filtro adecuado que para células de diámetro 75 mm tendrá un espesor de unos 40 mm y se nivela la parte superior en la que se coloca un disco poroso o de malla de alambre.

Para la compactación y colocación de la muestra en la célula se debe seguir uno de los tres procedimientos detallados a continuación:

- Por compactación ligera a una humedad determinada

Se calcula el volumen de agua necesario para conseguir la humedad deseada mediante la expresión:

$$\text{Volumen de agua} = \frac{(w_1 - w)}{100 + w} \cdot m_a$$

Donde:  $w_1$  es el contenido de humedad buscado en %  
 $w$  es el contenido de humedad de la muestra secada al aire en %  
 $m_a$  es la masa de muestra secada al aire

Se compacta la muestra en la célula mediante seis capas aproximadamente del mismo espesor. Sobre cada capa se aplicaran unos golpes mediante una varilla con ensanchamiento distribuidos sobre la superficie y se procede a verter la siguiente capa. La última capa debe de quedar a una altura que permita la colocación del material de filtro y de la placa superior de la célula. La masa sobrante  $m_2$  se seca en una estufa hasta obtener una masa,  $m_3$ .

- Vertido en seco de la muestra

Una vez preparada la base, el plato, el material de filtro y el disco poroso, se vierte la muestra secada al aire en la célula de permeabilidad con ayuda de un embudo con un tubo flexible como se indica en la Figura 5. Se debe de mantener una pequeña distancia entre el extremo del tubo flexible y la superficie de la muestra al tiempo que se hace un movimiento en espiral. Una vez llena la célula se obtiene la masa de material sobrante secado en estufa,  $m_3$ .

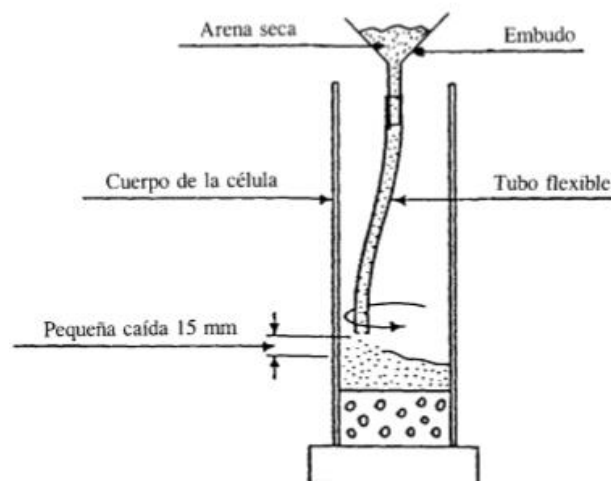


Figura 5. Vertido en seco de la muestra. Fuente: UNE 103403

- Vertido de la muestra saturada

Una vez montada la base, el plato, el material de filtro y el disco poroso, se conecta el suministro de agua desaireada a la base de la célula del permeámetro y se abren las

llaves y se deja que el agua entre en la célula hasta una altura de aproximadamente unos 20 mm sobre el disco poroso. A continuación se vierte un poco de agua desaireada en el embudo con el tapón cerrado y parte de muestra. El embudo se debe sostener de manera que el extremo del tubo flexible se mantenga unos 15 mm sobre la superficie del material ya vertido. Por último se abre el tapón y se deja caer la muestra saturada en el cuerpo de la célula. Este proceso se repite hasta alcanzar la altura deseada obteniéndose una muestra saturada de suelo con densidad uniforme. Si se desea se puede obtener una mayor densidad mediante un proceso de apisonado o vibrado del material durante el llenado.

Por último se termina el montaje de la célula y se seca en una estufa el material sobrante obteniendo la masa  $m_3$ .

La Figura 6 muestra como se debería realizar este tipo de vertido.

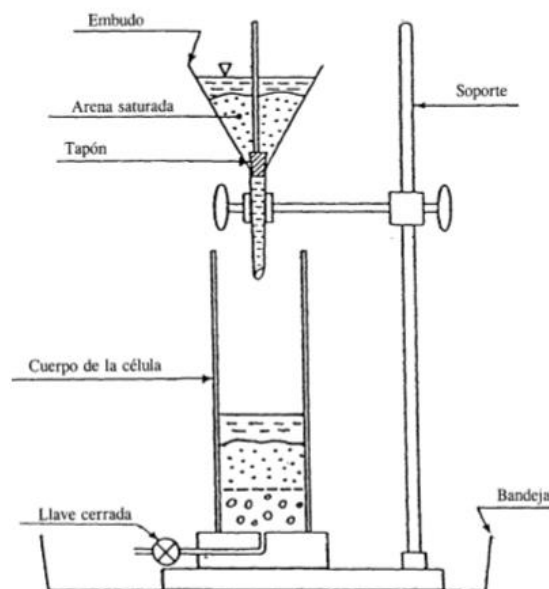


Figura 6. Vertido con arena saturada. Fuente: UNE 103403

Una vez vertida la muestra se conecta la célula de permeabilidad con el depósito tanto de entrada como de salida de agua desaireada, así como a los tubos piezométricos, como se muestra en la Figura 6 expuesta anteriormente.

El procedimiento del ensayo con flujo descendente, haciendo referencia a la Figura 4 para explicarlo, es el siguiente. En primer lugar se abre ligeramente la llave D de suministro de agua desaireada al depósito de nivel constante de forma que se ajuste la entrada de agua a la salida. A continuación se abren las llaves E, F y W, y se deja correr el agua hasta que se eliminan las burbujas de aire ocluido a través del orificio de purga que contiene la célula en su parte superior y se cierra la llave W. Se abren las llaves Y, a, b, c y se deja fluir el agua a través de la muestra hasta que se estabilicen los niveles de los tubos piezométricos. Cabe la posibilidad que durante el proceso de saturación se produjese un descenso del nivel de la muestra por lo que se debe reajustar el pistón sobre ella. Se mide la altura L de la muestra en

el permeámetro y se comprueba que los niveles de agua de los depósitos tanto de entrada como de salida se mantienen a nivel constante y a una altura adecuada para producirse un gradiente hidráulico adecuado.

A partir de este momento se puede comenzar el ensayo colocando una probeta graduada en la salida del depósito de descarga y simultáneamente se pone en marcha el cronómetro dando comienzo el ensayo debiendo efectuar las siguientes medidas:

- Cantidad de agua,  $Q_i$ , en ml, recogida en la probeta durante un intervalo de tiempo dado,  $t_i$ , o hasta completar un volumen de agua determinado.
- Los niveles de agua,  $h_a$ ,  $h_b$  y  $h_c$ , de los tubos piezométricos en mm. Estos niveles deben ser equidistantes, si no lo son indica la existencia de una heterogeneidad en la muestra, debiendo desmontarla y realizar todo el proceso de nuevo.
- La temperatura del agua en el recipiente de descarga, en °C.

Este proceso se deberá realizar varias veces hasta que se obtengan lecturas semejantes.

A partir de estas medidas podemos realizar cálculos que nos indiquen la permeabilidad de la muestra que estamos ensayando, para ello se deben realizar los siguientes pasos:

- Se calcula el caudal,  $q_i$ , en ml/s, durante cada periodo de observación mediante las medidas efectuadas y la ecuación:

$$q_i = \frac{Q_i}{t_i}$$

- Se calcula el gradiente hidráulico,  $i$ , entre los dos tubos piezométricos exteriores (a y c de la Figura 4) mediante la ecuación:

$$i_i = \frac{h_i}{Z}$$

Donde  $h$  es la diferencia de nivel de los tubos piezométricos extremos, expresada en mm y  $Z$  que es la suma de las distancias expresadas en mm entre las dos salidas extremas del cuerpo de la célula de permeabilidad ( $L_1$  y  $L_2$  de la Figura 3).

- Se calcula el coeficiente de permeabilidad,  $k$ , en m/s, mediante la ecuación:

$$k = \frac{q_i \cdot R_t}{i_i \cdot A}$$

Donde los valores de  $q_i$  e  $i_i$  son los obtenidos en el apartado a y b anterior,  $A$  es el área media de la muestra, en  $\text{mm}^2$ , calculado con el diámetro medio  $D$  de la célula y por último el factor de corrección de la viscosidad del agua por la temperatura,  $R_t$ , obtenido de la Figura 7.

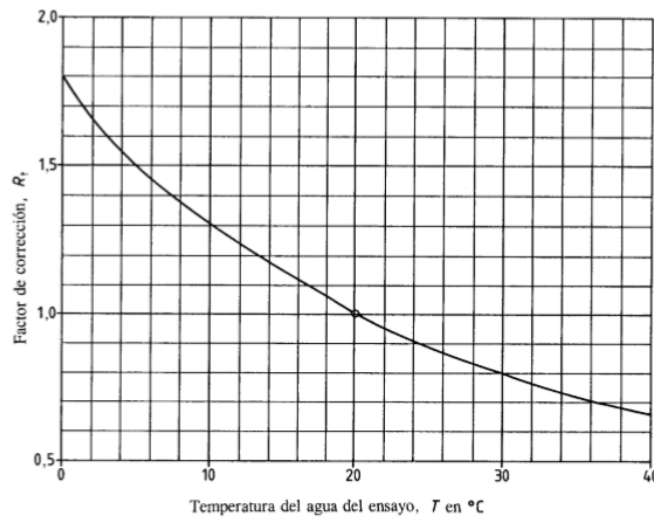


Figura 7. Factor de corrección por temperatura. Fuente: UNE 103403

Con las muestras de masa sobrante se pueden obtener otros parámetros como pueden ser la densidad seca,  $\rho_d$ , y el índice de huecos de la muestra en el ensayo,  $e$ , con las siguientes expresiones.

- Densidad seca ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ): 
$$\rho_d = \frac{4000 \cdot m}{\pi \cdot D^2 \cdot L}$$

Donde  $m$  es la masa de suelo seco utilizado en gramos,  $D$  es el diámetro medio de la célula, en metros, y  $L$  es la longitud de la muestra dentro de la célula en metros.
- Índice de huecos: 
$$e = \frac{\rho_s \cdot \gamma_w}{\rho_d} - 1$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad relativa de las partículas y  $\gamma_w$  es la densidad del agua.

## 2.4 Otros ensayos necesarios para el desarrollo del trabajo.

A continuación se enumeran una serie de ensayos que se deben realizar previamente al ensayo de permeabilidad que permitan caracterizar una muestra cualquiera. Antes de realizar estos ensayos se debe atender a la norma UNE 103-100 relativa a la preparación de las muestras para ensayos de suelo. El objetivo de esta norma es describir la forma de efectuar la recepción y almacenamiento de las muestras para su ensayo en laboratorio así como la preparación de la cantidad de muestra necesaria para realizar estos ensayos. Las muestras recibidas en el laboratorio deben de mantenerse en una cámara humedad para evitar variaciones de humedad en caso de muestras inalteradas, además no se deben de manipular de forma innecesaria y si se hace debe ser de forma cuidadosa para evitar que se produzcan roturas que alteren la muestra. En ensayos donde no sea necesario utilizar una muestra inalterada, como es por ejemplo el de permeabilidad, se requiere un secado previo en una estufa o a través de secadores de aire frío o caliente a una temperatura inferior a 60 °C. En el caso de que se quiera secar la muestra al aire, esta se debe colocar extendida sobre el suelo, una lona o una

bandeja siempre y cuando nos aseguremos de que estos lugares estén limpios de forma que no se contamine la muestra con otra cercana o con otros materiales.

A la hora de realizar el cuarteo de una muestra, hay que dividirla en dos porciones lo más iguales posibles mediante los cuarteadores adecuados, y realizando procesos sucesivos se obtiene la cantidad necesaria. Si se quiere realizar una división en dos fracciones se debe pasar la muestra por el tamiz elegido, se disgregan las partículas de suelo que se puedan quedar retenidas y se vuelve a pasar por el tamiz. Este proceso se repetirá tantas veces como sea preciso hasta dejar el material limpio de finos.

Sin embargo, esta normativa es una guía orientativa para la preparación de las muestras de forma general, ya que cada normativa correspondiente a un ensayo especifica el método que se debe de seguir para preparar la muestra.

### 2.4.1 Análisis granulométrico

Para realizar este ensayo se usará la norma UNE 103-101 análisis granulométrico de suelos por tamizado. El Objetivo de este ensayo es determinar los distintos tamaños de las partículas de una muestra y obtener la cantidad en tanto por ciento de estas que pasan por los tamices hasta el tamiz de luz 0.080 mm.

Para realizar este ensayo se necesitan una serie de aparatos y materiales como son los tamices de malla cuadrada y tejido de alambre con abertura de malla que varíe entre 100 mm a 0.080 mm pudiendo usar según el tipo de material los que mejor nos convengan, también será necesaria una balanza de capacidad máxima 10 kg que aprecie 1 g y otra de capacidad máxima 200 g que aprecie 0.01 g, un agitador mecánico regulable en tiempo e intensidad, cepillos y brochas para limpiar las mallas de los tamices y vasos de precipitados.

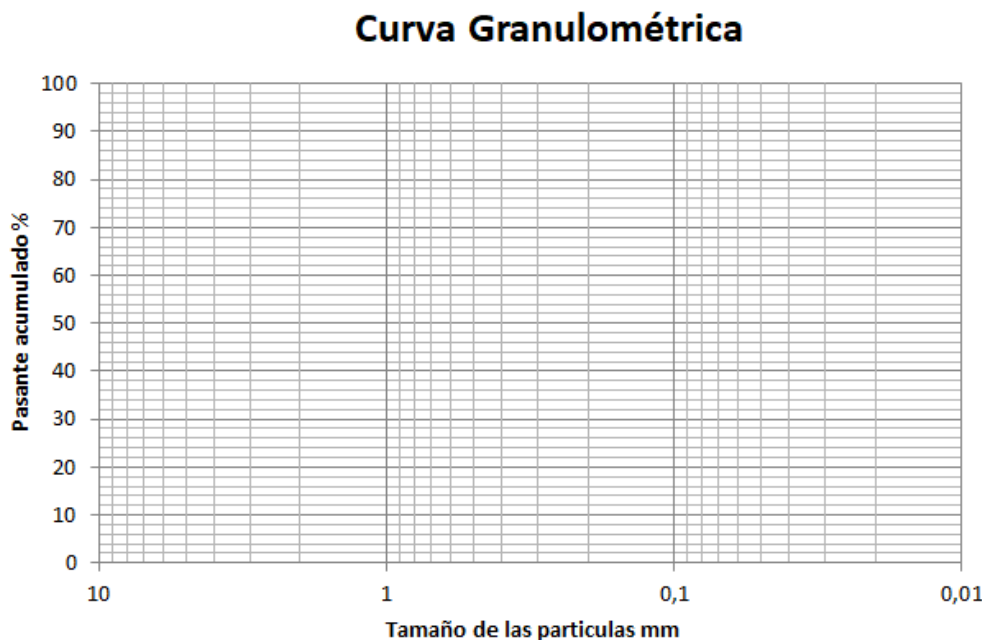
El procedimiento a seguir será en primer lugar tarar el recipiente donde verteremos la masa total de la muestra pasar saber su peso, a continuación se colocará en una especie de torre todos los tamices que sean necesarios y se verterá la muestra sobre ellos. Para obtener unos valores más adecuados, esta torre de tamices se colocará en un vibrador mecánico a una potencia y tiempo dependiente de la masa que tengamos, a mayor masa mayor tiempo y potencia. Por último el material retenido en cada tamiz se pesará y se anotará en la Tabla 1.

**Tabla 1. Tabla de resultados del análisis granulométrico.**

	Abertura (mm)	Peso parcial (g)	% retenido	% retenido acum	% pasante acum
Fondo					
Total					



A partir de los datos obtenidos, se realizará una gráfica semilogarítmica, que nos permitirá obtener la curva granulométrica de la muestra. Esta grafica tendrá en su eje de abscisas el tamaño de las partículas en milímetros y en el eje de ordenadas en tanto por ciento de pasante acumulado, como podemos observar en la Figura 8.



*Figura 8. Gráfica semilogarítmica.*

#### 2.4.2 Densidad relativa de las partículas

El ensayo para calcular el parámetro de densidad relativa de las partículas, también conocido como  $G_s$ , viene determinado por la norma UNE 103-302:1994. El objetivo de esta norma es la determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo menores de 5 mm. Esta densidad se define como el 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 esa misma temperatura.

Para realizar el ensayo se necesita una estufa de desecación, tres picnómetros de entre 50 cm<sup>3</sup> y 100 cm<sup>3</sup> con cuello capilar y enrase, balanza de precisión de 0.001 g y agua destilada.

El método a seguir que indica la norma es el siguiente, en primer lugar se seca la muestra al aire o en una estufa a 60 °C y pasarla por el tamiz de 5 mm, a continuación se deseca en la estufa a 110 °C hasta que se quede a masa constante que esta masa se divide en tres porciones de aproximadamente 15 g cada una. Se introducen los picnómetros en un baño termostático, y se fija una temperatura constante entre 20 °C y 25 °C, para conseguir que la temperatura del picnómetro no cambie con la del agua que se introducirá después.

Con cada una de las tres fracciones obtenidas se opera de la siguiente manera, se llenan los picnómetros con agua destilada hasta la línea de enrase, se le coloca el cuello del picnómetro y se determina la masa  $M_1$  con una precisión de 0.001 g, se retira el cuello del picnómetro y se vacía hasta la mitad aproximadamente y se pesa obteniendo la masa  $M_2$  sin colocar el cuello

con una precisión de 0.001 g. Con ayuda de un embudo se introducen los 15 g de material en el picnómetro obtenido la masa  $M_3$ . Por último colocamos el cuello del picnómetro obtenido la masa  $M_4$ .

La densidad relativa de las partículas de un suelo para cada porción viene dada por la expresión:

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

Se adopta como densidad relativa de un suelo, la media aritmética de los resultados obtenidos con las tres porciones ensayadas. El valor de  $G_s$  obtenido es adimensional.

### 2.4.3 Densidad mínima de una arena

La norma UNE 103-105:1993 sirve para determinar la densidad mínima de arenas secas que cumplan las siguientes condiciones, en primer lugar que no estén cementadas, en segundo lugar al igual que para la determinación de la densidad máxima el material tiene que pasar en su totalidad por el tamiz de 5.0 mm y no debe de contener un porcentaje mayor al 10% que pase por el tamiz 0.080 mm.

A la hora de realizar el ensayo se debe de evitar tanto la segregación como el apelmazamiento de las partículas que produzcan valores de densidades erróneos.

Los aparatos necesarios para la realización del ensayo son, un molde cilíndrico de medidas conocidas o medibles, un embudo, una estufa, un enrasador metálico y una balanza de 10 kg de capacidad máxima que aprecie hasta 1 g.

El proceso operativo comenzará secando la muestra en la estufa a una temperatura en torno a los 105 °C – 115 °C hasta masa constante. Taramos la masa del molde vacío obteniendo  $M_1$ .

A continuación taponamos el embudo con el dedo y procedemos a llenar el embudo, una vez lleno lo introducimos en el molde y dejamos caer la muestra elevando lentamente el embudo intentando que la altura de caída sea la menor posible para evitar la segregación. Cuando se forma un cono de muestra de tamaño la base del molde retiramos el embudo y enrasamos la muestra. Repetimos este proceso hasta completar el volumen del molde  $V$  pesándolo y obteniendo  $M_2$ .

Para obtener la densidad mínima usaremos la expresión:

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

El valor obtenido vendrá expresado en unidades en  $\text{kg/dm}^3$  y será la media aritmética de los resultados obtenidos en el ensayo.

#### 2.4.4 Densidad máxima de una arena

La determinación de la densidad máxima de una arena por el método del apisonado viene definida en la norma UNE 103-106:1993. La arena que usará para este ensayo deberá pasar en su totalidad por el tamiz de luz 5.0 mm y no tendrá que contener más de un 10% del material que pasa por el tamiz de luz 0.080 mm.

Para la realización de este ensayo se debe de disponer en el laboratorio de una molde cilíndrico de dimensiones conocidas o que puedan ser medibles, para poder obtener su volumen  $V$  en  $\text{dm}^3$ , una maza con un pistón de 4.54 kg aproximadamente con una altura de caída controlada de 457 mm pudiendo ser accionada a mano o a través de un compactador mecánico, una balanza de 10 kg de capacidad máxima que aprecie hasta 1 g y por ultima una estufa de desecación.

Se puede obtener la densidad máxima a través de dos métodos, en el primero de ellos comenzaremos pesando el molde siendo esta nuestra masa  $M_1$ , a continuación vamos vertiendo tongadas de muestra de unos 10 mm en el molde y lo compactamos con la ayuda del compactador mecánico hasta enrasar el molde pesándolo y obteniendo la masa  $M_2$ . El segundo método comenzará igual que el primero, pesando el molde obtenido la masa  $M_1$ , a continuación vertemos la muestra en el molde en aproximadamente 5 capas y con la maza y la altura anteriormente mencionada se aplican unos 50 golpes por capa hasta completar el molde. Por ultimo pesamos el molde obteniendo la masa  $M_2$ .

Para ambos métodos usaremos la siguiente expresión para determinar la densidad máxima:

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

El valor de densidad máxima obtenido vendrá expresado en  $\text{kg}/\text{dm}^3$  y será la media aritmética de los resultados obtenidos en los dos métodos explicados anteriormente.

## 2.5 Correlación entre los distintos parámetros medidos en laboratorio

Con los parámetros medidos en el laboratorio como pueden ser los obtenidos gracias a las curvas granulométricas se pueden establecer correlaciones entre estos y la permeabilidad, ya que es obvio que en suelos arenosos gruesos los poros entre las partículas minerales son relativamente grandes lo que hace que la permeabilidad sea alta y por el contrario en suelos de menores tamaños, los poros y canales entre los granos son más pequeños por lo que la permeabilidad de estos materiales son menores.

Sin embargo, en la práctica estas correlaciones tienen un valor muy limitado, ya que otros factores aparte del tamaño de las partículas ejercen una notoria influencia en el valor de la permeabilidad. Estos factores no han sido aplicados y por lo tanto no se tienen en cuenta a la hora de calcular la permeabilidad a través de las ecuaciones de Hazen, Slichter, Terzaghi y Kozeny, lo que hace que los valores obtenidos por estas ecuaciones no sean muy precisos de ahí el uso de los permeámetros. Estas ecuaciones pueden ser útiles para obtener un valor

aproximado cuando no se dispone de recursos económicos suficientes para el uso de herramientas como el permeámetro.

Las ecuaciones anteriormente nombradas intentan resolver ese problema con el uso de constantes,  $c$ , que para la fórmula de cada autor varía siendo:

- Hazen 
$$K = c \cdot d_e^2$$

Para este autor, el valor de  $c$  se obtuvo para arenas uniformes variando la constante entre 41 y 146, aunque se suele usar un valor de 100 como promedio aceptable.

- Slichter 
$$K = c \cdot m^n \cdot d_e^2$$

En esta fórmula  $m$  es la porosidad total y  $n$  otra constante cuyo valor aproximado es de 3.3; ello equivale a introducir una corrección función de la porosidad. En general  $c$  y  $m^n$  se incluyen en una única constante  $C$ , cuyos valores son función de la porosidad total como puede verse en la Figura 9 expresada como  $a = 100/C$ .

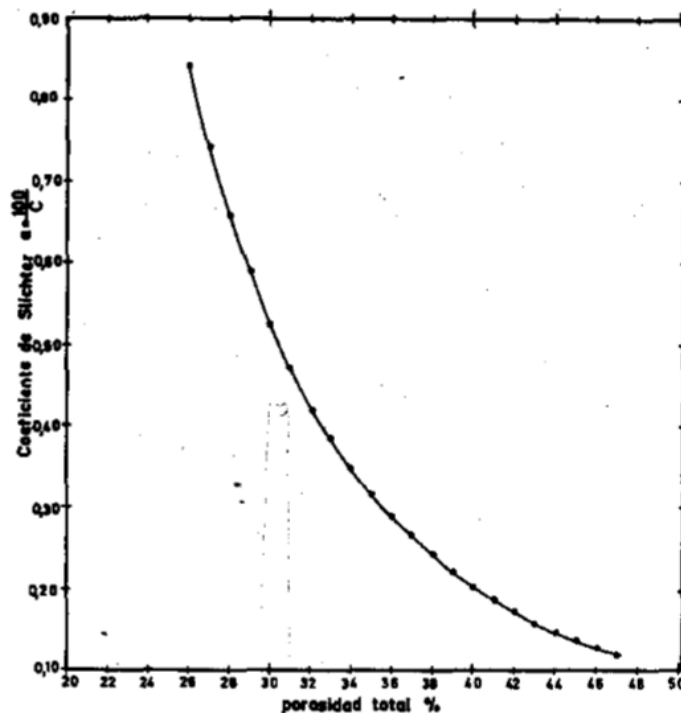


Figura 9. Valores del coeficiente de la fórmula de Slichter. Fuente: Hidrología subterránea (Tomo 1). Custodio, Emilio; Llamas, Manuel Ramón. 1976

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

Esta fórmula nos correlaciona la forma de los granos de la muestra, su porosidad, así como su granulometría. El valor de  $\lambda$  desde 800 para partículas redondeadas a 460 para partículas irregulares de superficie áspera.

- Kozeny 
$$K = c \cdot \left( \frac{V}{S} \right)^2 \cdot \frac{m^3}{(1-m)^2} \cdot g$$

Esta fórmula tiene en cuenta al igual que las formulas anteriores la porosidad total,  $m$ , y la constante,  $c$ , pero además añade los valores de  $S$  y  $V$ , que la superficie específica de poros y el volumen en el que están contenidos respectivamente.

### 3 Metodología de trabajo

En la metodología de trabajo vamos a diferenciar en primer lugar los trabajos realizados con la muestra y en segundo lugar los realizados con el permeámetro.

En cuanto a la muestra utilizada, en el laboratorio de geotecnia de la UPCT se encontraban varios capazos que contenían a simple vista arenas como la de la Figura 10, ideal para la realización de nuestro ensayo. Para asegurarnos de que este material era el idóneo se decidió realizar los ensayos detallados anteriormente para cerciorarnos de que estábamos en lo correcto. La realización de estos ensayos nos daría además valores de gran ayuda para la determinación de la permeabilidad como pueden ser la curva granulométrica, la densidad relativa de las partículas ( $G_s$ ), la densidad tanto mínima como máxima de la muestra entre otros.



*Figura 10. Muestra de arena en laboratorio.*

En cuanto al permeámetro, la Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos e Ingeniería de Minas dispone en su laboratorio de geotecnia de dos permeámetros de carga constante, como se indica en la Figura 11, estos nos permiten obtener de forma prácticamente directa el valor de la permeabilidad de las distintas muestras que vamos a ensayar.



*Figura 11. Permeámetros de carga constante del laboratorio de geotecnia.*

Antes de realizar nuestro ensayo, decidimos revisar todo el sistema para ver si había alguna fuga o algún problema. Gracias a ello se descubrió que uno de los permeámetros se encontraba montado de forma incorrecta a como indica la norma UNE 103-409:1999, ya que la entrada de agua se estaba produciendo en lugar de por la parte superior de la célula, por la parte inferior, generando un flujo ascendente que producía que se generase unas plumas oscuras en la muestra, sinónimo de un fenómeno de sifonamiento como podemos observar en la Figura 12 de la prueba inicial que se hizo con la muestra ya existente en ese permeámetro.



*Figura 12. Plumitas de sifonamiento.*

### 3.1 Selección de la muestra

Como se ha comentado en el apartado “3. Metodología de trabajo”, en la Figura 10, la muestra se encontraba en un capazo del laboratorio que se cogió en una salida de campo que se realizó a playa de La Manga (Murcia). Como podemos ver en la Figura 13, la muestra contaba con partículas de corcho de unas planchas que se encontraban junto a él, de forma que para no obtener resultados erróneos en los ensayos previos estos debían de ser eliminados. Para eliminarlos pensamos que al tratarse de elementos volátiles estos podían ser eliminados mediante aire y entonces con ayuda de un compresor de aire comprimido y a una distancia suficiente para que este aire no hiciese que los finos de la muestra también se eliminarán, conseguimos que la muestra se quedase inalterada.



*Figura 13. Elementos volátiles en la arena.*

### 3.2 Ensayos previos

#### 3.2.1 Curva granulométrica

El primer ensayo que se realizó fue el de la obtención de la curva granulométrica de nuestra muestra. En primer lugar se introdujo la muestra en la estufa durante 2 horas a una temperatura de 60 °C para eliminar cualquier tipo de humedad de la muestra que impidiese el correcto paso por los tamices.

En el laboratorio se disponen de una amplia variedad de tamices de diferentes abertura de malla, pero para el tipo de muestra que teníamos se decidió usar los tamices cuya abertura de malla en mm era la siguiente: 2, 0.63, 0.300, 0.200, 0.150, 0.106, 0.075, 0.063 y 0.045.

Previamente a verter la muestra en los tamices, se pesó en la balanza toda la muestra posteriormente saber la cantidad de error que tenemos en el ensayo.

Tras limpiar los tamices con ayuda de los cepillos de muestra de ensayos anteriores su sucedió a su colocación en el vibrador colocando en la parte inferior de la torre una bandeja a modo de fondo y en la parte superior una tapadera para que nada de material se saliese. Puesto que disponíamos de una cantidad de aproximadamente 1 kg, se decidió que el vibrador se pusiese a una potencia de 5 sobre 9 y un tiempo de 20 minutos como muestra la Figura 14.



Figura 14. Tamices con muestra en el vibrador.

Una vez transcurrido este tiempo, se fueron sacando cada tamiz, echando el material retenido sobre un recipiente, en este proceso es importante ayudarse de herramientas como puede ser cepillos o brochas para asegurarnos que todo el material retenido se encuentra en el recipiente y no queda nada en el tamiz. Este material se pesa en la balanza y se van completando las Tablas 2 y 3, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 2. Masas resultado de análisis granulométrico.

<b>Masa recipiente + muestra</b>	1582.17 g
<b>Masa de recipiente</b>	528.17 g
<b>Masa de muestra</b>	1054 g
<b>Masa de muestra tras tamizado</b>	1052.07 g
<b>Porcentaje de error (&lt;5%)</b>	0.18 %

Tabla 3. Resultado tras tamizado análisis granulométrico

Abertura (mm)	Peso parcial (g)	% retenido	% retenido acumulado	% pasante acumulado
2	0	0	0	100
0.63	0.28	0,03	0,03	99,97
0.300	72.07	6,84	6,86	93,14
0.200	882.83	83,76	90,62	9,38
0.150	76.77	7,28	97,91	2,09
0.106	15.17	1,44	99,35	0,65
0.075	2.99	0,28	99,63	0,37
0.063	0.35	0,03	99,66	0,34
0.045	0.85	0,08	99,74	0,26
<b>Fondo</b>	0.76	0,07	99,82	0,18
<b>Total</b>	1052.07			



Con los valores obtenidos en la Tabla 3 podemos obtener la siguiente curva granulométrica de la Figura 15 que nos dará el valor del diámetro eficaz ( $d_e$ ), correspondiente al  $d_{10}$  necesario para aplicar las ecuaciones de Hazen, Slichter, Terzaghi y Kozeny.

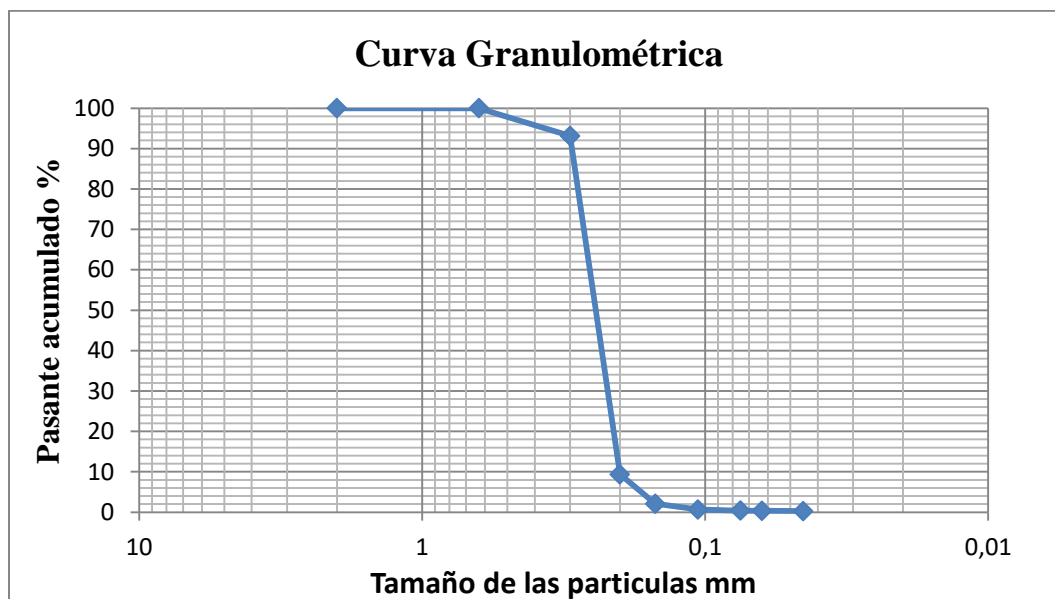


Figura 15. Curva granulométrica de la muestra.

### 3.2.2 Densidad relativa de las partículas, Gs.

Antes de realizar el resto de ensayos, se decidió cribar la muestra para reducir la cantidad de finos que podría tener nuestra muestra, ya que estos podrían generar resultados erróneos. La muestra que usaríamos para el resto de ensayos sería la que quedaría entre los tamices de diámetro de abertura 0.630 mm y 0.200 mm. Para obtener una criba adecuada se decidió colocar en dos tandas cantidades próximas a 1 kg y con ayuda del vibrador a potencia de 7 sobre 9 y un tiempo de 10 minutos como indica la Figura 16. Tras el proceso de cribado se redujo la cantidad de muestra para realizar los ensayos de 2 kg a 1.5 kg como indica la Figura 16, por lo que el cribado fue una buena decisión ante la gran cantidad de finos que tenía la muestra.



Figura 16. Cribado de la muestra.

A continuación, se procede a realizar el ensayo para determinar la densidad relativa de las partículas de la muestra, para ello en primer lugar cogemos en el laboratorio el material necesario que serán: tres picnómetros con sus respectivos cuellos (uno para cada partición de muestra), agua destilada, una pipeta que nos ayude a retirar el agua destilada, un embudo y la balanza. Cogemos unos 50 gramos de muestra y los dividimos en 3, de forma que para el primer picnómetro tenemos 15.05 gramos, para el segundo 19.37 gramos y para el tercero 15.60 gramos. Cabe destacar que detallamos el procedimiento para una de las particiones, ya que se hace de forma idéntica para las restantes. Una vez tenemos el agua destilada y el picnómetro a la misma temperatura, unos 24 °C, procedemos al llenado del picnómetro hasta la línea de enrase como se muestra en la Figura 17 y obtenemos la masa  $M_1$  que es de 169.02 gramos.



*Figura 17. Picnómetro lleno hasta línea de enrase con cuello.*

Retiramos el cuello del picnómetro, con ayuda de la pipeta retiramos la mitad aproximadamente de agua destilada y pesando ahora el picnómetro obtenemos la masa  $M_2$  que es de 113.79 gramos para esta porción. Se continuó vertiendo los 15.05 gramos al picnómetro con ayuda de un embudo, como se aprecia en la Figura 18 y se obtiene la masa  $M_3$  que es de 128.81 gramos.



*Figura 18. Picnómetros con muestra llenados a mitad.*

Por último se obtiene la masa  $M_4$  rellenando el resto de picnómetro con agua destilada hasta la línea de enrase y colocando el cuello, dando en la balanza una masa de 178.53 gramos. La densidad relativa de las partículas,  $G_s$ , se calculará con la siguiente fórmula:

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

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos para todas las particiones hechas.

*Tabla 4. Resultados ensayo densidad relativa de las partículas, Gs.*

Picnómetro	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	M <sub>3</sub> (g)	M <sub>4</sub> (g)	Gs
1	169,02	113,79	128,81	178,53	2,73
2	152,22	98,6	117,97	164,25	2,64
3	170,98	116,04	131,6	180,84	2,73

De los tres valores de G<sub>s</sub> que tenemos nos quedaremos con el valor medio que es de 2,7.

A la vez que se estaba realizando este ensayo, se pudo disponer de unos resultados de este mismo ensayo realizados con una arena como la nuestra. Los resultados de éste se muestran en la Tabla 5.

*Tabla 5. Resultados obtenidos de un ensayo Gs anterior.*

Picnómetro	M <sub>1</sub> (g)	M <sub>2</sub> (g)	M <sub>3</sub> (g)	M <sub>4</sub> (g)	Gs
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

El valor medio de G<sub>s</sub> de este ensayo es de 2,73 que se asemeja mucho al valor obtenido en nuestro ensayo que era de 2,7.

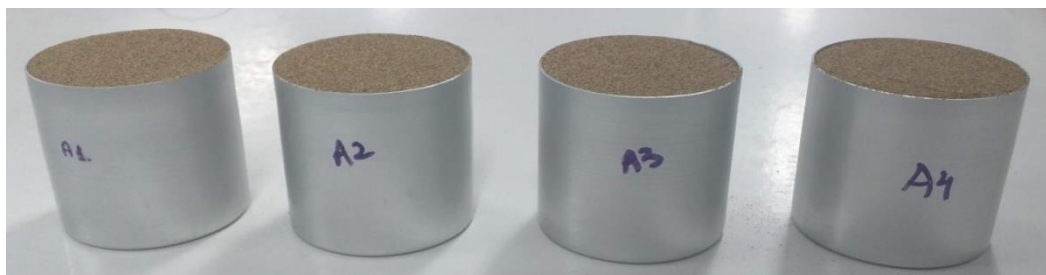
### 3.2.3 Densidad mínima de la arena.

Para realizar el ensayo que nos permita determinar la densidad mínima de la muestra, cogimos cuatro moldes cilíndricos que se encontraban en el laboratorio de los que con ayuda de un pie de rey determinaremos para cada uno de ellos su diámetro y su altura. Además se tendrá que determinar la masa de cada uno de ellos, M<sub>1</sub>, con ayuda de la balanza. Estos pasos iniciales los podemos observar en la Figura 19.



**Figura 19. Medidas y masa del molde cilíndrico vacío.**

Posteriormente como se detalló en el apartado 2.4.3 del trabajo en el punto de densidad mínima, se procede al llenado de los moldes como se indica en la norma UNE 103-105:1993. La muestra se vierte con ayuda de un embudo formando sucesivos conos de base el diámetro del molde, cuando esto ocurre se enrasa con ayuda de un enrasador y se continúa haciendo conos hasta completar el volumen del molde. Cuando el molde está completo se enrasa, como se muestra en la Figura 20 y con cuidado de no darle algún golpe o vibración que haga que las partículas sufran alguna compactación se pesa en la balanza obteniendo la masa  $M_2$ .



**Figura 20. Moldes llenos y enrasados.**

Obteniendo el volumen con la fórmula:

$$V = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4}$$

Donde:  $\phi$  = diámetro del molde

Con el volumen calculado, podemos obtener la densidad mínima con la ecuación:

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

Los resultados obtenidos para todos los moldes se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6. Resultados ensayo de densidad mínima de la arena.**

Molde	Diámetro (dm)	Altura (dm)	Volumen (dm <sup>3</sup> )	M <sub>1</sub> (Kg)	M <sub>2</sub> (Kg)	$\rho_{\min}$ (kg/dm <sup>3</sup> )
1	0,6	0,6	0,17	0,03	0,28	1,49
2	0,6	0,6	0,17	0,03	0,29	1,50
3	0,6	0,61	0,17	0,03	0,29	1,47
4	0,6	0,6	0,17	0,03	0,28	1,48

Tomamos como densidad mínima la media aritmética de las densidades obtenidas de cada molde. Por lo tanto la densidad mínima de la arena que tenemos como muestra, será de 1,49 kg/dm<sup>3</sup>.

De un trabajo que se realizó con una muestra de arena como la nuestra, se obtuvieron los datos que se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7. Resultados obtenidos de un ensayo anterior de densidad mínima de la arena**

Molde	Volumen (dm <sup>3</sup> )	M <sub>1</sub> (kg)	M <sub>2</sub> (kg)	$\rho_{\min}$ (kg/dm <sup>3</sup> )
1	0.17	0.03	0.28	1.45
2	0.17	0.03	0.28	1.44
3	0.17	0.03	0.29	1.45
4	0.17	0.03	0.28	1.44

El valor medio de densidad mínima en este caso es de 1,45 kg/dm<sup>3</sup>, valor cercano al nuestro.

### 3.2.4 Densidad máxima de la arena.

El ensayo mediante el cual podemos determinar la densidad máxima de la muestra, como hemos dicho anteriormente en el apartado 2.3.4 de este trabajo en el apartado de densidad máxima viene definida por la norma UNE 103-106:1993. Puesto que la norma nos indica que para el proceso de compactación necesitamos una maza con pistón de 4.54 kg que no se dispone en el laboratorio, se ha procedido a utilizar dos métodos alternativos para poder determinar la densidad máxima de la arena.

- *Método I*

El primer método se basa principalmente en la ayuda del agitador mecánico para obtener una la máxima compactación. Para realizar este método se necesitará disponer de cuatro moldes como para el ensayo de densidad mínima de los que podamos

conocer sus dimensiones como su masa  $M_1$ . El procedimiento que se ha desarrollado es el siguiente:

1. Se vierte una tongada de aproximadamente 100 g en cada uno de los moldes y los colocamos con una tapadera para que la muestra no se salga en el agitador mecánico a potencia 3 sobre 9 que alcanza el agitador y un tiempo de 6 minutos. En las Figura 21 se puede observar el primer punto de éste método.



Figura 21. Compactación mediante vibrador de la muestra.

2. A continuación se vierten otros 100 gramos a cada molde, pero en este caso debido al aumento de masa en el molde, aumentamos la potencia a 6 sobre 9 que alcanza el agitador manteniendo el tiempo en 6 minutos.
3. Se repite este procedimiento hasta completar el molde por completo, enrasando cada uno de ellos.
4. Por último retiramos las tapas, y se pesan las muestras en la balanza obteniendo la masa  $M_2$ .

Para obtener la densidad máxima, se usará la siguiente fórmula:

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

En la Tabla 8 se muestran todos los valores medidos para determinar el volumen del molde así como los resultados del ensayo.

Tabla 8. Resultados ensayo de densidad máxima de una arena. Método I.

Molde	Diámetro (dm)	Altura (dm)	Volumen (dm <sup>3</sup> )	$M_1$ (kg)	$M_2$ (kg)	$\rho_{max}$ (kg/dm <sup>3</sup> )
1	0,6	0,6	0,17	0,03	0,33	1,76
2	0,6	0,6	0,17	0,03	0,33	1,77
3	0,6	0,61	0,17	0,03	0,33	1,75
4	0,6	0,6	0,17	0,03	0,33	1,77

Hacemos la media aritmética de los cuatro valores que se han obtenido por este método y obtenemos un valor de densidad máxima de 1,76 kg/dm<sup>3</sup>.

- *Método II*

El segundo método, nos ayudaremos de la norma UNE 103-501:1994 la cual nos define el procedimiento a seguir mediante el ensayo de compactación modificado para obtener la densidad máxima de la arena. En los siguientes puntos se detallará el procedimiento a seguir para la obtención del valor buscado:

1. Se cogen cuatro moldes disponibles en el laboratorio, se toman sus medidas y se determina su volumen  $V$ .
2. Se pesa en la balanza el molde obteniendo la masa  $M_2$ .
3. Se vierten unos 100 gramos de muestra, se humedece con una determinada cantidad de agua y se golpea unas 60 veces con una maza uniformemente por todo el molde como muestra la Figura 21.



*Figura 22. Tongada compactada junto con maza.*

4. Se repite este proceso hasta completar todo el molde enrasándolo.
5. Introducimos los moldes en la estufa que se dispone en el laboratorio a 110 °C durante 24 horas para que se pierda el agua que hemos vertido para realizar la compactación
6. Transcurridos estas 24 horas, pesamos los moldes en la balanza obteniendo la masa  $M_2$ .

Para calcular la densidad máxima usaremos la formula siguiente:

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

A continuación en la Tabla 9 se muestran los valores obtenidos por este método.

Tabla 9. Resultados ensayo de densidad máxima de una arena. Método II

Molde	Diámetro (dm)	Altura (dm)	Volumen (dm <sup>3</sup> )	M <sub>1</sub> (kg)	M <sub>2</sub> (kg) 24h a 110° C	$\rho_{max}$ (kg/dm <sup>3</sup> )
1	0,6	0,6	0,17	0,03	0,33	1,72
2	0,6	0,6	0,17	0,03	0,33	1,73
3	0,6	0,61	0,17	0,03	0,33	1,69
4	0,6	0,6	0,17	0,03	0,32	1,73

Haciendo la media aritmética de los cuatro valores de densidad máxima obtenidos por el método II, nuestra muestra presenta una densidad máxima de 1,72 kg/dm<sup>3</sup>.

Los valores de la densidad máxima de ambos métodos presentan gran similitud, variando entre 1,76 kg/dm<sup>3</sup> del primer método y 1,72 kg/dm<sup>3</sup> del segundo.

De un trabajo anterior que se realizó en el laboratorio, disponíamos de su valor de densidad máxima que era de 1.67 kg/dm<sup>3</sup>, valor próximo a los nuestros porque podemos suponer que los métodos realizados son hasta cierto punto apropiados.

### 3.3 Montaje del permeámetro

Como se describió en el apartado “3.3 Montaje del permeámetro”, este se encontraba mal montado ya que producía valores erróneos debido a fenómenos de sifonamiento cuando se realizaban los ensayos.

Para ello comenzamos por el desmontaje del permeámetro, en primer lugar cerramos todas las llaves para impedir que entre agua a la célula y se transfiera suciedad a los conductos de unión y nos de valores erróneos después en el ensayo.

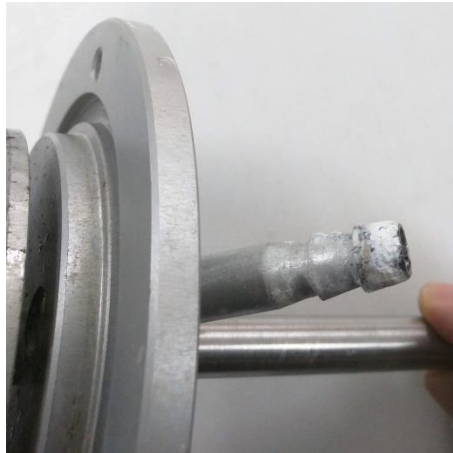
Cuando se desmontó la célula de permeabilidad, como se observa en la Figura 23, en la muestra que había en el interior se había formado unos hongos que había afectado a la placa perforada del permeámetro, por lo que decidimos limpiar con la ayuda de lijas de grano fino y disolvente para que se limpiase todo bien.



Figura 23. Hongos de la muestra anterior.



Además, se encontraron las conexiones entre la célula de permeabilidad y los tubos flexibles con cal como indica la Figura 24, este punto era lugar de pérdidas de agua ya que no existía un buen ajuste debido a esta cal.



*Figura 24. Conexiones con cal.*

Se decide desarmar todas las piezas del permeámetro, como se muestra en la Figura 25, para revisar posibles puntos de fugas como pueden ser las juntas y las uniones. Además se decide limpiar todos los orificios con aire a presión para limpiar posibles partículas retenidas en ellos.



*Figura 25. Despiece de la célula de permeabilidad.*

Una vez limpiado todo se comenzó a montar todo el aparato pero la norma UNE 103-403:1999 que detallaba el ensayo de permeabilidad mediante un permeámetro de carga constante indica que la tubería de la conexión inferior, por la que salía el agua de la célula de permeabilidad, debía ir conectada a un depósito de descarga como se indica en la Figura 4,

esto en los permeámetros del laboratorio de geotecnia no era así por lo que se decidió usar un depósito que se encontraba sin uso en el laboratorio como el que se muestra en la Figura 26.



*Figura 26. Depósito de agua desaireada.*

A este depósito se le pusieron tres conexiones, la conexión izquierda sería la que nos permitiría llenar el depósito hasta un nivel constante, la derecha sería la del desagüe y la central la que vendría de los permeámetros. Para poder usar ambos permeámetros con este depósito, se compraron piezas de ámbito hidráulico como podían ser una T, adaptadores a tuberías flexibles y llaves de cierre como se muestran en las Figuras 27 y 28.



*Figura 27. Llave de cierre con adaptadores a tubos flexibles.*



**Figura 28.** T con adaptadores a tubería flexible.

El resultado final de estas conexiones se muestra en la Figura 29. Es importante mencionar que la llave que pertenece al permeámetro que no se esté usando deberá permanecer cerrada, para que no se produzcan valores erróneos en la descarga del depósito. Además, el nuevo depósito de salida nos permite su regulación en altura, lo que nos permite crear distintos gradientes hidráulicos respecto al depósito de entrada. A mayor diferencia de altura, mayor gradiente hidráulico, y viceversa.



**Figura 29.** Depósito de agua desairada a distintas alturas junto con conexiones.

Una vez montado el depósito de descarga se procedió al montaje del resto del permeámetro, utilizando nuevas tuberías flexibles.

Antes de realizar el ensayo con la muestra, se realizó una prueba de estanqueidad, que consistió en llenar todo el circuito con agua durante una hora aproximadamente, como se muestra en la Figura 30, en la que se comprobó que no existía ninguna fuga en ningún lugar de unión.

Esta prueba nos permitió regular la altura del depósito de agua desaireada de salida para establecer un gradiente hidráulico razonable.



*Figura 30. Prueba de estanqueidad.*

## **4 Realización del ensayo de permeabilidad**

El ensayo de permeabilidad va a constar de dos partes, en primer lugar vamos a realizar el ensayo de permeabilidad para una arena con densidad máxima y en segundo lugar vamos a aprovechar que el segundo permeámetro que se encuentra en el laboratorio estaba montado correctamente y tenía en su interior una arena suelta. La obtención de la permeabilidad de ambas muestras nos va a permitir comparar en puntos posteriores la permeabilidad con la densidad de una muestra.

Como se ha comentado en puntos anteriores, la realización de los ensayos de permeabilidad se va a hacer siguiendo los pasos descritos por la norma UNE 103-403:1999.

### **4.1 Ensayo de permeabilidad para una arena con densidad máxima**

Previamente a ensayar con nuestra muestra, debemos obtener el material que se colocará como filtro en la célula de permeabilidad en la parte superior como en la inferior. La norma, nos indica que la granulometría del material de filtro depende de la muestra a ensayar, debiendo tener el material de filtro una curva granulometría entre cuatro veces el  $D_{15}$  y cuatro veces el  $D_{85}$  de la granulometría de la muestra.

De la figura 15 podemos obtener los  $D_{15}$  y  $D_{85}$  de nuestra muestra, estos tienen unos valores de 0.21 mm y 0.29 mm respectivamente, que si los multiplicamos por cuatro cada uno obtenemos que la granulometría de nuestro material de filtro debe estar entre 0.84 mm y 1.16 mm.

En el laboratorio de geotecnia se disponía de una grava, para quedarnos con la idónea para nuestro ensayo se decidió en primer lugar lavarla con agua para quitarle posibles finos y que posteriormente diese problemas y en segundo lugar cribarla, quedándonos para nuestro ensayo la retenida entre los tamiz de 2.00 mm y 0.63 mm de abertura de tamiz, ayudándonos

del vibrador a potencia 7 sobre 9 y 10 minutos como se indica en la figura 31, que eran los más cercanos a la granulometría que necesitábamos.



Figura 31. Cribado de grava para filtro.

La norma indica que para células de 75 mm de diámetro, la altura de filtro deberá de ser unos 40 mm. Como medir el diámetro interior de la célula resultaba un poco complicado, se decidió contactar con la fábrica del permeámetro, Matets, la cual nos proporcionó distintos parámetros de su producto entre ellos el diámetro de la célula que como nos indica la Figura 32 es de 75 mm.

526

**MATEST**  
 SECCIÓN S | SUELOS

---

**PERMEÁMETROS DE CARGA CONSTANTE**  
 NORMAS: BS 1377:5 | ASTM D2434 | AASHTO T215

Utilizados para determinar la permeabilidad de los suelos granulares, grava y arena. La muestra se introduce en una célula acrílica de permeabilidad y el agua atraviesa la célula a través de un depósito de nivel constante. La célula de permeabilidad tiene puntos de presión a diferentes niveles donde están conectados los tubos manómetro fijados a un soporte con escala graduada. Están disponibles dos modelos de células de permeabilidad de carga constante: 75 mm y 114 mm de diámetro.

**S245-01**  
 CÉLULA DE PERMEABILIDAD DE CARGA CONSTANTE, Ø 75 MM con 3 puntos de presión. Compuesta de cuerpo acrílico de plexi-glás, situado entre dos placas de aluminio anodizado.  
**Peso:** 3 kg aprox.

Figura 32. Ficha técnica permeámetro de carga constante Matets.

Como se muestra en la Figura 33, tras el vertido en la célula se coloca el filtro de malla metálica. Debe asegurarse que la superficie de grava queda lo más horizontal posible para que el filtro de malla ajuste bien y no se produzcan transferencias de la muestra a ensayar a la grava y viceversa.



**Figura 33. Filtro de malla metálica tras filtro de arena.**

Como el apartado “3.2.4. Densidad máxima de una arena” se obtuvo el valor mayor de densidad máxima por el *Método I*, se decidió realizar el vertido con densidad máxima por este procedimiento y no por el otro que simulaba el ensayo Proctor Modificado.

De esta manera el vertido de la muestra en la célula se iba a realizar de la siguiente manera, la célula tiene una altura de 240 mm, 80 mm de ellos tenían que ser para el material de filtro por lo que quedaba para muestra 160 mm. Como el vertido para conseguir la máxima densidad se debía hacer por pequeñas tongadas, se decidió hacerlo por tongadas de unos 20 mm aproximadamente.

Previamente a verter la muestra en la célula, obtenemos la masa de muestra inicial a verter ( $M_{\text{INICIAL}}$ ) que en la báscula marcó un peso de 1593 gramos.

Con ayuda de un embudo se iba a ir vertiendo la muestra de forma que quedase lo más uniformemente distribuida como se podemos observar en la Figura 34.



**Figura 34. Vertido de la muestra por tongadas.**

Tras verter la primera tongada, la célula debe colocarse en el agitador mecánico, como se muestra en la Figura 35, para conseguir su compactación. Para ello, se debe poner el agitador a una potencia de 6 sobre 9 que alcanza y 5 minutos



**Figura 35. Vibrado de las tongadas.**

Repetimos este proceso hasta completar la célula de permeabilidad con las 8 tongadas de arena y los 40 mm últimos con el filtro de malla metálico y el filtro de arena. Se pone la célula al completo en el vibrador mecánico para ajustar la placa perforada superior lo mejor posible contra el material de filtro. Este punto lo podemos ver en la Figura 36.



**Figura 36. Célula completa vibrada.**

Una vez vertida la muestra en el permeámetro se anotan diversos parámetros, como son la masa de muestra que nos ha sobrado ( $M_{\text{SOBRANTE}}$ ), la masa del permeámetro vacío ( $M_{\text{PV}}$ ), la masa del permeámetro lleno con la muestra y el material de filtro ( $M_{\text{PLL}}$ ), la masa de muestra que hay en su interior ( $M_{\text{M}}$ ), así como la altura media de la muestra ( $L$ ). El valor de la altura media de la muestra para mayor precisión será la media de tres medidas ya que aunque es mínima pero la superficie y la base de la muestra no son totalmente horizontales. Estos parámetros, posteriormente serán usados para determinar además de la permeabilidad de la muestra su densidad seca entre otros.

$$M_{\text{INICIAL}} = 1.593 \text{ kg}$$

$$M_{\text{SOBRANTE}} = 0.290 \text{ kg}$$

$$M_{\text{M}} = M_{\text{INICIAL}} - M_{\text{SOBRANTE}} = 1.593 \text{ kg} - 0.290 \text{ kg} = 1.303 \text{ kg}$$

$$M_{\text{PV}} = 3 \text{ kg}$$

$$M_{\text{PLL}} = 4.520 \text{ kg}$$

$$L = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} = \frac{162 + 163 + 161}{3} = 162 \text{ mm}$$

En total junto con el material de filtro compactado, tendremos una altura de 242 mm.

Una vez tomados estos parámetros, conectamos las tuberías flexibles a nuestra célula. Para evitar que se queden en estas tuberías y en los tubos piezométricos burbujas de aire, se decide intentar eliminarlas lo máximo posible cebando las tuberías flexibles antes de conectarlas. Este proceso hace que el aire que estaba en el interior de las conducciones sea eliminado por la parte superior de los tubos piezométricos como se muestra en la Figura 37.



*Figura 37. Burbujas en el tubo piezométrico.*

Una vez eliminadas estas burbujas de aire, podemos poner en marcha el permeámetro. Para ello en primer lugar abrimos ligeramente la llave de suministro de agua desaireada al depósito de entrada así como el orificio de purga que se encuentra en la cabeza del permeámetro que nos permitirá eliminar por completo el aire que pueda tener la instalación. A continuación abrimos las tres llaves de los tubos piezométricos y la llave situada en el inferior de la célula que da paso al agua al depósito de agua desaireada de salida. Es importante que se ajuste la cantidad de agua que le entra al sistema con la de gasto.

Dejamos fluir el agua durante 3 horas para que la muestra se sature y se estabilicen los niveles de los tubos piezométricos.



Durante estas 3 horas, realizamos pruebas de gradiente hidráulico regulando la diferencia de altura entre ambos depósitos de agua desaireada. En primer lugar se probó una gran diferencias de alturas como se muestra en la Figura 38, lo que nos aumentaba considerablemente el caudal de descarga dificultando la realización del ensayo, ya que se perdía precisión en la toma del tiempo.

Este gradiente mayor se decidió dejar durante estas 3 horas, para que la muestra quedase totalmente saturada antes de realizar el ensayo.



*Figura 38. Elevado gradiente hidráulico.*

Al final se decidió realizar el ensayo con un gradiente mucho menor, como el que se muestra en la Figura 39, que nos permitiese medir con precisión los valores.



*Figura 39. Gradiente hidráulico final.*

El procedimiento que se siguió para obtener la permeabilidad fue el siguiente:

1. Puesto que se tiene que medir el caudal de descarga, se pueden elegir dos formas de medirlo, en primer lugar fijar un tiempo y medir la cantidad de agua recogida en ese tiempo o como lo realizamos nosotros, fijando un volumen y midiendo el tiempo que tarda en medirse ese volumen.

En el laboratorio existían una gran cantidad de probetas, pero para reducir el error en la medida se decidió coger una de gran capacidad, como la indicada en la Figura 40, y fijar así el volumen en 500 ml.



*Figura 40. Probeta usada en el ensayo de permeabilidad.*

Cuando introducimos el tubo de descarga del depósito de descarga, tubo azul, en la probeta se pone en marcha un cronómetro, que nos mide el tiempo  $t$  en segundos que tarda el agua de descarga en completar esos 500 ml fijados.

2. Tras completarse el volumen fijado, se anotan las medidas de los tres tubos piezométricos,  $h_A$ ,  $h_B$  y  $h_C$  medidas en mm. Estas medidas, como podemos ver en la Figura 41, son equidistantes por lo que nos indica que la muestra del interior de la célula es homogénea como buscábamos.

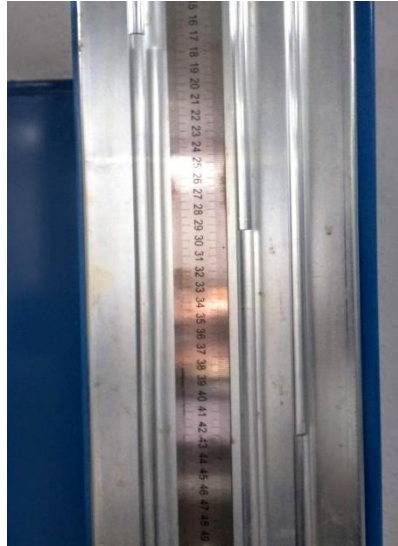


Figura 41. Medida de los tubos piezométricos.

3. Por último con ayuda de un termómetro que se encontraba en el laboratorio medimos la temperatura del agua de descarga  $T$  en grados centígrados.

Este procedimiento lo realizamos cuatro veces, para tener más medidas y así disminuir el error.

En la Tabla 10 se muestran los valores de las medidas obtenidas en el ensayo.

Tabla 10. Medidas del ensayo de permeabilidad de una arena densa.

Ensayo	Volumen de agua V (ml)	Intervalo de tiempo t (s)	Alturas piezométricas (mm)			Temperatura agua T (°C)
			$h_A$	$h_B$	$h_C$	
1	500	364	170	295	421	23
2	500	361	171	294	420	23
3	500	363	171	294	421	23
4	500	360	171	294	421	23

El coeficiente de permeabilidad lo obtendremos con la fórmula:

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

El valor del caudal,  $q$  en ml/s, lo podemos obtener dividiendo los valores del volumen de agua entre el intervalo de tiempo de la Tabla 10. De la Figura 7 podemos obtener que para una temperatura de agua de 23 °C tengamos un valor de  $R_t$  de aproximadamente 0.93. Previamente a calcular el valor del gradiente hidráulico,  $i$ , se deben a obtener dos parámetros. El primero de ellos,  $h$  en mm, sale de la resta entre los valores de  $h_C$  y  $h_A$  anotados en la Tabla 10. El segundo de ellos,  $Z$  en mm, sale de la suma de la distancia entre las dos salidas extremas de

los tubos piezométricos, estas distancias han sido aportadas por la fábrica y son de 140 mm en total. Haciendo el cociente  $h$  entre  $Z$  obtenemos el valor del gradiente hidráulico. Por último, el valor del área de la célula de permeabilidad,  $A$  en  $\text{mm}^2$ , viene de multiplicar el valor del radio de la célula al cuadrado por el número pi. De esta forma obtenemos los valores de la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados ensayo de permeabilidad de una arena densa.

Ensayo	Caudal	$R_t$	$h$	$Z$	$i$	$A$ ( $\text{mm}^2$ )	$k$ (m/s)
	$q=V/t$ (ml/s)		$h_c-h_a$ (mm)	$L_1+L_2$ (mm)	$h/Z$	$\emptyset = 75$ mm	
1	1,37	0,93	251	140	1,79	4417,86	0,00016128
2	1,39	0,93	249	140	1,78	4417,86	0,00016393
3	1,38	0,93	250	140	1,79	4417,86	0,00016238
4	1,39	0,93	250	140	1,79	4417,86	0,00016373

A partir de esos valores de  $k$  obtenemos un valor del coeficiente de permeabilidad medio que será el que usaremos a la hora de comparar este ensayo con otros de:

$$k = \frac{(1.6128 + 1.6393 + 1.6238 + 1.6373) \cdot 10^{-4}}{4} = 1.63 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Con parámetros que hemos obtenido en este punto, podemos obtener más características de nuestra muestra que no habían podido ser calculadas antes como puede ser la densidad aparente, el índice de huecos o la porosidad.

- Densidad aparente

La densidad aparente, según la norma UNE 103-403:1999, es el cociente entre la masa de muestra que tenemos en el interior de la célula y el volumen de esta. De tal forma la ecuación queda:

$$\rho_d = \frac{M_M}{V} = \frac{M_M \cdot 4}{\pi \cdot \emptyset^2 \cdot L} = \frac{1.303 \text{ kg} \cdot 4}{\pi \cdot (0.075 \text{ m})^2 \cdot 0.162 \text{ m}} = 1820.61 \text{ kg/m}^3$$

- Índice de huecos

Para calcular el índice de huecos, debemos saber la densidad relativa de la muestra ( $G_s$ ) que ha sido calculada en el apartado 3.2.2 de este trabajo, la densidad aparente ( $\rho_d$ ) calculada en el paso anterior y tomar como densidad del agua ( $\gamma_w$ )  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Así mediante la ecuación siguiente obtenemos:

$$e = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{\rho_d} - 1 = \frac{2.7 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3}{1820.61 \text{ kg/m}^3} - 1 = 0.48$$

- Porosidad

La porosidad viene expresada en función del índice de huecos ( $e$ ) del paso anterior.

$$n = \frac{e}{1 + e} = \frac{0.48}{1 + 0.48} = 0.3244 = 32.44\%$$

## 4.2 Ensayo de permeabilidad para una arena con densidad mínima

Como el laboratorio de geotecnia cuenta con dos permeámetros, mientras se realizaba este trabajo pudimos saber que con el que no estábamos trabajando con nuestra muestra, se había realizado un ensayo de permeabilidad con la misma muestra que la nuestra, como se muestra en la Figura 42, pero con un vertido a la célula distinto.



*Figura 42. Permeámetro con muestra de arena suelta.*

En este segundo permeámetro la muestra había sido vertida sin ningún tipo de compactación, con una densidad mínima, por lo que decidimos ensayar con él también y así también probar en este el depósito de descarga que habíamos instalado para ambos permeámetros, Tras revisar todo el permeámetro se observó que en las tuberías flexibles que unían la célula con los tubos piezométricos, había restos de finos de muestra como podemos ver en la Figura 43, lo que hacía que los permeámetros midieran mal y sus distancias no fuesen equidistantes. Para solucionar esto, decidimos bloquear estos puntos, y vaciar la tubería quedando así limpia y obteniendo posteriormente medidas equidistantes en los tubos piezométricos.



Figura 43. Finos en las tuberías flexibles.

Una vez solucionado este problema, se decidió ensayar con el permeámetro siguiendo el mismo procedimiento desarrollado para el ensayo de arena con densidad máxima.

Los datos medidos en este ensayo se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Medidas del ensayo de permeabilidad de una arena suelta.

Ensayo	Volumen de agua	Intervalo de tiempo	Alturas piezométricas (mm)			Temperatura agua
	V (ml)		t (s)	h <sub>A</sub>	h <sub>B</sub>	
1	500	278	170	250	313	23
2	500	273	170	251	313	23
3	500	271	170	250	314	23
4	500	272	170	251	313	23

Calculada la permeabilidad del mismo modo que para la arena de densidad máxima obtenemos los resultados de la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados obtenidos del ensayo de permeabilidad de una arena suelta.

Ensayo	Caudal	R <sub>t</sub>	h	Z	i	A (mm <sup>2</sup> )	k (m/s)
	q=V/t (ml/s)		hc-ha (mm)	L <sub>1</sub> +L <sub>2</sub> (mm)	h/z		
1	1,80	0,93	143	140	1,02	4417,86	0,00037067
2	1,83	0,93	143	140	1,02	4417,86	0,00037746
3	1,85	0,93	144	140	1,03	4417,86	0,0003776
4	1,84	0,93	143	140	1,02	4417,86	0,00037885

Para poder comparar en apartados posteriores de este trabajo el valor del coeficiente de permeabilidad,  $k$ , vamos a realizar la media de los cuatros valores obtenidos en el ensayo para una arena con densidad mínima.

$$k = \frac{(3.7067 + 3.7746 + 3.776 + 3.7885) \cdot 10^{-4}}{4} = 3.76 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

De igual forma que para el ensayo de permeabilidad con densidad máxima, vamos a obtener los valores de densidad aparente, índice de huecos y porosidad. Para obtener estos parámetros se tuvo que preguntar a la persona que vertió y realizó primero el ensayo datos como la masa de muestra ( $M_M$ ) que había en el interior de la célula de permeabilidad, obteniendo:

- Densidad aparente muestra densidad mínima

$$\rho_d = \frac{M_M}{V} = \frac{M_M \cdot 4}{\pi \cdot \phi^2 \cdot L} = \frac{1.198 \text{ kg} \cdot 4}{\pi \cdot (0.075 \text{ m})^2 \cdot 0.172 \text{ m}} = 1576.58 \text{ kg/m}^3$$

- Índice de huecos muestra densidad mínima

$$e = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{\rho_d} - 1 = \frac{2.73 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3}{1576.58 \text{ kg/m}^3} - 1 = 0.73$$

- Porosidad muestra densidad mínima

$$n = \frac{e}{1 + e} = \frac{0.73}{1 + 0.73} = 0.4220 = 42.20\%$$

## 5 Discusión de resultados

Tras realizar todos los ensayos anteriores vamos a hacer un análisis de todos los resultados obtenidos en ellos. A la hora de comparar estos resultados nos ayudaremos de datos procedentes de otros ensayos realizados en el laboratorio de geotecnia de la UPCT así como de libros del ámbito geotécnico.

En primer lugar vamos a realizar una clasificación de la muestra que hemos ensayado para ver si los resultados obtenidos son los propios de una arena. La Tabla 14 procedente de la tercera edición del libro “*Soil mechanics in engineering practice*” nos clasifica los suelos en función del tamaño de su grano. En nuestro caso, la muestra tenía un diámetro que variaba entre 0.63 mm y 0.200 mm, por lo que según el libro de Karl Terzagui tenemos un suelo del tipo “*sand medium-fine*” que traducido al castellano significa arena media-fina.

Tabla 14. Clasificación del suelo en función del tamaño de 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	

\* ASTM D422.  
(After USBR 1974).

La Tabla 15 del libro “*Mecánica de suelos*” de los autores T. William Lambe y Robert V. Whitman, nuestra muestra pertenecería por su tamaño de partículas a una arena.

Tabla 15. Clasificación del suelo en función del tamaño de grano. Fuente: *Mecánica de suelos*. Lambe y Whitman, 2005.

Bloques	> 30 cm
Bóleos (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

Del libro “*Mecánica de suelos*” del autor Peter L. Berry obtenemos la Tabla 16, que nos clasifica la muestra en función del tamaño de las partículas y según diferentes normas como la normativa británica, la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), la American Society for Testing and Materials (ASTM) y por último el sistema de clasificación unificado.

Tabla 16. Clasificación del suelo para diferentes normas en función del tamaño de grano. Fuente: *Mecánica de suelos*. Berry, 1993.

Descripción de las partículas	Tamaño de las partículas (mm)			
	Normas británicas <sup>†</sup>	AASHTO <sup>‡</sup>	ASTM <sup>§</sup>	Unificado <sup>  </sup>
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	

Para todas las normas de la tabla anterior, nuestra muestra es una arena.



Del libro “*Ingeniería Geológica*” del autor Luis I. González de Vallejo, podemos obtener la figura 44, la cual nos representa diversas curvas que corresponden a diferentes materiales. Comparando nuestra curva granulométrica, figura 15, podemos ver como la curva que más se ajusta a la nuestra sería la 2, que corresponde a una arena fina.

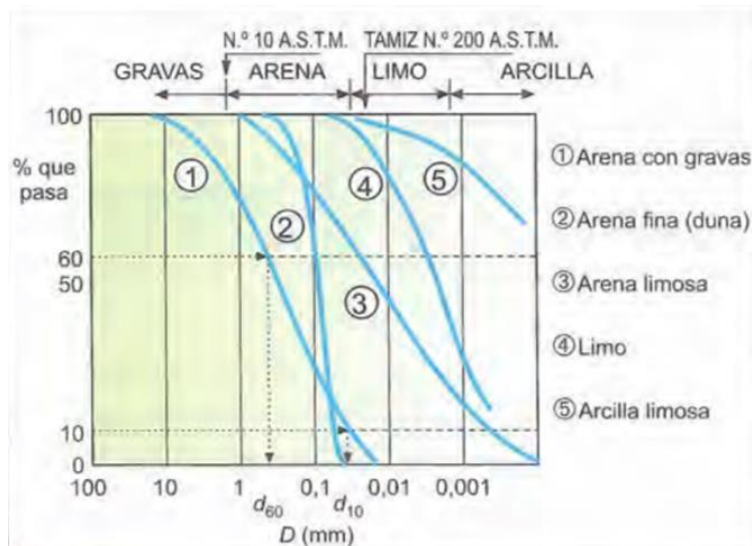


Figura 44. Curvas granulométricas para distintos materiales. Fuente: *Ingeniería Geológica*. Luis I. González de Vallejo, 2002.

Por último, del CTE-DB-SE-C obtenemos la Tabla 17 que nos clasifica nuestra muestra como una arena media.

Tabla 17. Clasificación de suelos. Fuente: Documento Básico SE-C Cimientos. 2008.

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

En segundo lugar, vamos a analizar la densidad relativa de las partículas ( $G_s$ ). En nuestro ensayo hemos obtenido para nuestra arena un valor de  $G_s$  de 2,7. Del libro “*Mecánica de suelos*” del autor Peter L. Berry obtenemos la TABLA 18. Para una arena, la tabla nos indica que su valor de  $G_s$  debe ser de 2,65 sin embargo nuestro valor es cercano pero superior, esto puede ser debido a la presencia en mayor cantidad de limo que incrementa el resultado.

Tabla 18. 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

Los siguientes datos que se van a analizar son los de densidad mínima, densidad máxima, densidad aparente, índice de huecos y porosidad. Para ello usaremos la Tabla 19 del libro “Mecánica de suelos” del autor Peter L. Berry.

Tabla 19. Propiedades típicas de algunos suelos naturales. Fuente: Mecánica de suelos. Berry. 1993.

Descripción	Porosidad $n$ (%)	Relación de vacíos $e$	Contenido de	Densidad ( $Mg/m^3$ )	
			$S_r = 1$ $w$ (%)	$\rho_d$	$\rho_s$
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

En el apartado “3.2.3 Densidad mínima de la arena” de nuestro trabajo, se obtuvo un valor de  $1.49 \text{ kg/dm}^3$ , un valor próximo al que le corresponde según la Tabla 19 a una arena uniforme suelta.

En el apartado “3.2.4 Densidad máxima de la arena” de nuestro trabajo, obtuvimos un valor de densidad para el método I de  $1.76 \text{ kg/dm}^3$  y para el método II de  $1.72 \text{ kg/dm}^3$ , ambos valores se encuentran próximos al valor de la Tabla 19 que le corresponde a arenas uniformes densas que es de  $1.75 \text{ kg/dm}^3$ , lo que nos indica que las compactaciones que se realizaron para ambos métodos fueron adecuadas.

En cuanto a la densidad aparente de la muestra del interior de la célula preparada con densidad máxima obtuvimos un valor de  $1.82 \text{ kg/dm}^3$ , dicho valor se aproxima al que plantea la tabla 19 para una arena bien graduada densa que es de  $1.86 \text{ kg/dm}^3$ . Fijándonos en esta misma tabla podemos ver como el valor,  $1.58 \text{ kg/dm}^3$  obtenido de densidad aparente para la muestra

preparada con densidad mínima, es próximo al valor que nos indica el autor que le corresponde a una arena bien gradada suelta.

El resultado obtenido del índice de huecos (e) en nuestro trabajo es de 0.48 para la muestra de densidad máxima, atendiendo a la columna de relación de vacíos de la Tabla 19 nuestra muestra se asemeja al valor de una arena uniforme densa que es de 0.51. Para la muestra preparada con densidad mínima se obtuvo un valor de 0.73, próximo al valor que indica la tabla para las arenas bien gradadas sueltas.

El último parámetro que nos permite comprar la Tabla 19 es el de porosidad (n), en nuestro trabajo su valor es de 32.44% para el ensayo con densidad máxima, que se aproxima al 30% que la tabla bibliográfica estima para una arena bien graduada densa. De igual forma, para la muestra preparada con densidad mínima se obtuvo un valor de índice de huecos del 42.20%, próximo igual que los anteriores parámetros a los de las arenas densas bien gradadas.

Por último, vamos a realizar el análisis de los resultados de permeabilidad obtenidos en los dos ensayos anteriores. Para ello vamos a utilizar datos bibliográficos, formulas teóricas como las descritas en el apartado "2.2 Porosidad, permeabilidad hidráulica y permeabilidad intrínseca" de nuestro trabajo entre otras y por último compararemos estos valores de permeabilidad con otros obtenidos con nuestra misma muestra pero con un permeámetro de carga variable.

Comenzamos por analizar los valores de permeabilidad de nuestro ensayo que son de  $1.63 \cdot 10^{-4}$  m/s para la arena preparada con densidad máxima y de  $3.76 \cdot 10^{-4}$  m/s para la arena preparada con densidad mínima. En la Tabla 20 procedente de la tercera edición del libro "Soil mechanics in engineering practice" del autor Karl Terzaghi podemos ver que nuestros valores de permeabilidad se encontrarían en el intervalo que abarca a las arenas limpias y a las gravas mixtas cuyo intervalo es de  $10^{-2}$  m/s a  $10^{-5}$  m/s, por lo que podemos confirmar que los resultados obtenidos en nuestros ensayos según este autor serían satisfactorios.

**Tabla 20. Permeabilidad y 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									

Este mismo libro, nos da en la Tabla 21 el grado de permeabilidad que tiene nuestra muestra en función del valor del coeficiente de permeabilidad,  $k$ , obtenido en nuestros ensayos. Para ambos, nuestra arena tendría un grado de permeabilidad medio.

Tabla 21. Grado de permeabilidad. Fuente: *Soil mechanics in engineering practice. Terzaghi. 1996*

Degree of Permeability	Value of $k$ (m/s)
High	Over $10^{-3}$
Medium	$10^{-3}$ to $10^{-5}$
Low	$10^{-5}$ to $10^{-7}$
Very low	$10^{-7}$ to $10^{-9}$
Practically impermeable	Less than $10^{-9}$

Si atendemos a la Tabla 22 del libro “*Ingeniería Geológica*” del autor Luis I. González de Vallejo, los valores de permeabilidad obtenidos en nuestros ensayos, 0.0163 cm/s y 0.0376 cm/s, estarían en el intervalo  $10^{-3}$  cm/s – 0.1 cm/s que corresponde a una arena bien graduada lo que nos indica que los valores obtenidos en nuestros ensayos son coherentes para una arena.

Tabla 22. Clasificación del tipo de suelo en función del grado de permeabilidad. Fuente: *Ingeniería Geológica. Vallejo. 2002.*

Tipo de suelo	$k$ (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	$\geq 1$
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	$5 \times 10^{-3}$ -0,2
Arena bien graduada (SW)	$10^{-3}$ -0,1
Arena limosa (SM)	$10^{-3}$ – $5 \times 10^{-3}$
Arena arcillosa (SC)	$10^{-4}$ - $10^{-3}$
Limo de baja plasticidad (ML)	$5 \times 10^{-5}$ - $10^{-4}$
Arcillas de baja plasticidad (CL)	$10^{-5}$ - $10^{-8}$

En el libro “*Advance Soil Mechanics*” del autor Braja M. Das, podemos encontrar la Tabla 23, los valores obtenidos en nuestros ensayos de permeabilidad que varían entre 0.163 mm/s para la muestra con densidad máxima y 0.376 mm/s para la muestra con densidad mínima, se encuentran en el intervalo  $10^{-2}$  mm/s – 10 mm/s que pertenece a un tipo de material “Fine gravel, coarse, and medium sand” que traducido al castellano significa grava fina, arena gruesa y media. Por lo que los resultados obtenidos según esta tabla son también coherentes.

Tabla 23. Clasificación del tipo de suelo en función del grado de permeabilidad. Fuente: *Advance Soil Mechanics. Braja. 2007.*

Material	Coefficient of permeability (mm/s)
Coarse	$10$ - $10^3$
Fine gravel, coarse, and medium sand	$10^{-2}$ - $10$
Fine sand, loose silt	$10^{-4}$ - $10^{-2}$
Dense silt, clayey silt	$10^{-5}$ - $10^{-4}$
Silty clay, clay	$10^{-8}$ - $10^{-5}$

El último libro bibliográfico que usaremos para analizar el valor de nuestros coeficientes de permeabilidad es “*Mecánica de suelos*” del autor Peter L. Berry. La Tabla 24 procedente de este libro nos sitúa nuestros valores de permeabilidad en los de una arena gruesa, que sería un resultado coherente tras ver los resultados de los libros anteriores.

**Tabla 24. Clasificación del tipo de suelo en función del grado de permeabilidad. 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	$> 10^{-2}$

Por último, vamos a comparar la permeabilidad obtenida por nuestros ensayos de laboratorio con las obtenidas mediante fórmulas teóricas como las de Hazen, Slichter, Terzaghi y Kozeny.

- **Fórmula de Hazen**

Esta fórmula relaciona la curva granulométrica de la muestra obtenida en el apartado “3.2.1 Curva granulométrica” con el coeficiente de permeabilidad. En su forma general la fórmula de Hazen es:

$$K = c \cdot d_e^2$$

Donde el valor que vamos a coger para  $c = 100$ , valor frecuente que se suele usar y  $d_e$  es igual al  $d_{10}$  de la curva granulométrica de nuestra muestra cuyo valor es 0.02 cm.

Por lo tanto obtenemos:

$$K = 100 \cdot 0.02^2 = 0.04 \text{ cm/s} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

El valor de la permeabilidad obtenido por la fórmula de Hazen es superior a la obtenida en los ensayos, esto creemos que es normal puesto que los valores obtenidos por estas fórmulas se suelen usar como orientativos.

- **Fórmula de Slichter**

Esta fórmula relaciona el coeficiente de permeabilidad con la porosidad y con el diámetro eficaz obtenido de la curva granulométrica.

$$K = c \cdot d_e^2 \cdot m^n$$

$D_e$  sigue siendo el valor de  $D_{10}$  de la curva granulométrica de la muestra y los valores de  $c$  y  $m^n$ , se incluyen en una única constante  $C$ , cuyos valores son función de la porosidad total como puede verse en la Figura 9, expresada como  $a = 100/C$ . Así para las porosidades obtenidas de la muestra con densidad máxima y con densidad mínima obtenemos:

- Muestra densidad máxima:  $n = 32.44\%$   $\longrightarrow a = 0.40$

$$K = 100 \cdot 0.02^2 \cdot \frac{1}{0.40} = 0.1 \text{ cm/s} = 10 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

- Muestra densidad mínima:  $n = 42.20\%$   $\longrightarrow a = 0.18$

$$K = 100 \cdot 0.02^2 \cdot \frac{1}{0.18} = 0.22 \text{ cm/s} = 22 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Los valores obtenidos por esta fórmula son elevados en comparación a los obtenidos en los ensayos con el permeámetro.

- Fórmula de Terzaghi

Este autor relaciona el valor de la permeabilidad con otros como hacían las dos fórmulas anteriores como son la porosidad total,  $m$ , y el diámetro eficaz obtenido de la curva granulométrica de nuestra muestra y además añade la forma de las partículas de la muestra.

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

Como el  $\lambda$  varía entre 800 y 460 en función de si tenemos partículas redondeadas o partículas de superficie irregular áspera respectivamente. Como en nuestra muestra no teníamos una mezcla de ambas características, pensamos que es una buena elección coger un valor de 600 intermedio. El diámetro eficaz,  $d_e$ , será el valor de  $d_{10}$  de la curva granulométrica de la muestra que es de 0.02 cm. Por último, la porosidad,  $m$ , será diferente para cada preparación de muestra.

- Muestra densidad máxima:  $m = n = 0.3244$

$$K = 600 \cdot \left( \frac{0.3244-0,13}{(1-0.3244)^{1/3}} \right)^2 \cdot 0.02^2 = 0.012 \text{ cm/s} = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

- Muestra densidad mínima:  $m = n = 0.4220$

$$K = 600 \cdot \left( \frac{0.4220-0,13}{(1-0.4220)^{1/3}} \right)^2 \cdot 0.02^2 = 0.0295 \text{ cm/s} = 2.95 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Los valores obtenidos por la fórmula de Terzaghi se aproximan bastante a los obtenidos pero son ligeramente inferiores a los obtenidos por nuestros ensayos de permeabilidad.

- Fórmula de Kozeny

Esta fórmula tiene en cuenta que la circulación del agua se dificulta al ser cada vez menores los granos por eso, introduce la superficie específica de poros ( $S$ ) contenidos en un volumen ( $V$ ).

$$K = c \cdot \left(\frac{V}{S}\right)^2 \cdot \frac{m^3}{(1-m)^2} \cdot g$$

El valor de  $c \cdot \left(\frac{V}{S}\right)^2$  se puede expresar como  $A \cdot d_e^2$  siendo  $A$  un valor que varía entre  $1/150$  y  $1/250$ . En nuestro caso cogemos un valor intermedio de  $1/200$ . El valor de  $g$  será de  $9,81 \cdot 10^4 \text{ cm/s}^2$ . De esta forma la ecuación de Kozeny queda para nuestros valores de  $m$  de la siguiente forma:

- Muestra densidad máxima:  $m = n = 0.3244$

$$K = 0.02^2 \cdot \frac{1}{200} \cdot \frac{0.3244^3}{(1-0.3244)^2} \cdot 9,81 \cdot 10^4 = 0.0147 \text{ cm/s} = 1.47 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

- Muestra densidad mínima:  $m = n = 0.4220$

$$K = 0.02^2 \cdot \frac{1}{200} \cdot \frac{0.4220^3}{(1-0.4220)^2} \cdot 9,81 \cdot 10^4 = 0.0441 \text{ cm/s} = 4.41 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Mediante esta fórmula obtenemos valores orientativos que son muy cercanos a los que hemos obtenido en los ensayos de laboratorio realizados.

A la misma vez que se realizaba este trabajo, se estaba realizando unos ensayos de permeabilidad con la misma muestra que estábamos usando en nuestro caso pero mediante el uso de un permeámetro de carga variable que también se encontraba en el laboratorio de geotecnia de la UPCT. De este ensayo pudimos tener acceso a los valores de permeabilidad obtenidos.

- Arena con densidad máxima y vertido húmedo:  $1.66 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
- Arena con densidad máxima y con vertido seco:  $1.78 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
- Arena con densidad mínima y con vertido seco:  $2.93 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

En la Tabla 25 podemos ver a modo resumen los valores de la permeabilidad teórica comparándola con los valores obtenidos en los ensayos mediante el permeámetro de carga constante de la arena densa y suelta.

**Tabla 25. Permeabilidades teóricas, obtenidas y % de error.**

<b>Autores o tipo de ensayo</b>	<b>Valor teórico medio arena densa (m/s)</b>	<b>Valor teórico medio arena suelta (m/s)</b>	<b>Valor medio de permeabilidad con arena densa (m/s)</b>	<b>Valor medio de permeabilidad con arena suelta (m/s)</b>	<b>% error arena densa</b>	<b>% error arena suelta</b>
<b>Permeámetro de carga variable</b>	0,000172	0,000293	0,000163	0,000376	5,52	22,07
<b>Soil mechanics in engineering practice. Terzaghi.</b>	0,001		0,000163	0,000376	513,50	165,96
<b>Ingeniería Geológica. Vallejo</b>	0,0001		0,000163	0,000376	38,65	73,40
<b>Advance Soil Mechanics. Braja.</b>	0,005005		0,000163	0,000376	2970,55	1231,12
<b>Mecánica de suelos. Berry</b>	0,00055		0,000163	0,000376	237,42	46,28
<b>Fórmula de Hazen</b>	0,0004		0,000163	0,000376	145,40	6,38
<b>Fórmula de Slichter</b>	0,001	0,0022	0,000163	0,000376	513,50	485,11
<b>Fórmula de Terzaghi</b>	0,00012	0,000295	0,000163	0,000376	26,38	21,54
<b>Fórmula de Kozeny</b>	0,000147	0,000441	0,000163	0,000376	9,82	17,29

En primer lugar podemos ver como los valores obtenidos mediante nuestro ensayo tienen muy poco error con los obtenidos mediante el permeámetro de carga variable. Los libros bibliográficos sin embargo la mayoría presentan grandes errores debido a que en sus tablas dan intervalos muy amplios para arenas, lo que hace que los valores difieran en gran medida. Y por último, se ha realizado la comparación con las fórmulas teóricas propuestas por los autores en las que vemos como la más reciente que modifica a la de Hazen, la fórmula de Kozeny, es la que se ajusta más a los valores obtenidos con el permeámetro de carga constante.



## 6 Conclusiones y comentarios finales

El objetivo principal de este trabajo era realizar una comparativa del coeficiente de permeabilidad en diferentes muestras preparadas con distintas densidades.

Para ello se comenzó caracterizando la muestra realizando un análisis granulométrico, del que se obtuvo la curva granulométrica de la arena. Tras realizar una cribar y quedarnos con la muestra que quedó entre los tamices de luz 0.630 mm y 0.200 mm se determinaron los valores de densidad relativa de las partículas ( $G_s$ ), densidad mínima y densidad máxima. Destacar que la densidad máxima fue calculada mediante dos métodos el primero de ellos usando el vibrador y el segundo simulando el ensayo de compactación Proctor Modificado. Los valores obtenidos en nuestros ensayos son:

Densidad relativa de las partículas ( $G_s$ ): 2.7

Densidad mínima: 1.49 kg/dm<sup>3</sup>

Densidad máxima método I: 1.76 kg/dm<sup>3</sup>

Densidad máxima método II: 1.72 kg/dm<sup>3</sup>

Para obtener la permeabilidad, se pusieron a punto los dos permeámetros de carga constante disponibles en el laboratorio, uno con una arena preparada a densidad máxima y otro a densidad mínima. Los resultados para la muestra de densidad máxima son los siguientes:

Coeficiente de permeabilidad ( $K$ ):  $1.63 \cdot 10^{-4}$  m/s

Densidad aparente ( $\rho_d$ ): 1.82 mg/m<sup>3</sup>

Índice de huecos ( $e$ ): 0.48

Porosidad ( $n$ ): 0.3244 (32.44%)

Los resultados para la muestra de densidad mínima son los siguientes (dos decimales):

Coeficiente de permeabilidad ( $K$ ):  $3.76 \cdot 10^{-4}$  m/s

Densidad aparente ( $\rho_d$ ): 1.58 mg/m<sup>3</sup>

Índice de huecos ( $e$ ): 0.73

Porosidad ( $n$ ): 0.4220 (42.20%)

Estos valores de permeabilidad obtenidos se compararon con datos bibliográficos y con otros obtenidos mediante fórmulas experimentales teóricas y ensayos con el permeámetro de carga variable en la siguiente tabla.

Autores o tipo de ensayo	Valor teórico medio arena densa (m/s)	Valor teórico medio arena suelta (m/s)	Valor medio de permeabilidad con arena densa (m/s)	Valor medio de permeabilidad con arena suelta (m/s)	% error arena densa	% error arena suelta
<b>Permeámetro de carga variable</b>	$1,72 \cdot 10^{-4}$	$2,93 \cdot 10^{-4}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-4}$	5,52	22,07
<b>Soil mechanics in engineering practice. Terzaghi.</b>	$10 \cdot 10^{-4}$		$1,63 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-4}$	513,50	165,96
<b>Ingeniería Geológica. Vallejo</b>	$1 \cdot 10^{-4}$		$1,63 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-4}$	38,65	73,40
<b>Advance Soil Mechanics. Braja.</b>	$50,05 \cdot 10^{-4}$		$1,63 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-4}$	2970,55	1231,12
<b>Mecánica de suelos. Berry</b>	$5,5 \cdot 10^{-4}$		$1,63 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-4}$	237,42	46,28
<b>Fórmula de Hazen</b>	$4 \cdot 10^{-4}$		$1,63 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-4}$	145,40	6,38
<b>Fórmula de Slichter</b>	$10 \cdot 10^{-4}$	$22 \cdot 10^{-4}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-4}$	513,50	485,11
<b>Fórmula de Terzaghi</b>	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,95 \cdot 10^{-4}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-4}$	26,38	21,54
<b>Fórmula de Kozeny</b>	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$4,41 \cdot 10^{-4}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-4}$	9,82	17,29

En general se obtuvieron valores del mismo orden de magnitud para el permeámetro de carga variable y para la fórmula teórica más reciente como es la de Kozeny. El resto de fórmulas teóricas así como los intervalos propuestos por diferentes libros del ámbito geotécnico difieren más. El motivo de estos errores mayores es en el caso de las fórmulas teóricas la dependencia de valores objetivos y para los libros bibliográficos el error puede venir en que los autores presentan en las tablas de sus libros intervalos muy amplios para el valor de la permeabilidad de la arena ya que no diferencian si son arenas densas o sueltas de ahí que los errores para estos sean mayores.

Para finalizar, se han construido tres figuras que nos representan con los valores obtenidos en el laboratorio, como varía el coeficiente de permeabilidad con la densidad aparente, con el índice de huecos y con la porosidad de la muestra respectivamente.

La Figura 45, nos enseña como a medida que disminuye la densidad aparente de la muestra ( $\rho_d$ ), el coeficiente de permeabilidad (K) aumenta y viceversa.

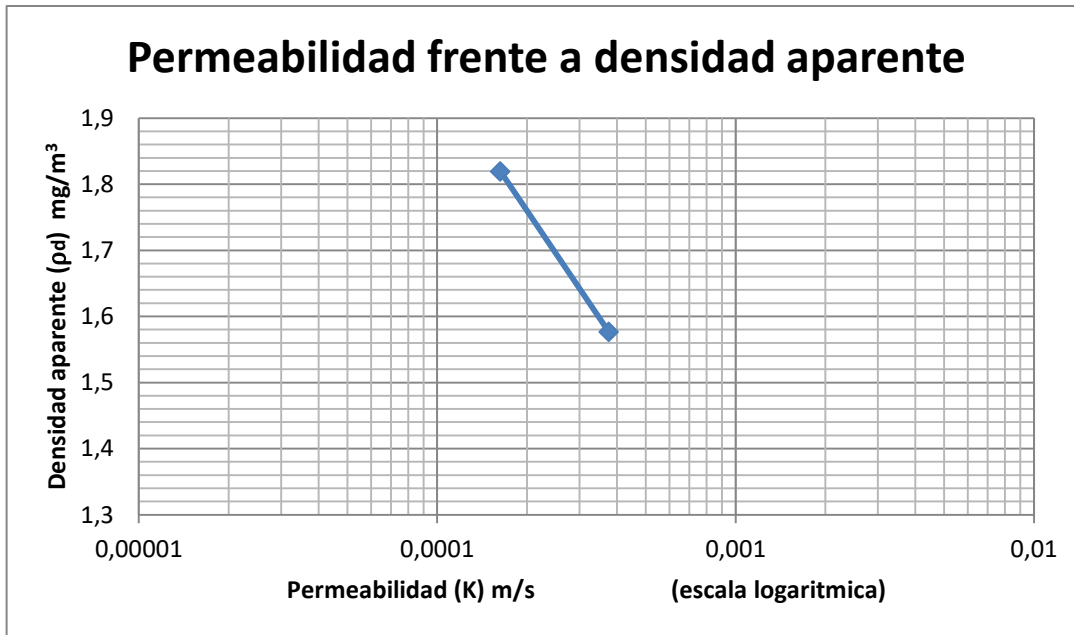


Figura 45. Gráfica permeabilidad frente a densidad aparente.

La permeabilidad (K) frente al valor del índice de huecos (e) de la muestra se representa en la Figura 46. Como podemos ver la permeabilidad y el índice de huecos tienen una relación directa, ya que a medida que aumenta uno aumenta el otro.

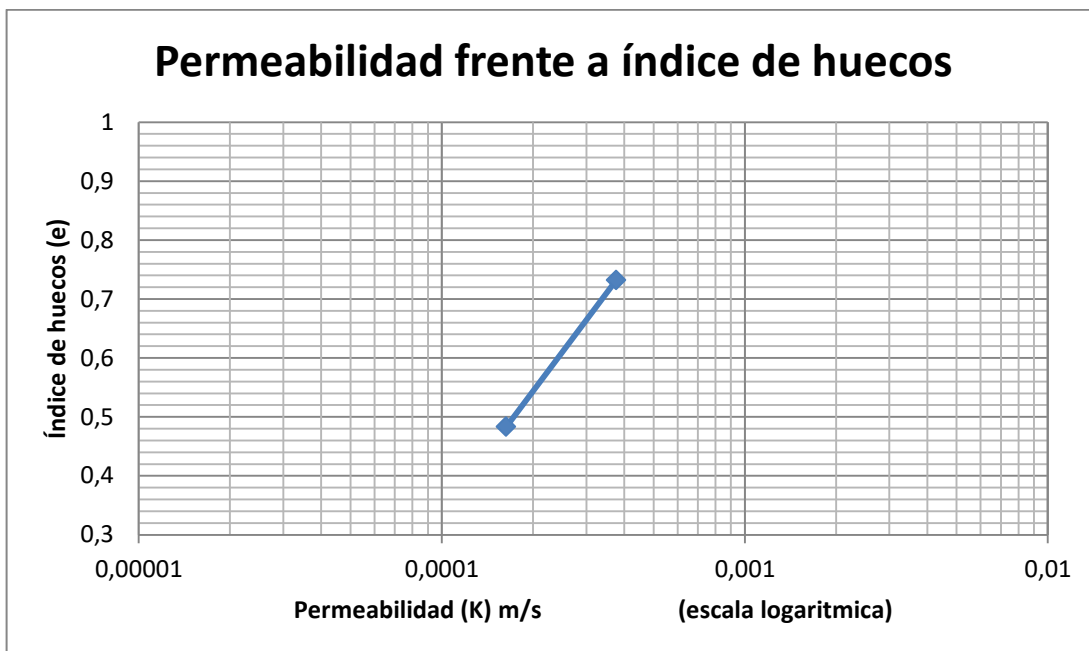


Figura 46. Gráfica permeabilidad frente a índice de huecos.

Por último, la Figura 47 nos relaciona el valor de la permeabilidad (K) con la porosidad (n) de la muestra. Vemos como la porosidad al igual que pasaba con el índice de huecos muestra una relación directa con la permeabilidad, ya que a medida que aumenta el valor de la porosidad aumenta el de la permeabilidad.

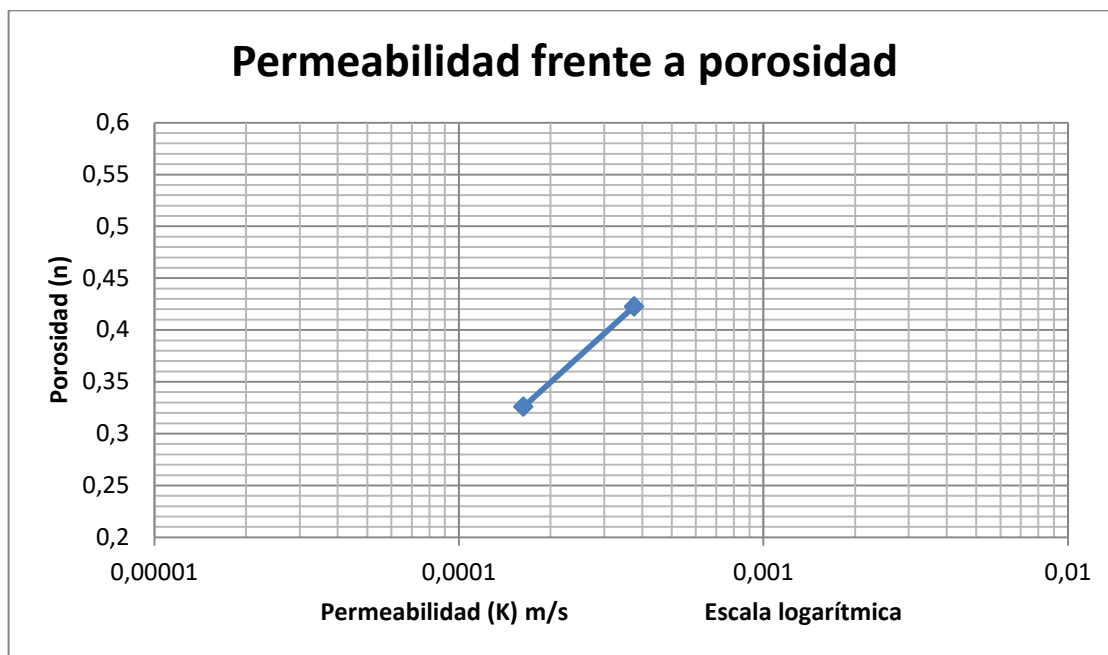


Figura 47. Gráfica permeabilidad frente a porosidad.

## 7 Referencias

- TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. Soil Mechanics in Engineering Practice. Third Edition. John Wiley & Sons Inc. New York, 1996. ISBN 0-47108658-4.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis Ignacio. Ingeniería Geológica. Mercedes Ferrer Gijón, Luis Ortuño Abad, y Carlos Oteo Mazo. Pearson Educación, Madrid, 2002. ISBN: 84-205-3104-9.
- 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.
- BRAJA, M.Dans. Advanced Soil Mechanics. Third Edition. Taylor & Francis e-Library, Abingdon, UK, 2007. ISBN 0-203-93584-5.
- 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.
- CUSTODIO, Emilio; LLAMAS, Manuel Ramón. Hidrología Subterránea (Tomo 1). Editorial Omega, Barcelona, España, 1976. ISBN: 84-282-0447-0.
- W. David Carrier. Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. November 2003. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:11(1054)
- 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. Ensayo de compactación, proctor modificado. UNE 103 501. Madrid, España, 1994.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad. UNE-EN 1097-3. Madrid, España, 1999.

- 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 103-10693. Madrid, España, 1993.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. Determinación de la densidad máxima de una arena por el método del apisonado. Erratum. UNE 103-10693. Madrid, España, 1993.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. Determinación de la permeabilidad de una muestra de suelo. Método de carga constante. UNE 103 403. Madrid, España, 1999.
- Código Técnico de la Edificación (CTE) Documento Básico de seguridad estructural de cimientos, CTE-DB-SE-C.

