

Puesta en funcionamiento del
permeámetro de carga variable, un
equipo de laboratorio para ensayos de
permeabilidad en suelos cohesivos.

Alumno: Óscar Yelo Díaz

Director: Gonzalo García Ros

Codirector: Iván Alhama Manteca

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a mi familia que siempre ha estado ahí cuando los he necesitado y que me han ayudado a lo largo de mi vida. A mis compañeros y amigos del grado, que han sido un gran apoyo estos cuatro años, especial mención a “Noche”.

Agradecer también al director de este trabajo, Gonzalo García Ros, por su inestimable ayuda siempre que se la he pedido, también al codirector, Iván Alhama Manteca, por ofrecerme la oportunidad de realizar este trabajo con el ofrecimiento de la Beca de colaboración-formación. Finalmente, agradecer la ayuda de Calixto, técnico del laboratorio de geotecnia de la UPCT y a Juan del taller mecánico.

Gracias.

Índice

1. Introducción y objetivos	1
2. Fundamentos teóricos y normativa	2
2.1 Concepto de permeabilidad	2
2.2 Coeficiente de permeabilidad	3
2.3 Ley de Darcy	3
2.4 Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad del suelo	5
2.5 Permeámetro de carga variable	6
2.6 Normativa	10
2.6.1 Introducción y problemática	10
2.6.2 Pliego de preinscripciones técnicas generales de materiales ferroviarios	11
2.6.2.1 Materiales y aparatos	11
2.6.2.2 Preparación de la muestra	12
2.6.2.3 Procedimiento operativo	13
2.6.3 Normativa brasileña (NBR 14545)	19
3. Puesta a punto del permeámetro de carga variable	23
3.1 Estado inicial del permeámetro	23
3.2 Puesta a punto	24
3.3 Despiece	25
4. Guía de uso del permeámetro de carga variable	29
5. Ensayos de permeabilidad	35
5.1 Prueba de estanqueidad	35
5.2 Ensayos con arena	36
5.2.1 Material a ensayar	36
5.2.2 Ensayo de permeabilidad con arena seca suelta	37
5.2.3 Ensayo de permeabilidad con arena seca compacta	40
5.2.4 Ensayo de permeabilidad con arena húmeda compacta	43
5.3 Ensayo con limo	45
5.3.1 Material a ensayar	45
5.3.2 Ensayo de permeabilidad con limo húmedo compacto	48
6. Conclusiones	52
7. Referencias	53

1. Introducción y Objetivos

Este trabajo surge a raíz de la concesión de una Beca de Colaboración-Formación por parte de la Universidad Politécnica de Cartagena. Esta beca ofrecía la posibilidad de compaginar el trabajo de fin de grado con la puesta a punto del permeámetro de carga variable, un equipo de laboratorio cuyo cometido es el cálculo de la permeabilidad de los materiales frente al paso de un fluido a través de ellos. El ensayo con esta máquina es uno de los métodos directos para el cálculo de esta propiedad del terreno, con un procedimiento similar al permeámetro de carga constante. Sin embargo, en el de carga variable trataremos con terrenos cohesivos, pues en este caso el de carga constante pierde precisión.

El laboratorio de geotecnia de la Escuela de Ingeniería Civil y Minas cuenta con dos permeámetros de carga constante en activo a la hora de realizar dichos ensayos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad. También cuenta con una célula de Rowe, si bien es cierto que este método es muy tedioso y esto hace que no sea común usarlo con ese fin. Por último, nos encontramos con nuestro permeámetro de carga variable, que pese a ser un aparato más preciso que los de carga constante, no es un ensayo que este muy normalizado y comúnmente se tiende a usar los otros, por ser unos procedimientos cuyos procesos están bien marcados en la normativa vigente.

Partimos de una situación en la que la última vez que se usó este permeámetro fue hace seis años con una arcilla y cuyos resultados desconocíamos a la hora de recuperar el aparato, montado a la izquierda de los de carga constante. El permeámetro se encontraba bastante deteriorado debido al paso del tiempo y debido al hecho de contener aun la muestra de dicho ensayo, que como más tarde descubriríamos, había dañado el interior del molde. Todo esto lo describiremos más detalladamente en la puesta a punto.

Los objetivos de este trabajo son sobre todo la restauración del aparato y de cada una de sus piezas y su puesta a punto, sustituyendo o comprando las piezas que no se puedan recuperar, para entonces poder poner en funcionamiento el dispositivo y poder realizar ensayos de cálculo del coeficiente de permeabilidad en diferentes tipos de terrenos. Para ello habremos de cumplir con objetivos previos o secundarios que son repasar la teoría y los fundamentos geotécnicos en los que se sustentan los ensayos que realizaremos o conocer el funcionamiento del permeámetro de carga variable y sus aplicaciones.

Una vez finalizado este trabajo esperamos que esta máquina vuelva a ser parte activa del laboratorio y queden fijados una serie de procedimientos a modo de guía y siguiendo la normas que vamos a usar, tanto la normativa brasileña NBR, como el “Pliego de preinscripciones técnicas generales de materiales ferroviarios” para así, poder ser de ayuda tanto en la docencia del área como en el asesoramiento a entidades externas.

2. Fundamentos teóricos y Normativa

2.1 Concepto de permeabilidad

Se define como la capacidad que posee un material a la hora de que un fluido lo atraviese sin producir cambios en su estructura interna. Podemos observar un amplio rango de permeabilidades en los distintos materiales, pero podremos catalogarlos de una manera genérica en permeables, si lo atraviesa una cantidad de fluido apreciable en un tiempo dado o impermeable si esta es despreciable. La permeabilidad como tal, dependerá de los siguientes factores, tanto del propio terreno como del fluido:

- La granulometría, que es la distribución de los tamaños de los granos del suelo. A mayor tamaño de grano mayor permeabilidad.
- La densidad del suelo, de la misma forma que la granulometría, cuanto más denso sea un terreno, menos huecos y, por lo tanto, más difícil lo tendrá el fluido para atravesarlo y por consiguiente menor permeabilidad.
- La forma y la orientación de las partículas, ya que esta característica puede variar también con la dirección del flujo.
- El grado de saturación del propio suelo, que es la relación entre el volumen de agua y el de huecos en el propio terreno. A mayor saturación, mayor será la permeabilidad.
- También las características del propio fluido influirán en la permeabilidad. Estas son la viscosidad, influida por la temperatura o la presión a la que se encuentre sometido el mismo.

Si separamos estos puntos en características del terreno y características del fluido, tenemos dos tipos de permeabilidades:

- La permeabilidad que está influida tanto por las características texturales del medio físico como por las del fluido, la llamamos permeabilidad efectiva o conductividad hidráulica y es representada por el coeficiente de permeabilidad, representado por la letra k , que veremos en la siguiente ecuación.
- La denominada permeabilidad intrínseca, K , es sólo dependiente de las características internas del medio permeable o terreno.
- La permeabilidad intrínseca y la permeabilidad efectiva se relacionan únicamente por los parámetros capaces de definir las características del fluido, quedando de la siguiente manera la expresión:

$$k = \frac{K \cdot \gamma_w}{\mu}$$

Siendo:

- k = Permeabilidad efectiva o coeficiente de permeabilidad (cm/s)
- K = Permeabilidad intrínseca
- γ_w = Peso específico del agua (N/cm³)
- μ = Viscosidad dinámica del fluido (dina·s/cm³)
- g = Aceleración de la gravedad (cm/s²)

2.2 Coeficiente de permeabilidad

Es el parámetro que utilizaremos para medir esta propiedad, está estrechamente relacionado con la Ley de Darcy, de hecho, fue enunciado por primera vez por Darcy en 1856. Sus unidades son de velocidad (m/s, m/día o cm/s) pues al final podemos definirla como la velocidad del flujo producida por un gradiente hidráulico unitario y es seguramente el parámetro hidráulico que registra mayores variaciones dependiendo del tipo de terreno. Podemos ver algunos de los valores de este parámetro para diferentes tipos de terrenos en la tabla que se adjunta a continuación.

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

Rangos habituales de permeabilidades para distintos tipos de suelo (Vallejo, 2002)

2.3 Ley de Darcy

Esta ley fue descubierta por Henry Darcy, que fue un ingeniero de Puentes y Caminos francés y de gran importancia en ciudades como Paris o Dijon y para el avance de la hidráulica moderna. Sus trabajos sobre la permeabilidad se desarrollaron en la

universidad de Paris entre 1850 y 1856, año en el que se publica un tratado sobre las fuentes públicas de Dijon en el que aparece por primera vez la fórmula que estamos estudiando y que lleva su nombre.

Lo primero que cabe destacar es que la Ley de Darcy solo es aplicable en régimen de flujo laminar, que quiere decir que las líneas de flujo no interfieren unas con otras. Para evaluar si el régimen es laminar utilizamos el número de Reynolds, que representa la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas en un fluido, un valor del número de Reynolds comprendido entre uno y diez indica un régimen laminar en el que puede considerarse aplicable la ley de Darcy, aunque es particularmente fiable para valores inferiores a cuatro.

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

Siendo:

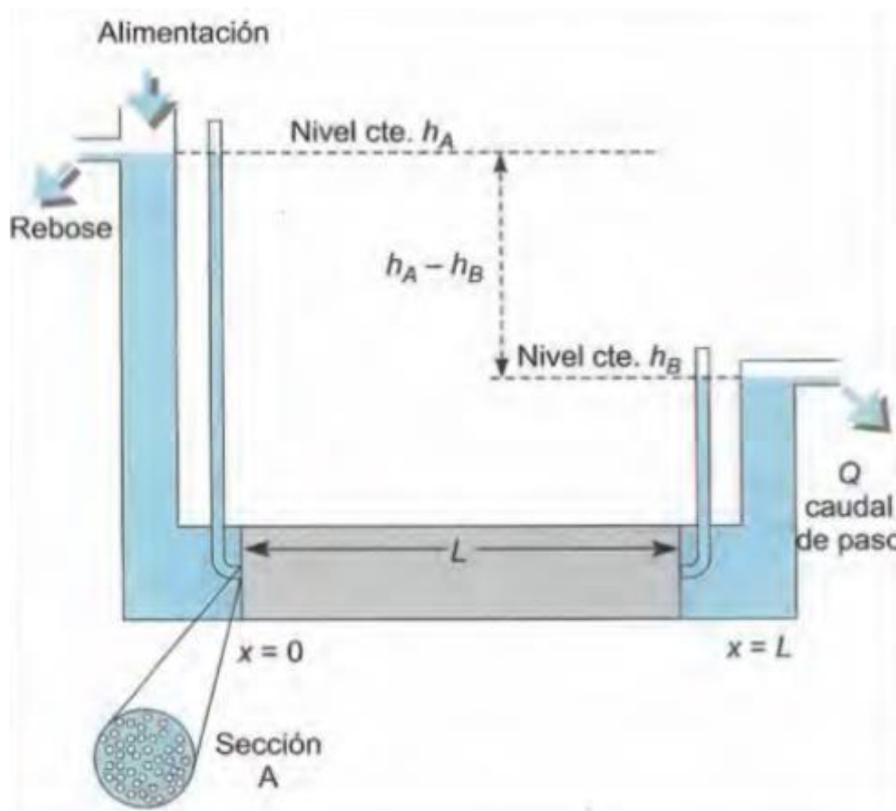
- ρ = Densidad del fluido (g/cm^3)
- v = Velocidad del fluido (cm/s)
- d = Tamaño medio de las partículas. d_{50} medios granulares y $2e$ en medios fisurados, siendo e el ancho medio de las fisuras (cm)
- μ = Viscosidad dinámica ($dina \cdot s/cm^2$)

El número de Reynolds no tiene unidades, o lo que es lo mismo, es adimensional. Aunque esto no quiere decir que para su cálculo no tengamos que utilizar unidades homogéneas.

Retomando la ley de Darcy, describe, basándose en el método empírico, las características del movimiento del agua a través de un medio poroso. La expresión matemática define que el caudal que atraviesa la muestra es proporcional al área de la sección transversal del medio permeable que atraviesa, normal al flujo, y al gradiente de niveles piezométricos entre la entrada y la salida del flujo en el medio permeable, i . La constante de proporcionalidad es la permeabilidad del medio en forma de coeficiente de permeabilidad.

La expresión es la siguiente:

$$Q = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A = k \cdot i \cdot A$$



Explicación gráfica de la ley de Darcy (Vallejo, 2002)

Siendo:

- Q = Caudal (m^3/s)
- L = Longitud de la muestra de terreno (m)
- k = Coeficiente de permeabilidad (m/s)
- A = Área de la sección transversal (m^2)
- Δh = Incremento de alturas (m)
- i = Gradiente hidráulico

2.4 Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad del suelo

Hay numerosos procedimientos para la determinación de la permeabilidad del terreno. Unos directos, que deben su nombre al hecho de que se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de dicho coeficiente y otros indirectos ya que la obtención del coeficiente se obtiene de manera secundaria, pues las pruebas y técnicas realizadas persiguen otros objetivos.

a) Directos:

1. Permeámetro de carga constante.

2. **Permeámetro de carga variable.**
3. Prueba directa de los suelos in situ.

b) Indirectos:

1. Cálculo a partir de la curva granulométrica.
2. Cálculo a partir de la prueba de consolidación, por ejemplo con la célula de Rowe.
3. Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad.

En este trabajo nos centraremos en el estudio y análisis del permeámetro de carga variable.

2.5 Permeámetro de Carga Variable

Este aparato lo usaremos para determinar el coeficiente de permeabilidad (k) en suelos finos, como pueden ser arenas finas, limos o arcillas. En estos suelos el flujo de agua es tan pequeño que el permeámetro de carga constante no es lo suficientemente preciso.

El esquema básico de un permeámetro de carga variable es el siguiente; tras la enumeración veremos en la figura de la norma brasileña el esquema de una variante:

- Una bureta graduada que nos sirva para medir las fluctuaciones del nivel y de la que también debemos conocer el área a la hora de realizar los cálculos. Esta irá unida de alguna manera a un soporte.
- Un tubo alimentador que sirva de entrada de agua al cuerpo del permeámetro y que conecte este con la bureta.
- El cuerpo o molde donde se encuentre la muestra de terreno ubicada de tal forma que quede entre dos materiales en forma de filtro que mantengan los tubos y las salidas del molde limpios y sin obstrucciones, como molde es común usar el del ensayo proctor para la compactación
- Una salida, en forma de tubo cuyas dimensiones son conocidas también, que lleve el agua que atraviese la muestra a un depósito que cuente con rebosadero y cuyo nivel constante sea conocido.
- Si bien es cierto que en el mercado existen una amplia gama de dispositivos que pueden variar en mayor o menor grado esta disposición.

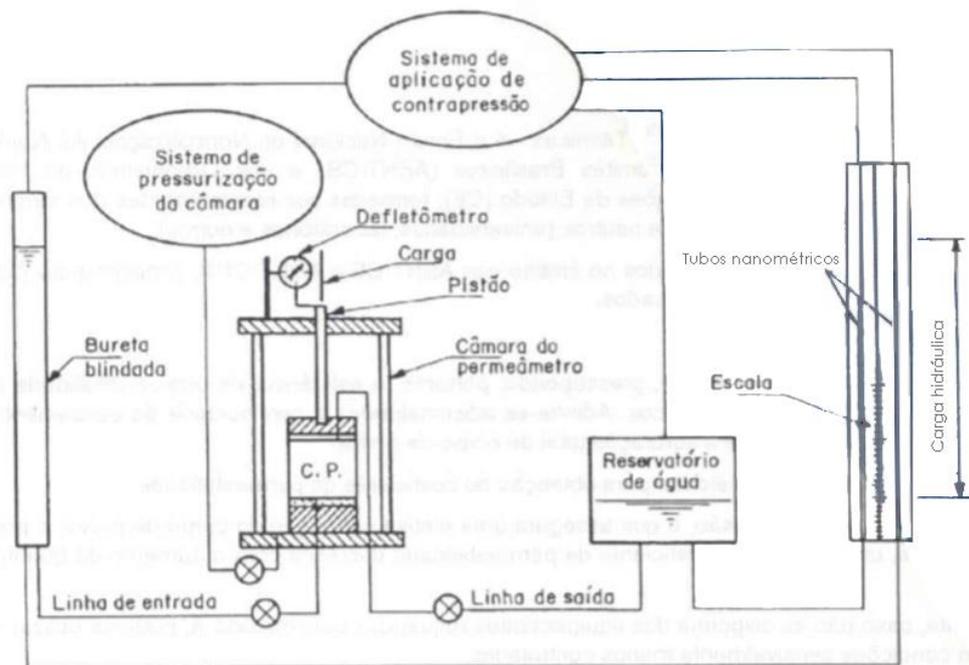
Puesta en funcionamiento del permeámetro de carga variable, un equipo de laboratorio para ensayos de permeabilidad en suelos cohesivos.

Óscar Yelo Díaz

- En este tipo de permeámetros mediremos la cantidad de agua que atraviesa la muestra de terreno por la diferencia de niveles en la bureta previa al tubo alimentador.



Componentes del permeámetro de carga variable que tenemos



Elementos de un ensayo de permeabilidad con cabeza variable. Método A (NBR 14545)

A la hora de los cálculos, lo primero será conocer la diferencia de nivel en la bureta para un período de tiempo dado, que multiplicado por el área de la misma bureta, nos dará el caudal que entra en el permeámetro.

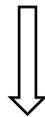
$$Q_{in} = -a \cdot \frac{dh}{dt}$$

Nos interesa ahora el cálculo del caudal que sale del cuerpo del permeámetro que será el área de la muestra multiplicada por la altura de la muestra de terreno (h) partida de la longitud de la misma muestra y multiplicada también por el término que estamos buscando, el coeficiente de permeabilidad.

$$Q_{out} = A \cdot k \cdot i = A \cdot k \cdot \frac{h}{L}$$

Tendremos que suponer la estanqueidad del aparato, esta prueba será la primera en realizar a la hora de los ensayos de laboratorio. Con esta hipótesis, el caudal que entra será el mismo que el caudal que salga. A partir de aquí podremos ir igualando y sustituyendo para ir solucionando la ecuación.

$$Q_{in} = Q_{out}$$



$$-a \cdot \frac{dh}{dt} = A \cdot k \cdot \frac{h}{L}$$

Separamos los diferenciales y los integramos para los diferentes tiempos y alturas.

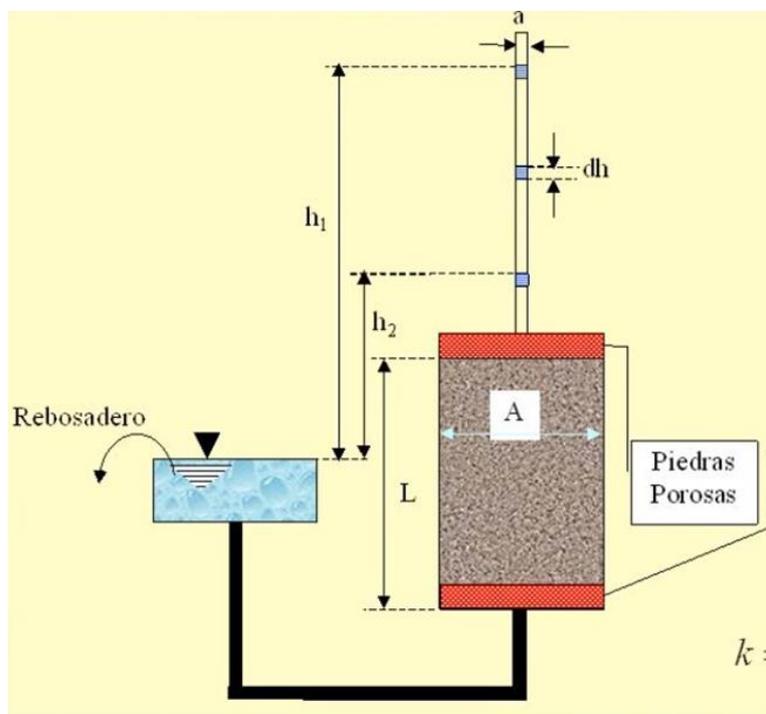
$$-a \cdot \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = \frac{A \cdot k}{L} \cdot \int_{t_0}^{t_1} dt$$

Operamos las integrales y despejamos el coeficiente de permeabilidad k , que al final es lo que pretendemos con este experimento.

$$k = \frac{L \cdot a}{A \cdot (t_1 - t_0)} \cdot \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right) = 2.3 \cdot \frac{L \cdot a}{A \cdot (t_1 - t_0)} \cdot \log \left(\frac{h_0}{h_1} \right)$$

Siendo:

- Q_{in} = Caudal entrante (m^3/s)
- Q_{out} = Caudal saliente (m^3/s)
- L = Longitud de la muestra de terreno (m)
- k = Coeficiente de permeabilidad (m/s)
- A = Área de la sección transversal de la muestra (m^2)
- dh = Diferencia de alturas (m)
- dt = Diferencia de tiempos (s)
- i = Gradiente hidráulico
- h_i o t_i = altura o tiempo en un momento determinado



Simplificación del funcionamiento de un permeámetro carga variable.

2.6 Normativa

2.6.1 Introducción y problemática

Para este ensayo, a la hora de encontrar una normativa oficial vigente a la que ceñirse para su realización, presenta una cantidad notable de problemas. Esto quiere decir que además de no estar recogida en la norma UNE, a diferencia del ensayo de permeabilidad con el permeámetro de carga constante, tampoco existe una norma específica en la normativa americana, tanto en la ASTM (*American Society of Testing Materials*) como en la AASTHO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). Estas dos últimas hacen referencia al ensayo de permeabilidad con permeámetro de carga variable pero siempre mediante la norma que explica el ensayo con el aparato de carga constante. Serían la ASTM D2434 y la AASTHO T215. Ni siquiera en la norma británica, la British Standard, encontramos nada relevante en torno a este experimento que queremos realizar.

Por otra parte, hemos encontrado algunos manuales o normas que sí que contienen información sobre este ensayo y en los cuales nos vamos a apoyar a la hora de la realización de este. Una de las que hemos encontrado sería la normativa brasileña, más específicamente en la NBR 14545, a la cual llegamos a través de la lectura de un artículo, " *Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes*" de Gerson F.B. Sandoval. El otro manual que, pese a contener información sobre el ensayo, hemos descartado, es el " *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*" de Joseph E. Bowles. Este último era excesivamente sencillo pues era a nivel de prácticas para asignaturas universitarias y de alguna manera reincidía en recurrir demasiado al ensayo de carga constante.

Finalmente, hemos decidido basar nuestro ensayo tanto en el procedimiento explicado en " *Pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios*" como en la norma brasileña, el primero es el que usan en ensayos de esta índole en la empresa Laboratorios Horysu, ubicada en el polígono Cabezo Beaza de Cartagena. Este pliego explica el procedimiento para analizar tanto el balasto como el subbalasto, si bien sirve perfectamente para el análisis de la permeabilidad de otro tipo de terrenos como los que hemos usado en el laboratorio de la universidad. Nos apoyaremos un poco más en la normativa brasileña para acabar dando unos resultados válidos.



Principales normas en ensayos de este ámbito

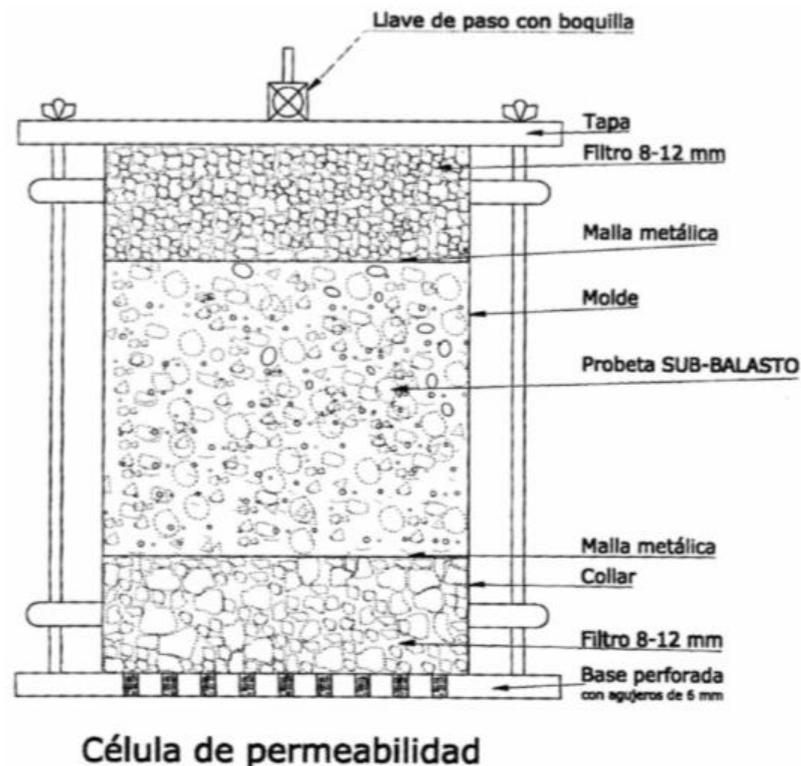
2.6.2 Pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios

2.6.2.1 Material y aparatos

El permeámetro, que consta de:

- Un cuerpo de célula, una base perforada, una tapa superior y varillas tensoras con tuercas de mariposa. El cuerpo de célula consta a su vez de un molde y un collar metálicos, similares a los del ensayo CBR. En la base instalaremos una junta de goma, del mismo diámetro que el collar, de profundidad y espesor suficientes para que dicho collar pueda encajar herméticamente en la placa perforada. La tapa consistirá en una base de compactación similar a la que se usa para el ensayo de Proctor Modificado, además tendrá un disco espaciador muy parecido a la placa perforada de la base. A dicha base se le habrá eliminado la rosca de los agujeros por los que han de pasar los tiradores; también irá provista de un cajeado circular con junta de goma para que el molde pueda encajar herméticamente y además se habrá instalado en su centro una llave de paso con boquilla roscada adecuada para conectar un tubo transparente de goma o plástico de ϕ 6 o ϕ 8 mm, aproximadamente. Cerca de la llave podrá llevar una válvula para purgar el aire. Además, tanto antes de la placa perforada de la base como del disco espaciador de la tapa, añadiremos una malla de alambre de acero inoxidable o nylon de 2 mm de luz.
- Saliendo del cuerpo, una tubería de goma o plástico transparentes de ϕ 6 o ϕ 8 mm, aproximadamente, como ya hemos mencionado. Un tubo de vidrio en forma de “Y” para insertar en el tubo anterior.
- Pinzas de estrangulamiento tipo Hoffman, nosotros nos aseguraremos del enlace poniendo bridas si hiciera falta.
- Una bureta de 50 ml con llave de paso. Con herramientas adecuadas se cortará la parte cónica en que acaba el tramo de tubo que va a continuación de la llave, con objeto de evitar el estrechamiento a la salida de dicha bureta y aumentar el caudal de vaciado.
- A la salida del permeámetro necesitaremos un recipiente donde verter el agua y cuyo nivel sea constante, por lo que adecuaremos un rebosadero en el recipiente. En el pliego citan un tanque de plástico de unos 10 litros de capacidad, con grifo inferior y boquilla para conectar la tubería de goma o plástico, pero el fin es el mismo.
- Soporte trípode de aro plano.
- Termómetro.

- Cronómetro digital con lectura de centésimas de segundo y que disponga de la función de poder tomar dos lecturas de tiempo consecutivas en un mismo recorrido.
- Aparato para producir agua desaireada.
- Base de compactación del molde indicada en la norma UNE 103 501:1994, para el ensayo Proctor Modificado, nosotros lo sustituiremos compactando el material dentro del cuerpo siguiente o bien el método Proctor o el Proctor Modificado.
- Nuestro aparato es muy parecido, si bien tiene algunas diferencias que podremos apreciar a la hora de hacer el ensayo, como la ausencia de filtros del propio terreno o la base perforada, sustituida por un disco espaciador perforado y una válvula de salida en la misma base.



2.6.2.2 Preparación de la muestra

El procedimiento es el mismo que el del apartado 6 de la norma UNE 103 501:1994. En lugar de los 35 kg de material que pasa por el tamiz 20 mm UNE se utilizarán solo unos 12 kg y se dividirán por cuarteo en dos porciones homogéneas, aproximadamente iguales.

Esta norma UNE 103 501 nos ayuda en nuestro ensayo de esta manera:

Sí el suelo recibido está excesivamente húmedo, se extiende y se deja secar al aire o bien se procede a su secado en estufa o por aire caliente u otro procedimiento, tomando la precaución de que la temperatura del suelo no exceda de 60°C. Una vez conseguido esto, se procede a desmenuzarlo, deshaciendo los bloques que pudieran quedar por medio de un mazo, generalmente de goma.

En este punto la norma habla de pasar el material por una serie de tamices de entre 5 y 20 mm pues el material utilizado en esta adaptación es el subbalasto.

Nosotros vamos a intentar ajustarnos en la medida de lo posible a este procedimiento, pero siempre de manera realista a nuestras posibilidades, nuestra muestra será más pequeña que los 12 kg que se indican en el pliego y los tamices no serán necesarios pues trataremos con un limo y con arenas, que damos por hecho que el 100% de la muestra pasa por el tamiz de 5 mm y 20 mm.

Además, caracterizaremos la muestra de limos haciéndole la granulometría para que, en un futuro, cuando se use en el laboratorio, las personas puedan trabajarla siendo conocedores de esta.

2.6.2.3 Procedimiento operativo

Al final de este procedimiento adjuntamos las figuras que describen el equipo y la célula usada para este ensayo.

Lo primero será **montar la célula**, aquí vamos a sustituir la palabra subbalasto que sale en el Pliego por la palabra terreno, más genérica y que se adapta a nuestro trabajo:

- 1) Calcular el diámetro medio (D) del molde, midiendo con el calibre en tres direcciones diferentes y obteniendo la media con precisión de 0,1 mm.
- 2) Determinar la masa en gramos (m) del molde sin el collar, con precisión de 1 g.
- 3) Acoplar el molde a la base de compactación del Proctor Modificado y se introduce el disco espaciador. Se mide la altura (L) de la probeta desde el disco espaciador hasta el borde superior del molde, con precisión de 1 mm.
- 4) Se mide la humedad del terreno (w_0) y se toma una de las dos porciones a la que añadimos la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima (w_{op}). A continuación, se mezclan el terreno y el agua íntimamente. Proceder a la compactación con la mayor rapidez posible.
- 5) Compactación. Llenar el molde con el collar colocado, mediante la porción de terreno mezclada con agua, repartida en cinco capas aproximadamente iguales, de forma que cada capa, después de compactada, quede con una altura ligeramente superior a un quinto de la

altura del molde. La compactación de cada una de estas capas se realiza por medio de 60 golpes de la maza, distribuidos uniformemente. La última capa compactada debe entrar aproximadamente 1 cm en el collar superior. El molde debe colocarse sobre una base suficientemente rígida, para que no amortigüe los golpes.

- 6) Terminada la compactación se retira el collar y se enrasa cuidadosamente el terreno con el borde del molde. Se retiran también la base de compactación y el disco espaciador.
- 7) Se determina la masa en gramos (m_1) del conjunto formado por el molde y el terreno compactado.
- 8) Se coloca el collar otra vez. Sobre la superficie del subbalasto se coloca un círculo hecho con malla de acero de 2 mm de luz (En nuestro caso esta malla tendrá una luz de 0.106 mm ya que trabajamos con suelos mucho más finos que el subbalasto), del mismo diámetro interno que el molde. A continuación, se rellena el collar, hasta el borde y sin compactar, con un filtro fabricado con grava de tamaños entre 8 y 12 mm, que puede obtenerse a partir de otra porción de la misma muestra. Se coloca la base perforada, sobre el collar, y se ajusta todo el bloque haciendo pasar las varillas tensoras por las asas del collar y del molde y apretando después las tuercas de mariposa.
- 9) Se da la vuelta al conjunto, quedando por tanto la base perforada en la parte inferior. Se coloca otra malla sobre la otra cara del subbalasto y se rellena el hueco dejado por el anillo espaciador, hasta el borde y sin compactar, con otra porción del filtro descrito. Se coloca a continuación la tapa de la célula, ajustándola con las varillas y las tuercas. Por último, se aplica silicona o teflón a todas las juntas para asegurar la total estanqueidad de la célula.
- 10) En este momento deberíamos de tener la tapa de la célula en la parte superior y la base perforada en la inferior. Esta posición se define como célula en situación normal. Se define «célula invertida» la posición de la célula con la base perforada en la parte superior y la tapa en la inferior.

Una vez hayamos montado correctamente la célula, continuamos con la saturación de los filtros, que en nuestro caso no serán más que simplemente lo que queda entre la malla de 2 mm y las válvulas o boquillas de salida, es decir, los discos espaciadores perforados y sus respectivos huecos. Esta operación es necesaria para, después, poder saturar la muestra por presión con la célula invertida, ya que si no se inunda primero el filtro quedará una cámara de aire que hará que la saturación de la muestra sea muy lenta e incompleta, y muchas veces imposible.

Cuando se seque la silicona (aproximadamente a las 24 horas), se desenrosca la boquilla de la llave de la tapa de la célula, se abre dicha llave y mediante una bureta (para que el caudal sea muy pequeño y pueda salir el aire al mismo tiempo), se inundan con agua desaireada estos filtros, de grava según el pliego y los huecos que nosotros tenemos. Si la tapa dispone de una segunda llave o válvula de purga, se abre ésta mientras se satura el filtro para permitir la salida de aire.

De vez en cuando se procederá a inclinar la célula en distintas direcciones para que pueda penetrar bien el agua y permitir la salida del aire que haya podido quedar en las zonas próximas al borde superior de la célula. Cuando rebose el agua por la llave y se tenga la seguridad de que no queda más aire en el filtro, se cierra la llave y se vuelve a enroscar la boquilla. Si la muestra no es muy impermeable, con esta operación se saturará, además del filtro, parte de dicha muestra y el consumo de agua será mayor.

Posteriormente a esta saturación **preparamos el equipo** ya montado para el ensayo:

1. Sobre un banco nivelado se coloca una bandeja y sobre ella, el soporte trípode. Sobre éste se coloca la célula invertida, haciendo pasar la llave por el aro plano del trípode. A continuación, se nivela la célula y se mide y anota la distancia (Y_0) entre el banco y la base perforada (nivel de rebosadero) con precisión de 1 mm.

2. La bureta de 50 ml se coloca cerca de la célula con un soporte. En su salida se inserta un tubo de goma o plástico transparente que se conecta por el otro extremo a un tubo de vidrio en «Y», próximo al cual se coloca una pinza, A, de estrangulamiento. Mediante un nivel, la bureta se ajusta a la vertical y a continuación se miden y se anotan las alturas Y_1 e Y_2 , que son las distancias entre el nivel del banco y las marcas del 0 (superior) y el 50 ml (inferior) de la bureta, respectivamente; también con precisión de 1 mm.

3. Se hace una marca en la escala de la bureta a una altura Y_3 (medida desde el nivel del banco), calculada del siguiente modo:

$$Y_3 = Y_0 + h_3$$

$$h_3 = \sqrt{h_1 \cdot h_2}$$

$$h_1 = Y_1 - Y_0$$

$$h_2 = Y_2 - Y_0$$

4. La altura de la bureta será tal que la distancia h_2 no sea inferior a 30 cm. A mayor altura, menores serán los tiempos que han de medirse.

5. El tanque se coloca a una altura tal que una vez lleno con agua desaireada el nivel de ésta no genere un gradiente hidráulico superior al indicado en la tabla siguiente:

Coefficiente de permeabilidad estándar esperado (m/s)	Gradiente hidráulico máximo
Entre 1×10^{-5} y 1×10^{-6}	2
Entre 1×10^{-6} y 1×10^{-7}	5
Entre 1×10^{-7} y 1×10^{-8}	10
Entre 1×10^{-8} y 1×10^{-9}	20
$< 1 \times 10^{-9}$	30

Gradiente hidráulico en función del coeficiente de permeabilidad

El gradiente hidráulico se calcula mediante la expresión:

$$G = \frac{H - Y_0}{127}$$

H = Nivel del agua en el tanque respecto del nivel del banco, en mm.

Y_0 = Nivel del rebosadero respecto del nivel del banco, en mm.

6. El grifo de salida del tanque se conecta mediante tubo de goma o plástico transparente a la otra rama lateral del tubo en «Y» y cerca de éste se coloca una pinza de estrangulamiento, B.

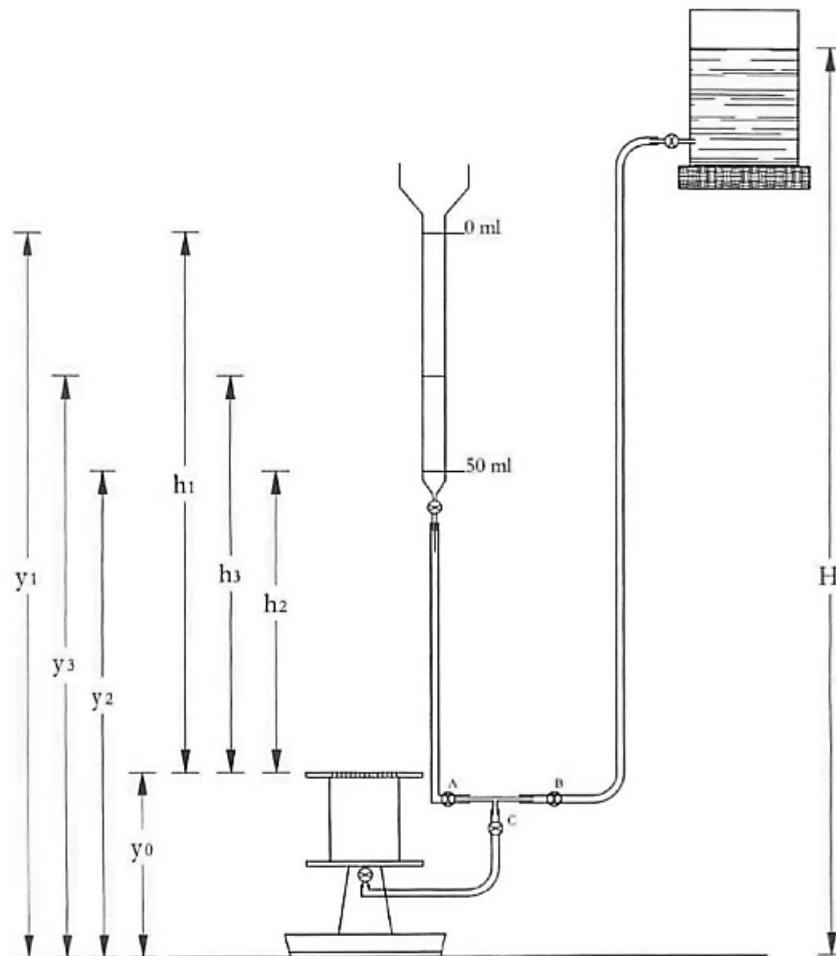
7. El tubo de vidrio en forma de «Y» deberá situarse cerca de la llave de entrada de la célula, conectándose su rama inferior a dicha llave mediante tubo transparente con su correspondiente pinza de estrangulamiento, C, cercana al tubo en «Y».

8. Los tubos de goma deberán revisarse durante el ensayo para comprobar que no se forman codos ni estrangulamientos y que los radios de curvatura son amplios en todos los tramos.

Ya tenemos todo preparado, se procede entonces a la **saturación de la muestra**:

1. Se llena el tanque con agua desaireada y se coloca a la altura indicada en el apartado anterior.
2. Con la llave de la célula cerrada, se desconecta de la boquilla el tubo de goma. Se abre la llave del tanque y las pinzas B y C, en este orden; la pinza A permanece cerrada. Se deja salir agua por el extremo del tubo de goma hacia la bandeja hasta tener la seguridad de que, en todo el circuito hasta el tanque, no queda aire atrapado. Entonces, sin dejar de salir agua por el tubo, se vuelve a insertar éste en la boquilla.
3. Se abre ahora la llave de la célula y se deja saturar la muestra, comprobando periódicamente la ausencia de burbujas en los tubos de goma. Deberá comprobarse también que no se formen codos ni estrangulamientos en dichos tubos.
4. Cuando empiece a salir agua a través de la placa perforada dejamos que continúe la saturación hasta que el agua salga por todos los agujeros durante unos minutos.

5. Se cierra la pinza C para comenzar el ensayo.



Equipo de Permeabilidad con Carga Variable

Esquema del permeámetro de carga variable del Pliego

Por último, pasamos a la verdadera **ejecución del ensayo**:

1. Se repone el agua gastada en el tanque.
2. Se eleva ahora el tanque hasta una altura en la que el nivel del agua quede por encima del nivel superior de la bureta.
3. Con la llave del tanque y la pinza B abiertas y la C cerrada, abrimos la pinza A. Seguidamente, vamos abriendo poco a poco la llave de la bureta y dejando entrar agua en ésta, cuidando de que no se originen burbujas de aire en los tubos. Cuando la bureta esté llena hasta rebosar cerramos su llave.
4. Se cierra la pinza B y se abre la C.
5. Se abre la llave de la bureta al máximo y se pone en marcha el cronómetro cuando se alcance el nivel h_1 . Cuando se alcance el nivel h_3 se mide y anota el tiempo, t_a , y se detiene el cronómetro al alcanzar el nivel h_2 . Se anota el tiempo total, t en minutos.

6. Se cierra la llave de la bureta y se mide la temperatura del tanque.

7. Se cierra la pinza C para repetir todos los pasos de este apartado hasta hacer un mínimo de cuatro medidas de t_a y t consecutivas.

8. Una vez cumplidos los requisitos de validez de las medidas descritos en el apartado 4, se desmonta la célula, se guarda el filtro y se extrae el subbalasto del cuerpo de la célula. Se recoge y ordena todo.

Llegamos entonces a los **cálculos**:

En cada descenso, el tiempo de caída del agua desde h_1 hasta h_3 , o sea, t_a , debería ser el mismo que desde h_3 a h_2 , al que se designa como t_b . Por tanto, se repetirán los ensayos en los que no se cumpla la condición:

$$|t_a - t_b| < 0.05 \cdot t$$

Una vez que se tengan un mínimo de cuatro medidas válidas según la condición anterior, se calculará para cada ensayo, el Coeficiente de Permeabilidad, k , a la temperatura del ensayo, mediante la expresión:

$$k = 3.84 \cdot 10^{-5} \cdot \left(a \cdot \frac{L}{A \cdot t} \right) \cdot \log_{10} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

Siendo:

- A: Superficie de la sección interna de la célula, en mm^2 $A = \pi \cdot \frac{D^4}{4}$
- L: Altura de la probeta de subbalasto en la célula, en mm
- a: Superficie de la sección interna de la bureta, en mm^2 $a = \frac{50000}{H}$
- H: Distancia entre las marcas de 0 y 50 ml en la bureta, en mm
- t: tiempo de descenso entre marcas de 0 y 50 ml en la bureta, en minutos.

A continuación, se calcula, para cada ensayo, la k_{20} (coeficiente de permeabilidad estándar, a 20 °C) mediante la expresión:

$$k_{20} = k \cdot c$$

El factor de corrección c , por viscosidad, se toma de la tabla siguiente, donde T es la temperatura del ensayo:

T (°C)	c	T (°C)	c
0	1,80	16	1,12
1	1,73	17	1,09
2	1,67	18	1,06
3	1,61	19	1,03
4	1,55	20	1,00
5	1,50	21	0,98
6	1,46	22	0,95
7	1,42	23	0,93
8	1,38	24	0,91
9	1,34	25	0,89
10	1,30	26	0,87
11	1,27	27	0,85
12	1,24	28	0,83
13	1,20	29	0,82
14	1,17	30	0,80
15	1,14		

Factor de corrección en función de la temperatura

A continuación, en el pliego se nos indica que habría que realizar los ensayos a varias temperaturas y con la otra mitad de nuestra muestra, según lo procedido en la preparación de esta, para calcular la desviación del coeficiente y la media de este respectivamente.

2.6.3 Normativa Brasileña (NBR 14545)

Como ya hemos citado en la problemática de las instrucciones, esta es la única que tiene este tipo de ensayo normalizado. Y a modo de resumen, por apoyarnos en algo más que el pliego que al final es una adaptación para un tipo de terreno específico, esta norma brasileña está dividida en dos métodos, A y B, **el método A** dice lo siguiente:

Lo primero será saturar la grava y los papeles de filtro.

Colocar sobre la base del permeámetro una tongada de gravas y sobre ella un papel de filtro. Sobre este el terreno a ensayar, otro papel de filtro y otra tongada de grava. A continuación, cerrar el permeámetro con la tapa que debe tener una salida de agua conectada a un tubo y conectar otro tubo a la salida de la base.

Realizar entonces el montaje de la cámara, asegurar las uniones y llenar la cámara con agua. Conectar entonces los tubos a las buretas y a la salida a un nivel adecuado. Aplicar entonces una presión confinante de 20 kPa y abrir las válvulas de salida para que circule el agua. Aquí radica la principal diferencia con el segundo método, el uso un sistema de presión y contrapresión para realizar la saturación del cuerpo y el ensayo en sí.

Ahora proceder a saturar el cuerpo de la muestra por contrapresión.

Con las válvulas cerradas, desconectar las buretas graduadas para la salida del drenaje y conectar el sistema de contrapresión y de medición de presión neutra. Abrir entonces las válvulas. Este procedimiento debe ser lo más rápido posible e ir tomando medidas de la variación de altura en el cuerpo de prueba.

Una vez realizado esto y con el terreno completamente saturado se procede al ensayo. En este, los gradientes hidráulicos podrán ser entre 2 y 15, en función del material que estemos ensayando. Debemos de tener cuidado, pues cuanto más gradiente mayor riesgo hay de que se produzca corrimiento de finos.

Abrimos entonces las válvulas de entrada y salida del cuerpo para que se produzca el paso de agua a su través. Medimos entonces las diferencias de alturas con las cargas hidráulicas expresadas antes, los tiempos que tardan las mismas y las posibles variaciones de volumen en el molde. También medir la temperatura del agua de salida en el recipiente que estamos usando.

Realizaremos este ensayo tantas veces como sea necesario, hasta obtener cuatro coeficientes de permeabilidad relativamente próximos sin que presenten tendencias de crecimiento o decrecimiento evidentes. Los cálculos y formulas necesarias se expresarán una vez concluido el segundo método.

El método B nos dice lo siguiente:

En cuanto a materiales y agua, usaremos los mismos que en el anterior procedimiento.

En el ensayo empezaremos preparando la base del permeámetro con una malla de 2 mm de luz y una tongada de grava o arena gruesa de unos 2 cm de altura, para evitar que se creen caminos para los filtros en la base de este.

Rellenar el molde con la muestra y taparlo siguiendo el mismo método, 2 cm de gravilla y un filtro de luz 2 mm antes de colocar la tapa superior y asegurarla.

Saturar entonces el cuerpo de la muestra en sentido ascendente. Este proceso será satisfactorio cuando del tubo de la salida superior, veamos emanar solo agua sin burbujas de aire, que durante el proceso de saturación ira mezclada con agua. Cuanto más fino sea el material, más tiempo y dificultad supondrá este proceso.

Conectar entonces el permeámetro al sistema para proceder al ensayo y abrir entonces las válvulas de entrada y salida del cuerpo para que se produzca el paso de agua a su través. A diferencia de la saturación de la muestra, en el ensayo el agua atravesará el permeámetro en sentido descendente. Medimos entonces las diferencias de alturas con las cargas hidráulicas expresadas antes, los tiempos que tardan las mismas y las posibles variaciones de volumen en el molde. También medir la temperatura del agua de salida en el recipiente que estamos usando.

Realizaremos este ensayo tantas veces como sea necesario, hasta obtener cuatro coeficientes de permeabilidad relativamente próximos sin que presenten tendencias de crecimiento o decrecimiento evidentes.

En cuanto a los **cálculos**:

Índices físicos iniciales que conocer del cuerpo de prueba.

$$M_s = \frac{M}{100 + w} \cdot 100$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_i}$$

$$e_i = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

$$S_f = \frac{\rho_s \cdot w}{\rho_w \cdot e_i}$$

- M = Masa del cuerpo de prueba (g)
- M_s = Masa seca o de sólidos, del cuerpo de prueba (g)
- w = Porcentaje de humedad inicial (%)
- ρ_d = Masa específica aparente seca inicial del cuerpo de prueba (g/cm^3)
- ρ_s = Masa específica de las gravas (g/cm^3)
- ρ_w = Masa específica del agua (g/cm^3)
- e_i = Índice de poros del cuerpo de prueba
- V_i = Volumen inicial del cuerpo de prueba (cm^3)
- S_f = Grado de saturación inicial del cuerpo de prueba (%)

Características del cuerpo de prueba después de la densificación.

$$A_f = \frac{V_f}{H_f}$$

$$D_f = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot D_i \cdot V_f}{\pi \cdot H_f}}$$

$$H_f = \frac{H_i \cdot D_f}{D_i}$$

$$H_f = \frac{H_i \cdot D_f}{D_i}$$

- D_f = Diámetro del cuerpo de prueba después de la densificación (cm)
- D_i = Diámetro del cuerpo de prueba antes de la densificación (cm)
- H_f = Altura final del cuerpo de prueba (cm)
- H_i = Altura inicial del cuerpo de prueba (cm)
- V_f = Volumen del cuerpo de prueba, proveniente del diámetro final (cm³)
- A_f = Área del cuerpo de prueba, proveniente del diámetro final (cm²)

Finalmente, y para cada método, según el que hayamos decidido seguir, se calcula el coeficiente de permeabilidad (k):

$$k = \frac{a \cdot H}{A \cdot (t_1 - t_0)} \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

La temperatura normalizada es 20°C, habría que referir nuestra k a la misma.

$$k_{20} = k \cdot R_t$$

Temperatura °C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
8	1,374	1,370	1,366	1,362	1,358	1,354	1,352	1,348	1,344	1,340
9	1,336	1,332	1,328	1,324	1,321	1,318	1,314	1,310	1,306	1,302
10	1,298	1,294	1,292	1,288	1,284	1,281	1,277	1,273	1,269	1,266
11	1,262	1,259	1,256	1,252	1,249	1,245	1,241	1,238	1,234	1,231
12	1,227	1,224	1,221	1,218	1,215	1,211	1,208	1,205	1,202	1,198
13	1,195	1,192	1,189	1,186	1,183	1,180	1,177	1,174	1,170	1,167
14	1,165	1,162	1,159	1,156	1,153	1,150	1,147	1,144	1,141	1,138
15	1,135	1,132	1,129	1,126	1,123	1,121	1,118	1,115	1,112	1,109
16	1,105	1,103	1,100	1,098	1,095	1,092	1,089	1,086	1,084	1,081
17	1,078	1,075	1,073	1,070	1,067	1,064	1,062	1,059	1,056	1,054
18	1,051	1,048	1,046	1,043	1,041	1,038	1,035	1,033	1,030	1,028
19	1,025	1,023	1,020	1,018	1,015	1,013	1,010	1,008	1,005	1,003
20	1,000	0,998	0,995	0,993	0,991	0,989	0,986	0,984	0,982	0,979
21	0,975	0,973	0,971	0,968	0,966	0,964	0,961	0,959	0,957	0,954
22	0,952	0,950	0,948	0,945	0,943	0,941	0,939	0,937	0,934	0,932
23	0,930	0,928	0,926	0,923	0,921	0,919	0,917	0,915	0,912	0,910
24	0,908	0,906	0,904	0,902	0,900	0,898	0,895	0,893	0,891	0,889
25	0,887	0,885	0,883	0,881	0,879	0,877	0,875	0,873	0,871	0,869
26	0,867	0,865	0,863	0,861	0,859	0,857	0,855	0,853	0,851	0,849
27	0,847	0,845	0,843	0,841	0,839	0,838	0,836	0,834	0,832	0,830
28	0,828	0,826	0,825	0,823	0,821	0,820	0,818	0,816	0,814	0,813
29	0,811	0,809	0,807	0,806	0,804	0,802	0,800	0,798	0,797	0,795
30	0,793	0,791	0,789	0,788	0,786	0,784	0,782	0,780	0,779	0,777
31	0,776	0,775	0,773	0,772	0,770	0,768	0,767	0,765	0,763	0,762

Tabla de R_t en función de la temperatura

3. Puesta a punto del permeámetro de carga variable

3.1 Estado inicial del permeámetro

El aparato, como ya hemos mencionado anteriormente en la introducción, se encontraba almacenado debajo de la mesa del laboratorio donde se encuentran ubicados los dos permeámetros de carga constante. Estaba en desuso desde hacía seis años, año en el cual fue adquirido a laboratorios Mecacisa, con sede en Madrid, y se realizó un ensayo que una vez acabado, no se limpió, dejándolo apartado hasta este momento.

A simple vista, el dispositivo no parecía excesivamente dañado salvo por zonas oxidadas, uno de los tubos de plástico un tanto amarillento y no mucho más. El problema nos lo encontramos cuando conseguimos abrirlo. Lo más llamativo fue el hecho de que estaba lleno del material ensayado hacía seis años, que era una especie de arcilla que se había acabado comiendo parte del metal del interior, dañando el cuerpo de la célula. Por otra parte, teníamos las mallas metálicas de filtro, que estaban en un estado que nos obligaban a cambiarlas. Por último, destacaban los discos espaciadores perforados, mucho más oxidados que cualquier otra parte del aparato, incluso con varios agujeros obstruidos.

Aquí podemos observar el estado de algunos de estos elementos:



Estado de diferentes elementos del permeámetro antes de la puesta a punto

3.2 Puesta a punto

Lo primero fue la separación en estructura de base, cuerpo y tapa, aflojando las palometas con alicates por el óxido.

Teníamos entonces el piezómetro en tres partes, estructura de la base, cuerpo (lleno de arcilla muy compactada) y tapa, además de las 2 palometas y el filtro de la base.

Lo primero que hicimos fue meter el filtro en remojo, a ver si se reblandecía y podíamos reutilizarlo, nunca fue una opción muy realista, pero había que intentarlo.

Para empezar el despiece quitamos los tubos de plástico y con una llave inglesa retiramos las salidas del permeámetro. En la limpieza de los tubos nos vimos obligados a cambiar uno de ellos por uno nuevo porque el plástico estaba muy amarillento y en laboratorio disponíamos del mismo tipo de tubo.

Nos centramos entonces en el cuerpo y en quitar el bloque de arcilla que lo ocupaba. Primero probamos con un martillo y un clavo y cuando el agujero que habíamos conseguido era lo suficientemente grande lo pusimos bajo un chorro agua para intentar ablandarlo y que fuese más fácil su extracción. Junto con la arcilla nos encontrábamos con otro material de un color negro verdoso, que presentaba un olor fuerte y que además que era bastante más duro que la arcilla, pudiera ser la misma arcilla húmeda en la que se habían metido nódulos de óxido del propio metal. Tras dejarlo en remojo un par de horas y repararlo con una espátula unos veinte minutos conseguimos quitárselo. El interior del cuerpo estaba notablemente dañado por el óxido.

Tras vaciar el cuerpo, pudimos recuperar el disco metálico perforado de este que se encontraba mucho peor que el ubicado en la base. Junto a él, encontramos el filtro de malla metálico también mucho más deteriorado que el de la base.

Una vez hubimos limpiado todas las partes, procedimos a intentar quitar el óxido superficial de las juntas de plástico para recuperarlas y saber si tendríamos que comprar nuevas o podríamos reutilizarlas. La de la tapa salió sin muchos problemas y su estado era bueno. No sucedió lo mismo en la base, cuya junta no salió de primeras y tras una hora en remojo y estar un rato intentando forzarla, conseguimos sacarla, y sorprendentemente, también en buen estado.

Tras la junta de la base, sacamos el filtro metálico de la base, más fino que el del cuerpo y que también se encontraba un poco oxidada.

Una vez teníamos todas las piezas separadas empezamos a hacer pruebas para quitar el óxido. Nuestra primera decisión fue utilizar disolvente universal. Para ello usamos guantes de látex y distintos cepillos metálicos. Lo aplicamos a la base y al filtro metálico de la misma (el menos dañado). Los resultados fueron buenos, pero no muy rápidos, por lo que habríamos de cambiar el método. Pasamos a usar una lija con el exterior de la base con el fin de que quede presentable, el problema fue que la lija era demasiado suave, aunque no quedase un mal acabado. Faltaban entonces el cuerpo y la tapa.

Puesta en funcionamiento del permeámetro de carga variable, un equipo de laboratorio para ensayos de permeabilidad en suelos cohesivos.

Óscar Yelo Díaz

La decisión fue entonces llevarlo al taller mecánico de la UPCT, donde en el tiempo de una semana se le quitó el óxido y se pulieron los diferentes elementos hasta quedar con el estado que podremos apreciar en el despiece.



Estado inicial del permeámetro



Estado final del permeámetro

3.3 Despiece

Tuerca de acero inoxidable (x2)



Palometa de acero inoxidable de diámetro 7 mm



Puesta en funcionamiento del permeámetro de carga variable, un equipo de laboratorio para ensayos de permeabilidad en suelos cohesivos.

Óscar Yelo Díaz

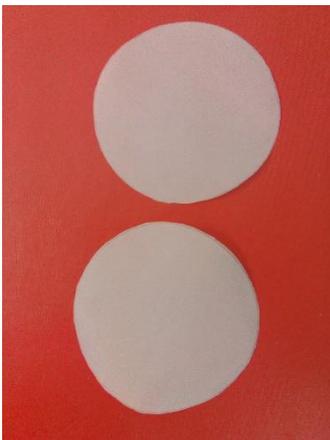
Arandelas de acero inoxidable (x6)



Barra roscada de 7 mm de diámetro y 16.5 cm de longitud (x2)



Filtro de nylon de 9.3 cm de diámetro y 0.106 mm de luz (x2)



Juntas de goma para la base (10.3 cm de diametro) y la tapa (9.8 cm de diámetro)



Puesta en funcionamiento del permeámetro de carga variable, un equipo de laboratorio para ensayos de permeabilidad en suelos cohesivos.

Óscar Yelo Díaz

Cuerpo del permeámetro 10 cm de diámetro interior y 11.4 mm de altura



Tapa del permeámetro de 17.5 cm de diámetro y 17 mm de altura



Tapa del permeámetro de 17.5 cm de diámetro y 24.5 mm de altura



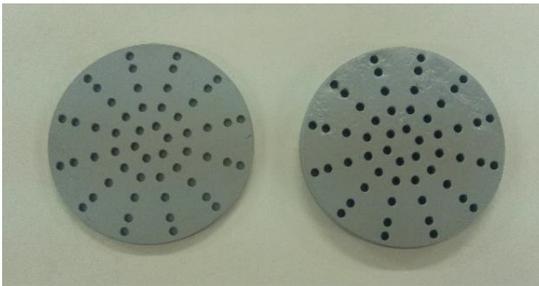
Puesta en funcionamiento del permeámetro de carga variable, un equipo de laboratorio para ensayos de permeabilidad en suelos cohesivos.

Óscar Yelo Díaz

Tubo de plástico de 5 mm de diámetro



Discos metálicos espaciadores de 9.4 cm de diámetro, uno en la base con 2.5 mm de espesor y otro en la tapa con 7 mm de espesor



Válvula de paso con rosca



Boquilla roscada de acero inoxidable (x2)



4. Guía de utilización del permeámetro de carga variable

En este manual se explica el método que habremos de seguir para realizar un ensayo de permeabilidad para diferentes muestras de terreno. Este se ha elaborado debido a la ausencia de una norma clara que indique como realizar el ensayo. Para preparar esta guía se han tomado como referencia distintas recomendaciones del Pliego, de la NBR y de nuestra propia experiencia realizando estos ensayos.

Lo primero será el montaje del permeámetro, empezando por la base, con su disco espaciador y su junta. Poner entonces el cuerpo y ajustarlo con las palometas. Así quedará hasta que se vierta el material a ensayar.

Si el material es muy fino (limo o arcilla), nos ceñiremos al método B de la normativa brasileña y dispondremos dos pequeñas tongadas de grava, una antes del vertido del material y otra después, entre filtros de malla de nylon de luz 0.106 mm.

En el caso contrario, separaremos los discos espaciadores, tanto el de la base como el que ponemos cuando lo tapamos, con dicho filtro de malla. Esto se hace para perder el menor número de finos posibles durante el ensayo.

Tipo de vertido

- ***Suelta.*** Como su nombre indica es un vertido libre y procurando no darle golpes o vibrar el permeámetro para que no compacte.
- ***Compactada en seco.*** En este caso dispondremos el material en seco en cinco tongadas de unos dos centímetros pasando en cada tongada por el agitador mecánico diez minutos a una potencia cuatro sobre diez.
- ***Compactada en húmedo.*** En este caso dispondremos el material con una humedad suficiente en cinco tongadas de unos dos centímetros y seguiremos el procedimiento del Proctor Modificado, dando 60 golpes por tongada bien

repartidos en la superficie. Por comodidad utilizar el pisón del Proctor Normal o si el material tiene una granulometría lo suficientemente grande, usar la maza del mortero.

- **Suelo natural.** Si disponemos de un suelo en su estado natural, utilizaríamos el mismo vertido que si fuera un material suelto, si fuese un testigo del diámetro de nuestro permeámetro, lo meteríamos tal cual.

Después de este vertido debe quedar un espacio de unos 3-4 mm hasta el límite superior del cuerpo para poder cerrarlo bien, quedando de esta manera:



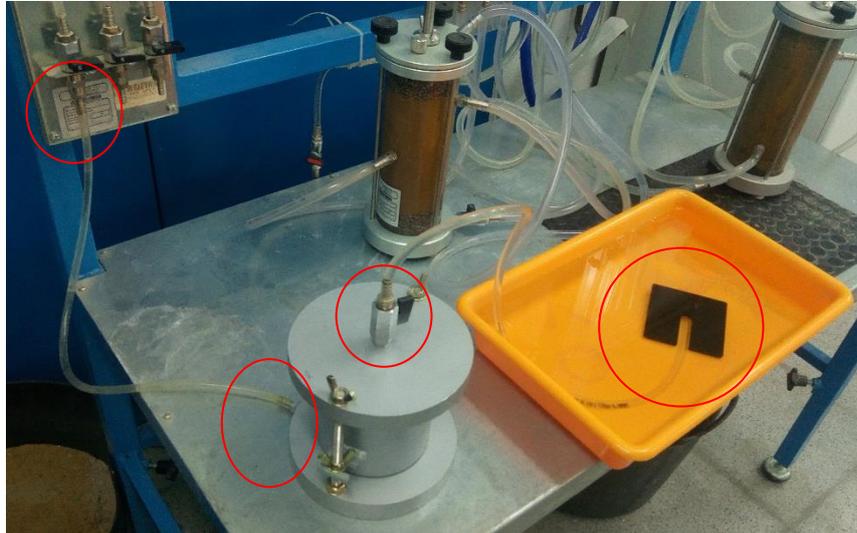
Poner entonces el filtro de malla, y como hemos dicho antes, si fuese necesario la pequeña tongada de grava entre dos filtros. Tras esto, colocar el disco espaciador, cerrar el permeámetro y apretar el conjunto con las palometas de la tapa. Debe quedar así:



Una vez compactado el material y montado el permeámetro, se procede a pesar el equipo para, por diferencia con el equipo vacío, obtener la masa de suelo y poder conocer la densidad aparente de la muestra a ensayar. De esa manera, el valor de la permeabilidad obtenido siempre queda asociado a un tipo de suelo en concreto y a una densidad conocida del mismo

Proceder al montaje del sistema previo a la saturación. Conectar mediante un tubo la salida inferior con la salida de la bureta. Conectamos también un tubo a la salida de la

válvula superior que hacemos desaguar en una bandeja al nivel de la mesa donde apoya el permeámetro, sujetando el tubo con una pesa. Debe quedar de la siguiente manera:



Saturación

De igual manera que el vertido, la saturación también cambiará en función del tipo de material que vayamos a ensayar:

- **Terrenos granulares.** Para este tipo de muestras la saturación es relativamente sencilla. Debemos conectar la manguera que sale del grifo del laboratorio a base de conexiones de tubos a la parte de arriba de la bureta, cerrando así el circuito con el permeámetro. Abriremos entonces las válvulas tanto de la bureta como del permeámetro y asegurándonos de que todos los tubos están bien conectados, abrimos el grifo y hacemos circular el aire que había dentro del circuito a través del aparato. Esto podremos hacerlo porque por la propia naturaleza del terreno granular no estamos dificultando la posterior saturación. Una vez el aire atraviese la muestra, el agua empezará a entrar y a saturar la muestra. Dejar que el agua fluya hasta que no salgan burbujas de aire de la salida del permeámetro, asegurarse de la saturación inclinando el aparato en todas direcciones y sacando las posibles burbujas de aire que pudieran quedar. Este proceso puede durar entre cinco y veinte minutos.
- **Terrenos cohesivos.** En este tipo de terreno se complica la saturación. Como necesitaremos más presión dejamos fuera del circuito la bureta para no dañarla, conectando el tubo del grifo con la entrada de agua al permeámetro, lo ideal es conectarlo justo cuando el agua vaya a salirse del tubo, pues aquí si es importante que no entre aire al cuerpo de prueba. Abrimos el grifo y habrá que conseguir que entre un pequeño caudal de agua en el cuerpo de prueba. Hasta

que salga el agua por la válvula de salida puede pasar un tiempo razonable, del orden de veinte a treinta minutos. A partir de aquí esperar a que las burbujas de aire dejen de salir por el tubo de salida. Inclinar el cuerpo de prueba para asegurarse de que salen todas las burbujas. Cabe la posibilidad de que con la presión del grifo no sea suficiente para que, entre un caudal suficiente en el permeámetro, en este caso utilizar la bomba de pistón que se encuentra en el laboratorio para refrigerar el taladro del departamento de suelos. Llenar el taladro de agua y conectar su manguera a la entrada del aparato. Bombear hasta que el agua atraviese la muestra. A partir de este punto podemos cambiar el sistema a los tubos del grifo y ya esperar a que no quede aire dentro.

Una vez saturada la muestra podemos proceder al ensayo de permeabilidad de carga variable.

Ensayo

Necesitaremos los siguientes datos para finalmente sacar el coeficiente de permeabilidad:

- L = Altura del terreno muestra (m)
- A = Área del cuerpo del permeámetro (m^2)
- a = Área de la bureta (m^2)
- t_1 = Tiempo final (s)
- t_0 = Tiempo inicial (s)
- h_0 = Altura inicial en la bureta (cm)
- h_1 = Altura final en la bureta (cm)

En nuestro caso tanto el área del permeámetro como el área de la bureta son conocidas, siendo:

$$A = 0.007853982 \text{ m}^2$$

$$a = 1.9635 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

La altura de la muestra dependerá de si ponemos la grava o no.

La fórmula que usaremos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad será la que se nos presenta en tanto en la normativa brasileña como en los libros que mencionan este ensayo:

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot (t_1 - t_0)} \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

En cuanto al ensayo, también tendrá diferencias según el tipo de terreno.

1. Terrenos granulares.

Para empezar el ensayo disponemos el montaje como en la imagen anterior. Los pasos a seguir para realizarlo son:

- Abrir las válvulas, tanto la de la bureta como la del permeámetro.
- Hacer que circule el agua en el circuito.
- Cerrar el grifo.
- Cerrar la válvula de la bureta.
- Separar el tubo alimentador de la bureta con cuidado de no mojar mucho.
- Abrir muy poco la válvula de la bureta para estabilizar la altura inicial en un valor que podamos definir perfectamente y cerrarla.
- Abrir la válvula de la bureta a la vez que accionamos el cronómetro y dejar que baje el nivel.
- Cerrar la válvula de la bureta a la vez que detenemos el cronómetro y dejar que el nivel se estabilice, pues subirá un poco.
- Anotar todos los datos que hemos sacado; t_1 , h_1 , h_0
- Realizar los cálculos pertinentes para el cálculo de k .

Para realizar el siguiente ensayo, en terrenos granulares abriremos ambas válvulas y conectaremos el tubo alimentador del grifo. Abriremos este último y dejaremos que el aire atraviese el circuito, al ser terreno granular no tardará mucho. Cuando no quede aire dentro del permeámetro, será el momento de repetir el ensayo. Si se quiere evitar meter aire al circuito, se puede optar por realizar el proceso que se hace para suelos cohesivos, explicado más abajo.

2. Terrenos cohesivos.

Para empezar el ensayo disponemos el montaje como en la imagen anterior. Los pasos a seguir para realizarlo son:

- Con las válvulas cerradas, llenar la bureta manualmente con un recipiente que lo permita.
- El tubo que sale de la parte inferior del permeámetro y que servirá para alimentarlo debe estar lleno (también manualmente) para conectarlo con la bureta.
- Estos dos primeros pasos se harán ya que el aire es más difícil de evacuar en estos casos.
- Abrir muy poco la válvula de la bureta para estabilizar la altura inicial en un valor que podamos definir perfectamente y cerrarla.
- Abrir la válvula de la bureta a la vez que accionamos el cronómetro y dejar que baje el nivel. (Aquí es posible que se produzca una primera bajada brusca del

nivel que descartaremos a la hora de los cálculos, pues se debe a una diferencia de presión).

- Cerrar la válvula de la bureta a la vez que detenemos el cronómetro y dejar que el nivel se estabilice, pues subirá un poco.
- Anotar todos los datos que hemos sacado; t_1 , h_1 , h_0
- Realizar los cálculos pertinentes para el cálculo de k .

Para realizar el siguiente ensayo, simplemente rellenar manualmente la bureta hasta el nivel deseado y pasar al paso 4.

Realizar el ensayo entre seis y diez veces y finalmente sacar el coeficiente de permeabilidad media. Si el agua que se utiliza no está a unos veinte grados, en nuestro caso suele estar a veinte grados, utilizar una constante para obtener un valor de k real.

Utilizaremos la constante del pliego de condiciones.

$$k_{20} = k \cdot c$$

T (°C)	c	T (°C)	c
0	1,80	16	1,12
1	1,73	17	1,09
2	1,67	18	1,06
3	1,61	19	1,03
4	1,55	20	1,00
5	1,50	21	0,98
6	1,46	22	0,95
7	1,42	23	0,93
8	1,38	24	0,91
9	1,34	25	0,89
10	1,30	26	0,87
11	1,27	27	0,85
12	1,24	28	0,83
13	1,20	29	0,82
14	1,17	30	0,80
15	1,14		

Podremos comparar nuestro resultado con la fórmula de Hazen si conocemos la granulometría de la arena que estemos ensayando, esta fórmula es solo válida para arenas. Esto nos servirá para sacar el orden de magnitud de este, pues el valor no suele coincidir, ya que esta fórmula es muy genérica, además expresa el resultado en cm/s y hay que pasarlo a m/s :

$$k = c \cdot d_{10}^2$$

Donde:

- $c = 45.8$ (arenas arcillosas) – 142 (arenas puras)
- d_{10} = Tamaño por donde pasa el 10% del material (cm)

También se puede comparar el orden de magnitud con esta tabla, es la que usaremos para terrenos más finos:

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	$> 10^{-2}$

Coefficientes de permeabilidad de algunos tipos de terreno. Mecánica de suelos. (Berry, 1993)

5. Ensayos de permeabilidad

5.1 Prueba de estanqueidad

El primer ensayo que realizamos fue uno unicamente con agua, una prueba de estanqueidad para saber si nuestro aparato presentaba alguna pérdida evidente tras el proceso de limpieza y puesta a punto.

Lo primero será conectar los tubos con las boquillas de salida y entrada del permeámetro, la de arriba, que será la de salida, cuenta con una válvula que nos permitirá regular la cantidad de agua que saldrá del montaje, aquí conectaremos mediante un tubo un recipiente para que desague nuestro aparato a un nivel conocido. La de abajo, que será la que sirva para meter agua en el permeámetro, la conectamos usando el tubo, con la boquilla de la bureta graduada.

A esta bureta para meterle agua, que posteriormente llegue al permeámetro, le conectamos una manguera directamente desde el grifo del laboratorio.

Este montaje queda de la siguiente manera:



Montaje de la prueba de estanqueidad.

Tras un tiempo de unos cinco minutos, de este ensayo obtenemos resultados satisfactorios, el permeámetro no tiene ninguna fuga o pérdida que nos haga poner en riesgo los ensayos que realizaremos más adelante.

5.2 Ensayos con arena

El siguiente paso de este proceso de reinserción del permeámetro de carga variable en el laboratorio, es el de probarlo con arena, que al final es un material más permeable que un limo o una arcilla, pero a la vez presenta una oposición apreciable con esta prueba.

El aparato idóneo para este tipo de terrenos granulares es el permeámetro de carga constante. En el laboratorio tenemos dos permeámetros de este tipo y además, en los que se han ensayado diferentes tipos de arena y con vertidos y compactaciones diferentes, por lo que tendremos datos suficientes para comparar nuestros resultados.

5.2.1 Material a ensayar

La arena que se utilizó en la prueba fue una que se encontraba en el laboratorio de geotecnia de la UPCT y que ya se encontraba caracterizada.

Teníamos datos de su granulometría, de su ensayo Gs y de sus densidades, máxima y mínima, teniendo constancia de que estos ensayos se realizaron siguiendo en la medida de lo posible las especificaciones de la normativa vigente.

La arena se ensayará de de tres formas diferentes. La primera será arena seca suelta, la segunda arena seca compactada y la tercera arena húmeda compactada.

Granulometría:

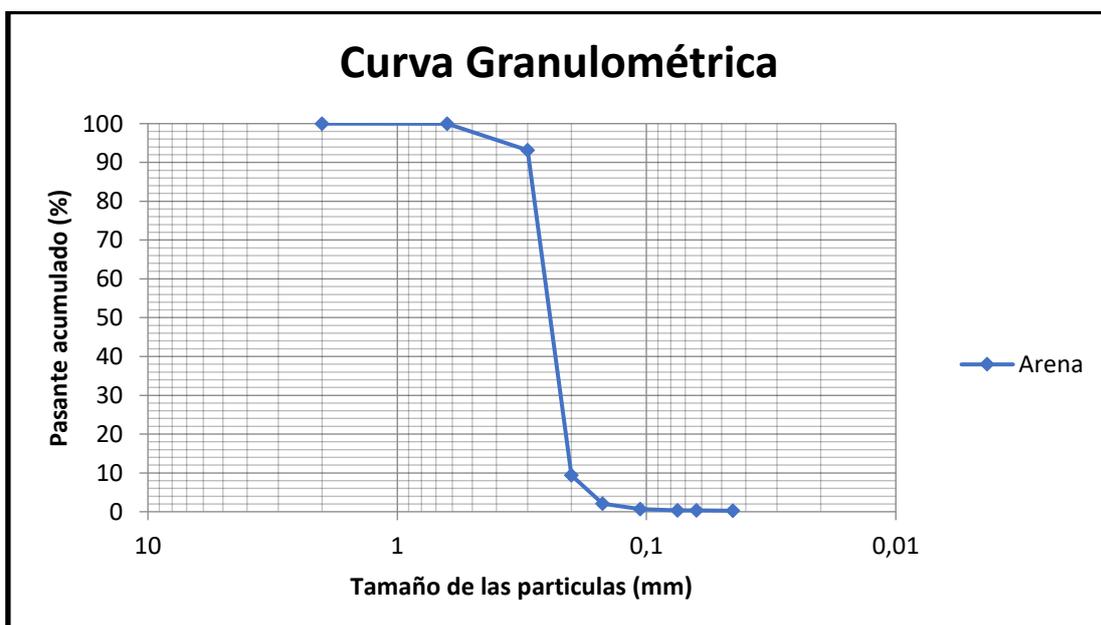


Tabla resumen de la muestra que se ensayó:

<i>Masa recipiente +masa muestra</i>	<i>1582.17 g</i>
<i>Masa recipiente</i>	<i>528.17 g</i>
<i>Masa de muestra</i>	<i>1054 g</i>
<i>Masa de muestra tras tamizado</i>	<i>1052.07 g</i>
<i>Porcentaje de error (<5%)</i>	<i>0.18311%</i>

Ensayo Gs

De este ensayo sabemos que el Gs medio es de 2.7.

Densidades máximas y mínimas

Una vez realizados ambos ensayos, sacamos unos valores de:

$$\text{Densidad mínima} = 1.4858 \text{ km/dm}^3$$

$$\text{Densidad máxima} = 1.7414 \text{ km/dm}^3$$

5.2.2 Ensayo de permeabilidad con arena seca suelta

En esta prueba, el vertido de la arena en el permeámetro se realiza en pequeñas tongadas y con cuidado de no mover mucho el cuerpo del mismo, para evitar que compacte.

En cuanto a la preparación del ensayo, no ponemos tongada de grava antes del filtro de malla pues con el disco espaciador de la base y el de la tapa junto con el propio filtro de malla, creemos que es suficiente para evitar que la arena atravesase el conjunto y se pierda material del cuerpo.

La masa total de arena que tenemos dentro del molde es de 1.069 kg, con una densidad aparente de 1,19394 kg/dm³.

Tras el vertido de la arena debemos de dejar unos cuatro milímetros para que cierre bien tras la puesta del disco y de la tapa, quedado de la siguiente manera:



Estado final del permeámetro antes de cerrarlo

Una vez cerrado el permeámetro y aseguradas todas las tuercas y palometas, procedemos al montaje del sistema para ensayarlo. Este montaje quedará de la misma forma que en la prueba de estanqueidad. La válvula inferior será la que sirva para alimentar el aparato y la de arriba desaguará a un recipiente de altura conocida.

Para este vertido y en general, para este material, la saturación de la muestra es relativamente sencilla. El sentido del agua como ya hemos mencionado será ascendente y habremos de mover el permeámetro inclinándolo en todas direcciones para que todas las burbujas de aire que quedasen salgan por la válvula de arriba. El tiempo que tarda en saturar esta muestra es alrededor de cuatro minutos.

El número de veces que repetimos el ensayo fue de once, incluyendo entre ellas tres en las que variamos la altura del recipiente de desagüe como podemos apreciar en la siguiente figura.



Diferencia de nivel del recipiente de desagüe entre los dos tipos de ensayo

En cuanto a los cálculos vamos a seguir el esquema de la imagen que ya usamos en los fundamentos teóricos. Al final es muy parecido al método B de la normativa brasileña, siendo la fórmula final la misma y por tanto estando respaldada por una norma oficial.

Necesitaremos conocer:

- L = Altura del terreno muestra (m)
- A = Área del cuerpo del permeámetro (m^2)
- a = Área de la bureta (m^2)
- t_1 = Tiempo final (s)
- t_0 = Tiempo inicial (s)
- h_0 = Altura inicial en la bureta (cm)
- h_1 = Altura final en la bureta (cm)

La fórmula que usaremos para calcular el coeficiente de permeabilidad (k) será:

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot (t_1 - t_0)} \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

Ensayos:

Lo primero será determinar las constantes para todos los ensayos:

$$L = 0.114 \text{ m}$$

$$A = \pi \cdot \frac{0.10^2}{4} = 0.007853982 \text{ m}^2$$

$$a = \pi \cdot \frac{0.005^2}{4} = 1.9635 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

<i>Ensayo</i>	t_1	t_0	h_1	h_0	k
1	1.84	0	39.3	139.3	0.000196
2	0.46	0	84.8	136.8	0.00029629

3	0.81	0	51.8	137.7	0.000344
4	0.88	0	56.5	138.5	0.00029039
5	1	0	46.2	137.2	0.00031021
6	0.69	0	53	137	0.00039226
7	1.15	0	45.5	131.2	0.00026245
8	1.35	0	47	138	0.00022739
9	0.78	0	35	81.5	0.00030884
10	0.8	0	16.8	35	0.00026148
11	0.94	0	27.3	83	0.00033713

El coeficiente de permeabilidad medio es $k = 0.00029331 \text{ m/s}$.

El agua desaguada estaba a una temperatura muy cercana a los 20°C por lo que tomamos este valor como el valor definitivo.

Además, este valor es muy parecido al valor de permeabilidad que previamente conocíamos de la caracterización de la muestra, ensayada con un permeámetro de carga constante y que era $k = 0.0002808 \text{ m/s}$.

También puedo compararlo con la k que sale de la fórmula de Hazen tal y como se menciona en la guía.

$$k = c \cdot d_{10}^2 = 130 \cdot 0.02^2 = 0.052 \text{ cm/s} = 0.00052 \text{ m/s}$$

Tanto en la fórmula como en la tabla de valores normales de la guía obtenemos el mismo orden de magnitud que nosotros, por lo que el resultado es válido.

5.2.3 Ensayo de permeabilidad con arena seca compacta

En esta segunda prueba, el vertido de la arena en el permeámetro se realiza en cinco tongadas de un poco más de dos centímetros y realizamos la compactación de este en el vibrador para tamices con cada tongada. Esta vibrado es de diez minutos y a una potencia de cinco sobre diez.

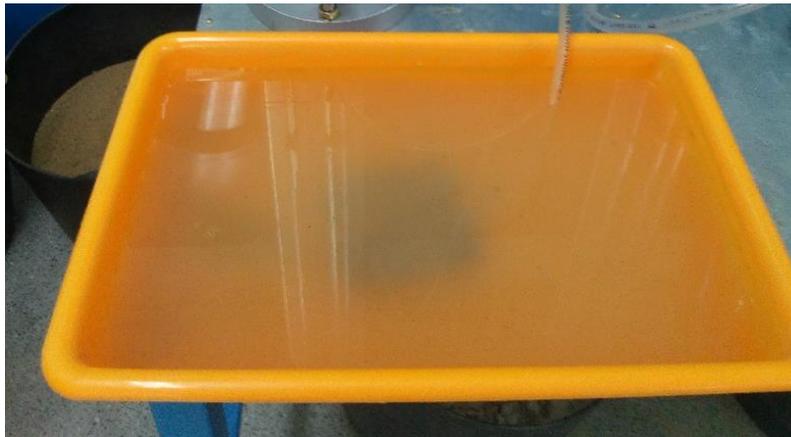
En cuanto a la preparación del ensayo, no ponemos tongada de grava antes del filtro de malla pues con el disco espaciador de la base y el de la tapa junto con el propio filtro de malla, creemos que es suficiente para evitar que la arena atraviese el conjunto y se pierda material del cuerpo de prueba.

La masa total de arena que tenemos dentro del molde es de 1.269 kg, y una densidad aparente de 1.417 kg/dm³.

Tras el vertido de la arena debemos de dejar unos cuatro milímetros para que cierre bien tras la puesta del disco y de la tapa.

Una vez cerrado el permeámetro y aseguradas todas las tuercas y palometas, procedemos al montaje del sistema para ensayarlo. Este montaje quedará de la misma forma que en la prueba anterior. La válvula inferior será la que sirva para alimentar el aparato y la de arriba desaguará a un recipiente de altura conocida.

La saturación de la muestra es relativamente sencilla por el hecho de ser una arena. El sentido del agua como ya hemos mencionado será ascendente y habremos de mover el permeámetro inclinándolo en todas direcciones para que todas las burbujas de aire que quedasen salgan por la válvula de arriba. El tiempo que tarda en saturar esta muestra es alrededor de siete minutos. Como también sucede con los otros ensayos con arena, el agua que sale al recipiente sale más turbia, esto es debido a que los finos contenidos en la muestra si son capaces de atravesar el filtro gracias a la presión y el hueco perimetral que existe entre el filtro y la pared.



Agua turbia en el recipiente de desagüe

El número de veces que repetimos el ensayo fue de ocho.

En cuanto a los datos que necesitaremos serán los mismos que en el ensayo de arena seca suelta, y la fórmula:

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot (t_1 - t_0)} \cdot \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right)$$

Ensayos:

Los valores que se mantendrán constantes serán:

L	0.114 m
A	0.007853982 m ²
a	1.9635 · 10 ⁻⁵ m ²

Y los diferentes ensayos:

<i>Ensayo</i>	<i>t₁</i>	<i>t₀</i>	<i>h₁</i>	<i>h₀</i>	<i>k</i>
1	1.06	0	63.2	139	0.00021191
2	1.21	0	62.6	139	0.00018789
3	1	0	69.7	137.5	0.00019364
4	1.35	0	72.4	143	0.00014369
5	1.06	0	74.9	139.3	0.00016683
6	1.09	0	74.2	140	0.000166
7	1.91	0	48.5	139.8	0.00015797
8	0.66	0	87.7	139	0.00019887

El coeficiente de permeabilidad medio es ***k* = 0.00017835 m/s.**

El agua desaguada estaba a una temperatura muy cercana a los 20°C por lo que tomamos este valor como el valor definitivo.

Este valor es muy parecido al valor de permeabilidad que previamente conocíamos de la caracterización de la muestra, ensayada con un permeámetro de carga constante y que era ***k* = 0.000166 m/s.**

También puedo compararlo con la *k* que sale de la fórmula de Hazen tal y como se menciona en la guía, esta será la misma que en el anterior ensayo, pues la arena es la misma:

$$k = 0.052 \text{ cm/s} = 0.00052 \text{ m/s}$$

Tanto en la fórmula como en la tabla de valores normales de la guía obtenemos el mismo orden de magnitud que nosotros, por lo que el resultado es válido.

5.2.4 Ensayo de permeabilidad con arena húmeda compacta

En esta tercera prueba con arena, el vertido de esta en el molde se realiza en cinco tongadas de un poco más de dos centímetros y realizamos la compactación de este siguiendo un procedimiento basado en el ensayo normalizado del Proctor modificado, con sesenta golpes y cinco tongadas.



Maza y agua con la que compactamos la arena.

En cuanto a la preparación del ensayo, no ponemos tongada de grava antes del filtro de malla pues con el disco espaciador de la base y el de la tapa junto con el propio filtro de malla, creemos que es suficiente para evitar que la arena atraviese el conjunto y se pierda material del cuerpo de prueba.

La masa total de arena que tenemos dentro del molde es de 1.524 kg, y la densidad aparente de 1.702 kg/dm^3 .

Tras el vertido de la arena debemos de dejar unos cuatro milímetros para que cierre bien tras la puesta del disco y de la tapa.

Una vez cerrado el permeámetro y aseguradas todas las tuercas y palometas, procedemos al montaje del sistema para ensayarlo. Este montaje quedará de la misma forma que en las pruebas anteriores. La válvula inferior será la que sirva para alimentar el aparato y la de arriba desaguará a un recipiente de altura conocida.

La saturación de la muestra es relativamente sencilla por el hecho de ser una arena. El sentido del agua como ya hemos mencionado será ascendente y habremos de mover el permeámetro inclinándolo en todas direcciones para que todas las burbujas de aire que quedasen salgan por la válvula de arriba. El tiempo que tarda en saturar esta muestra es alrededor de cinco minutos, ya que, aunque está más compactada, está ya húmeda, lo cual simplifica el proceso.

El número de veces que repetimos el ensayo fue de diez.

En cuanto a los datos que necesitaremos serán los mismos que en el ensayo de arena seca suelta, y la fórmula:

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot (t_1 - t_0)} \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

Ensayos:

Los valores que se mantendrán constantes serán:

L	0.114 m
A	0.007853982 m ²
a	1.9635 · 10 ⁻⁵ m ²

Y los diferentes ensayos:

<i>Ensayo</i>	<i>t₁</i>	<i>t₀</i>	<i>h₁</i>	<i>h₀</i>	<i>k</i>
1	1	0	73.2	140.5	0.00018582
2	1	0	69.1	140.3	0.00020185
3	1.56	0	55.5	139	0.00016773
4	1.65	0	53.5	139	0.00016492
5	1.82	0	53.3	139.5	0.00015066
6	1.31	0	67.2	140	0.00015968
7	0.97	0	43	74.2	0.00016029
8	2	0	50.5	140	0.0001453
9	0.78	0	85.8	141	0.0001815
10	1.93	0	52	139	0.00014519

El coeficiente de permeabilidad medio es ***k* = 0.00016629 m/s.**

El agua desaguada estaba a una temperatura muy cercana a los 20°C por lo que tomamos este valor como el valor definitivo.

De este valor no conocíamos previamente el coeficiente de permeabilidad, pero es menor al anterior, del orden de magnitud correcto y la que menor permeabilidad presenta de las arenas, así que lo damos por bueno.

También puedo compararlo con la k que sale de la fórmula de Hazen tal y como se menciona en la guía, esta será la misma que en el anterior ensayo, pues la arena es la misma:

$$k = 0.052 \text{ cm/s} = 0.00052 \text{ m/s}$$

Tanto en la fórmula como en la tabla de valores normales de la guía obtenemos el mismo orden de magnitud que nosotros, por lo que el resultado es válido.

5.3 Ensayo con limo

Por último, el paso final tras el éxito del ensayo con arenas es llevar a cabo un ensayo para un material fino como el limo que al final es el material para el que se pensó este tipo de prueba con este aparato específico.

5.3.1 Material a ensayar

A diferencia de cómo nos pasaba con las arenas, en el laboratorio no contábamos con un material fino ya caracterizado y cuyas propiedades pudiésemos saber, pero sí un bloque de limos y un pequeño bote de 400 g de un limo en polvo. Lo que hicimos entonces fue machacar el bloque y mezclarlo con el limo en polvo que tenemos. La masa total al final es de 1734 g.

Una vez homogeneizado el material, procedemos a realizarle un ensayo de granulometría siguiendo la normativa española. Con esto, tendremos la curva granulométrica para esta muestra de limo y la dejaremos ya caracterizada para futuros usos en el laboratorio.

Curva granulométrica

Los tamices disponibles en el laboratorio son de los siguientes tamaños: 40, 28, 20, 12.5, 5, 2, 0.63, 0.4, 0.3, 0.2, 0.15, 0.106, 0.075, 0.063, 0.045 (mm). Para nuestro ensayo granulométrico utilizaremos los de 0.63, 0.4, 0.3, 0.2, 0.15, 0.106, 0.075, 0.063, 0.045 (mm). El orden en el agitador mecánico será de los que tengan la menor luz de malla a los que la tengan mayor, de abajo arriba. El vibrado se lleva a cabo durante quince minutos y potencia ocho sobre diez.

Puesta en funcionamiento del permeámetro de carga variable, un equipo de laboratorio para ensayos de permeabilidad en suelos cohesivos.

Óscar Yelo Díaz



Agitador mecánico en funcionamiento

De este primer paso por los tamices sacamos un reparto del peso en el que sobre todo se acumula el peso en el tamiz de 0.15 debido a que los finos obstruyen el paso del resto de limo, por ello realizamos un segundo vibrado del mismo tiempo y a la misma potencia, pero solo con los tamices inferiores a este: 0.15, 0.106, 0.075, 0.063, 0.045 intentando ajustar más a la realidad este ensayo granulométrico.

Una vez medidos los pesos retenidos en cada tamiz, los separamos en diferentes recipientes hasta su posterior uso en el permeámetro. Quedando así de la siguiente forma:



Separación del limo en diferentes recipientes según su tamaño

Resultados:

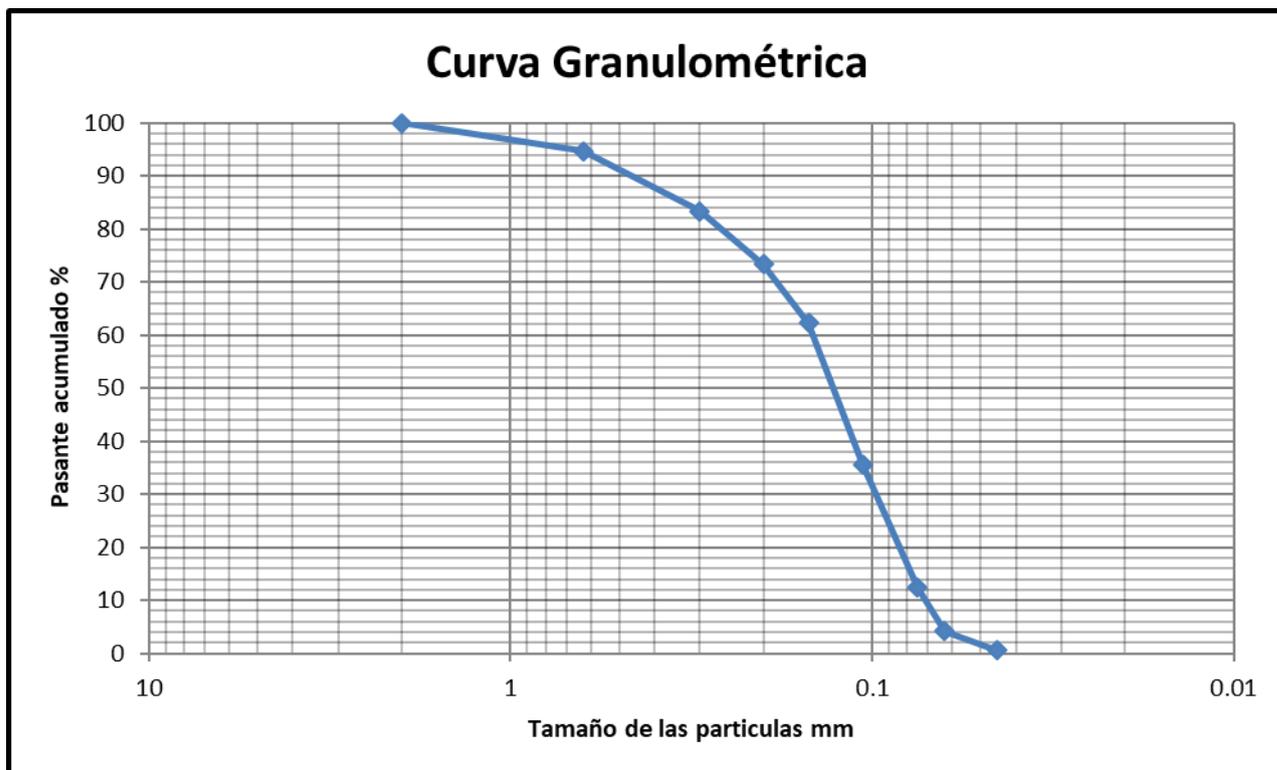
<i>Masa muestra + recipiente (g)</i>	2070.36
<i>Masa muestra (g)</i>	1734
<i>Masa recipiente (g)</i>	336.36
<i>Masa muestra tras tamizado (g)</i>	1732.72
<i>Error (%)</i>	0.07381776

Resumen resultados

<i>Tamiz</i>	<i>Abertura del tamiz (mm)</i>	<i>Peso parcial</i>	<i>% Retenido</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Pasante acumulado</i>
0	2	1734	0	0	100
1	0.63	90.86	5.244	5.244	94.756
2	0.3	197.21	11.382	16.625	83.375
3	0.2	172.74	9.969	26.595	73.405
4	0.15	192.92	11.134	37.729	62.271
5	0.106	461.08	26.610	64.339	35.661
6	0.075	402.48	23.228	87.567	12.433
7	0.063	143.61	8.288	95.855	4.145
8	0.045	61.51	3.549	99.405	0.595
Fondo		10.31	0.595	100	0
		1732.72	100		

Tabla de resultados después del tamizado

Curva granulométrica



Densidad aparente

1.714 kg/dm³

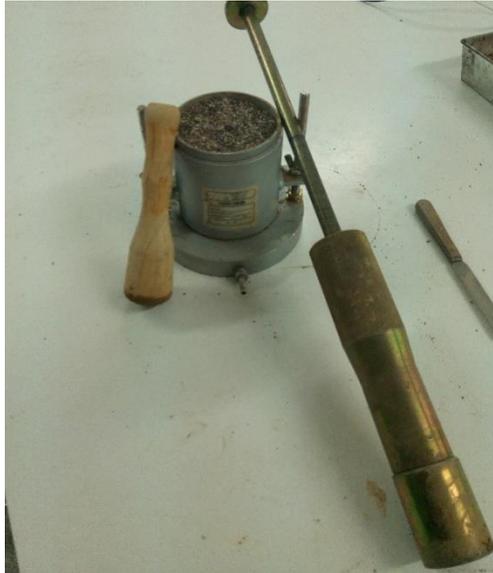
5.3.2 Ensayo de permeabilidad con limo húmedo compacto

En este último ensayo, el vertido de la muestra de limo en el permeámetro se realiza en cinco tongadas de un poco más de dos centímetros. La compactación se realiza siguiendo el método del Proctor modificado con 60 golpes por tongada, el pisón de Proctor que utilizamos es el del Proctor normal por comodidad. Los últimos golpes los damos con la maza de madera manual para un acabado más compacto y homogéneo.

En cuanto a la preparación del ensayo, nos ceñiremos más al método B de la NBR y en este caso pondremos una tongada de grava de dos milímetros antes del filtro de malla, tanto arriba como abajo, pues con el disco espaciador de la base y el de la tapa junto con el propio filtro de malla, no es suficiente para evitar que una buena cantidad de finos atraviese el conjunto y perdamos material del cuerpo de prueba.

Puesta en funcionamiento del permeámetro de carga variable, un equipo de laboratorio para ensayos de permeabilidad en suelos cohesivos.

Óscar Yelo Díaz



Acabado con la grava del permeámetro y pisón del Proctor

La masa total de limo que tenemos dentro del molde es de 1.481 kg y su densidad aparente la que ya hemos mencionado.

Tras la última capa de grava debemos de dejar unos cuatro milímetros para que cierre bien tras la puesta del disco y de la tapa.

Una vez cerrado el permeámetro y aseguradas todas las tuercas y palometas, procedemos al montaje del sistema para ensayarlo, podemos verlo en la siguiente imagen. Este montaje quedará de la misma forma que en las pruebas con arena. La válvula inferior será la que sirva para alimentar el aparato y la de arriba desaguará a un recipiente de altura conocida.

Cabe destacar también que, a pesar de ser después de la saturación, de la que hablaremos en el siguiente párrafo, la turbidez del agua será mayor por la mayor presencia de finos que atraviesan el tubo.



Montaje del sistema. Detalles del teflón y la turbidez del agua.

La saturación de la muestra a diferencia de como sucedía en anteriores ensayos, que al ser arenas eran sencillas, es muy complicada. La presión del grifo del laboratorio no era suficiente para lograr que entrase un caudal suficiente en el permeámetro, por lo que utilizamos una pequeña bomba de pistón que nos ayudó con esos primeros problemas, una vez el agua fluía con relativa facilidad pasamos a meter el agua con el grifo. El sentido del agua como ya hemos mencionado será ascendente y habremos de mover el permeámetro inclinándolo en todas direcciones para que todas las burbujas de aire que quedasen salgan por la válvula de arriba, siendo este proceso más lento que con la arena también. El tiempo que tarda en saturar esta muestra es alrededor de veinte minutos.

Como consecuencia de esta mayor presión para saturar la muestra, tenemos una pérdida en la válvula de la salida superior, por lo que la cubrimos con teflón para solventar este pequeño inconveniente.



Teflón en la válvula superior

El número de veces que repetimos el ensayo fue de seis, esta reducción en el número de ensayos se debe a que, entre ensayo y ensayo, con la arena daba igual meterle aire porque no tardaba mucho en salir. En cambio, en este caso se rellenaba la bureta manualmente para meter el menor aire posible al circuito, esto hacía que fuese un proceso más tedioso y la razón de este menor número de ensayos.

En cuanto a los datos que necesitaremos serán los mismos que en los ensayos de arena, y la fórmula que usaremos:

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot (t_1 - t_0)} \cdot \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right)$$

Ensayos:

Los valores que se mantendrán constantes serán:

L	0.11 m
A	0.007853982 m ²
a	1.9635 · 10 ⁻⁵ m ²

Aquí la longitud cambia debido a las dos tongadas de grava, que no afectan al coeficiente de permeabilidad y por tanto es menor el cuerpo de prueba.

<i>Ensayo</i>	<i>t₁</i>	<i>t₀</i>	<i>h₁</i>	<i>h₀</i>	<i>k</i>
1	69.8	0	71.5	93.2	1.044E-06
2	52.43	0	54.8	87	2.424E-06
3	85.72	0	105.2	131	7.036E-07
4	54.35	0	106	141	1.444E-06
5	59.43	0	50	87	2.563E-06
6	67.29	0	64	101	1.865E-06

El coeficiente de permeabilidad medio es ***k* = 1.67391E-06 m/s.**

El agua desaguada estaba a una temperatura muy cercana a los 20°C por lo que tomamos este valor como el valor definitivo.

Puedo compararlo con la *k* que sale de la fórmula de Hazen tal y como se menciona en la guía, dando prácticamente el mismo orden de magnitud que en nuestro ensayo:

$$k = c \cdot d_{10}^2 = 65 \cdot 0.007^2 = 0.0031 \text{ cm/s} = 0.000031 \text{ m/s}$$

Además, si lo comparamos con la tabla de valores normales de la guía obtenemos el mismo orden de magnitud que nosotros, por lo que el resultado es válido.

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	$> 10^{-2}$

Coefficientes de permeabilidad de algunos tipos de terreno. Mecánica de suelos. (Berry, 1993)

6. Conclusiones

Se han revisado y repasado los conceptos básicos sobre este campo, haciendo hincapié en los propios del trabajo, especialmente en la Ley de Darcy y en los relativos a la permeabilidad y al propio aparato.

Se ha llevado a cabo un exhaustivo proceso de búsqueda y cribado de normativa oficial y vigente en la que poder apoyarnos para llevar a cabo el ensayo de permeabilidad de carga variable para que se ajuste lo mejor posible a la realidad. Finalmente, tras no haber encontrado nada en las principales normas, nos quedamos con un Pliego de condiciones usado en la selección del subbalasto y con la Normativa brasileña (NBR), previa traducción, que ha sido en la que más nos hemos apoyado.

El permeámetro de carga variable ha sido correctamente limpiado y posteriormente, tras un inicio en el laboratorio y posteriormente en el taller mecánico de la UPCT, hemos conseguido un estado bastante positivo del dispositivo, nos hemos familiarizado con las piezas de las que se compone y hemos estudiado a fondo el uso de nuestro permeámetro en particular.

Hemos realizado una especie de guía de uso del permeámetro de carga variable como se proponía en la beca, para dejarla en el laboratorio y así que se pueda hacer uso del aparato en actividades docentes como prácticas o si fuese necesario para actividades profesionales. Esta guía contiene tanto los pasos a seguir en función del material, como explicaciones sencillas e imágenes explicativas de los procesos. También se hace referencia a las dos normativas que antes hemos mencionado.

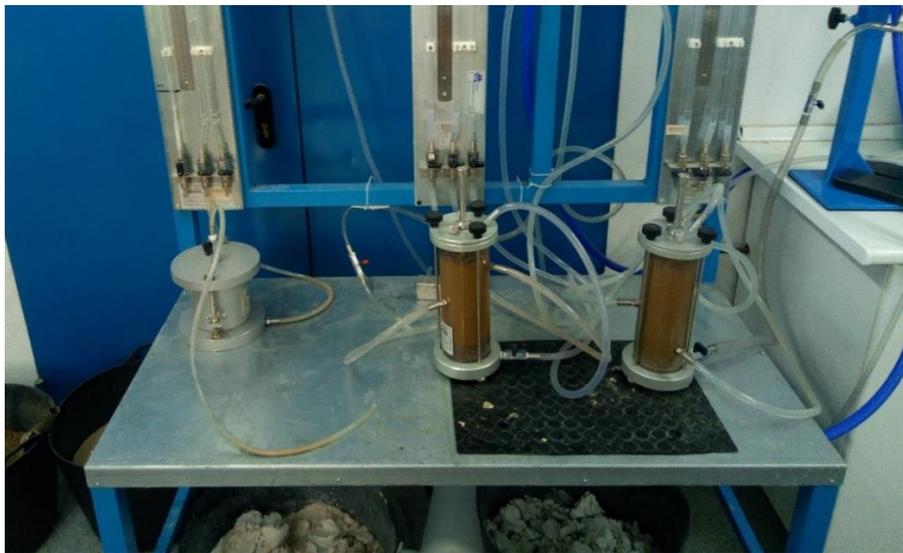
El permeámetro de carga variable tras la puesta a punto ha sido sometido a una prueba de estanqueidad para saber si era necesario reparar o sustituir alguna pieza o ser reforzado con teflón. El resultado de la prueba fue satisfactorio y no hizo falta ningún arreglo.

Se han realizado un total de tres ensayos con la misma arena, tanto suelta como compacta y tanto seca como húmeda. Tras la medición y el análisis de los resultados y tras compararlos con resultados que teníamos previamente del permeámetro de carga constante y también tras compararlos con fórmulas empíricas (basadas en la

granulometría del material) o tablas de valores normales de uso común en la ingeniería, podemos concluir que son válidos y los ensayos han sido exitosos.

Se ha realizado un último ensayo con limo, que es uno de los materiales para los que se ideó este aparato y tras algunos problemas con la saturación, obtenemos unos resultados que comparados con tablas de referencia podemos asumirlos también como satisfactorios.

Para terminar, se adjunta una foto de la disposición actual de la mesa del laboratorio donde se encuentran ubicados tanto los dos permeámetros de carga constante, como el nuestro de carga variable.



Disposición final de los permeámetros en la mesa del laboratorio

7. Referencias

- GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis Ignacio. *Ingeniería geológica*. Mercedes Ferrer, Luis Ortuño, Carlos Oteo. Pearson Educación, Madrid, 2002. ISBN: 84205-3104-9.
- SANDOVAL, G.F.B.; GALOBARDES, I.; TEIXEIRA, R.; TORALLES, B., “Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes”, en *Elsevier* (2017), 317-328
- BOWLES, Joseph E., *Manual de laboratorio de suelos en Ingeniería Civil*. McGraw Hill. Bogotá, 1981. ISBN: 968-451-046-2

- ABNT – Asociación Brasileña de Normas Técnicas, *Determinación del coeficiente de permeabilidad de suelos arcillosos a carga variable*. Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
- Ministerio de Fomento, 7735 ORDEN FOM/1269/2006, por la que se aprueban los Capítulos: 6. *Balasto* y 7. *Subbalasto del pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios (PF)*
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, *Análisis granulométrico de suelos por tamizado*, UNE 103 101. Madrid, España, 1995.
- AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. *Determinación de la permeabilidad de una muestra de suelo con carga constante*, UNE 103 403. Madrid, España, 1999.
- JUÁREZ, Eulalio; RICO RODRIGUEZ, Alfonso, *Mecánica de suelos I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos I*. Editorial Limusa, México D.F., 2005. ISBN: 968-18-0069-9
- 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. *Ensayo de compactación. Proctor Normal*, UNE 103 500. Madrid, España, 1994