

# Desarrollo de un Permeámetro de Carga Constante para la Evaluación de la Conductividad Hidráulica en Agregados de Capa Base

Castillo, Estefany

Universidad Tecnológica de Panamá  
Panamá, Panamá  
0009-0005-5399-4170

Grajales-Saavedra, Francisco

Universidad Tecnológica de Panamá  
Panamá, Panamá  
0000-0003-1705-864X

## Abstract

The experimental characterization of the permeability of base course aggregates used in pavement construction is essential to understand their behavior under high moisture conditions, especially in areas with high rainfall such as Panama. This project aims to conduct an experimental and numerical study focused on the permeability of locally used base course aggregates, to identify the factors that influence the internal drainage of pavement layers and their impact on the performance and durability of road structures. To obtain the hydraulic conductivity of the aggregates, a constant head permeameter was used. This equipment is ideal for coarse-grained materials, such as those used in base course layers. However, a permeameter with the appropriate dimensions to evaluate the permeability coefficients of these aggregates is very expensive and not available in Panama. For this reason, the design and construction of equipment suitable for measuring the permeability of materials with a maximum particle size of nearly 1" was carried out. This permeameter was developed based on the guidelines established by ASTM D2434, which regulates the test methods for measuring the hydraulic conductivity of granular soils. Several flow verification tests have been conducted on the fabricated permeameter. With these tests performed, it was possible to verify its correct operation, airtightness and compliance with the flow capacity requirement established by the standard, ensuring the reliability of the equipment before starting the tests with the base course aggregates.

**Keywords:** Constant Head Permeameter, Base Course, ASTM D2434, Hydraulic Conductivity, Pavement

## Resumen

La caracterización experimental de la permeabilidad de los agregados de capa base utilizados en la construcción de pavimentos es fundamental para comprender el comportamiento de estos bajo condiciones de alta humedad, especialmente en lugares lluviosos como Panamá. Este proyecto tiene como objetivo desarrollar una investigación enfocada en la permeabilidad de agregados de capa base utilizados localmente, con el fin de identificar los factores que afectan el drenaje interno de las capas del pavimento y su incidencia en el desempeño y la durabilidad de las estructuras viales. Para obtener la conductividad hidráulica de los agregados se utilizará un permeámetro de carga constante, este equipo es ideal para materiales de grano grueso, como los utilizados en estos agregados. Un permeámetro con las dimensiones adecuadas para evaluar los coeficientes de permeabilidad de estos agregados es muy costoso y no se encuentra disponible en Panamá. Por este motivo, se realizó el diseño y construcción de un equipo que sea apto para la medición de la permeabilidad de materiales con un tamaño máximo de partícula de hasta casi 1". Este permeámetro se desarrolló en base a los lineamientos establecidos por la norma ASTM D2434 que regula los métodos de prueba para la medición de la conductividad hidráulica de suelos granulares. Se han realizado distintas pruebas de verificación de flujo al permeámetro fabricado. Con estas pruebas realizadas se pudo comprobar su correcto funcionamiento y validar la confiabilidad del equipo antes de iniciar las pruebas con los agregados de capa base.

**Palabras claves:** Permeámetro de Carga Constante, Capa Base, ASTM D2434, Conductividad Hidráulica, Pavimento

## 1. INTRODUCCIÓN

Para realizar los ensayos de permeabilidad en agregados de capa base provenientes de distintas canteras de la República de Panamá, se necesita un permeámetro de gran dimensión, debido al tamaño considerable de las partículas de los agregados a evaluar. Al no contar con un permeámetro adecuado y con la imposibilidad de adquirir uno comercial con las dimensiones requeridas, se optó por construir un permeámetro de forma artesanal, debido a que esta era la alternativa más económicamente viable y funcional que se tenía disponible.

Para la construcción de este permeámetro se realizó la selección de materiales tomando en cuenta la accesibilidad, resistencia y compatibilidad con los estándares técnicos establecidos en la norma ASTM D2434, la cual regula los métodos de prueba estándar para la medición de la conductividad hidráulica de suelos de grano grueso.

La construcción de este permeámetro representa una alternativa de bajo costo a los

equipos comerciales, que fácilmente puede ser replicada si no se cuenta con un equipo especializado disponible.

## 2. MÉTODO

### A. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

El ensayo de permeabilidad de carga constante se basa en el flujo de agua a través de una muestra de suelo contenida en una celda cilíndrica bajo una diferencia de presión constante [1]. Este ensayo se desarrolla con un equipo conocido como permeámetro de carga constante.

El diseño del permeámetro de carga constante necesario para el desarrollo de esta investigación se basó en las especificaciones descritas por la norma ASTM D2434, en la que se describen los elementos necesarios para construir un permeámetro de carga constante funcional y que obtenga resultados confiables. Además de cumplir con los criterios establecidos por la norma, el diseño de este permeámetro se enfocó en desarrollar una opción funcional y económica en comparación a un permeámetro comercial.

Este equipo está compuesto por una celda cilíndrica, dos placas (una de cubierta para la parte superior de la celda y una para sellar la base de la celda) y accesorios para unir los componentes del equipo sin riesgos de fugas de agua durante el desarrollo del ensayo. Las dimensiones de la celda pueden variar dependiendo del suelo a ensayar. Además de la celda, para este ensayo se utiliza un sistema hidráulico que incluye un reservorio con agua a un nivel fijo para mantener la carga constante.

- a. Celda del Permeámetro : El cálculo de las dimensiones de la celda se basó en los criterios dados por la norma, la cual establece que el diámetro y la altura de ésta deben ser como mínimo 10 y 6 veces el diámetro ( $D_{95}$ ), respectivamente, de la muestra que se va a ensayar. En las especificaciones granulométricas para la capa base dadas por el MOP, el tamaño máximo de partículas permitido más común es de 1 pulgada (25.4mm). Utilizando este valor como referencia, se escogió un valor de 0.80" para el  $D_{95}$ , con el cual se calcularon las dimensiones ideales que debe tener la celda del permeámetro.

$$\begin{aligned}\varnothing_{celda} &= 10 \times D_{95} = 10 \times 0.80" = 8" \\ L_{celda} &= 6 \times D_{95} = 6 \times 0.80" = 4.8"\end{aligned}$$

Para la construcción de la celda del permeámetro se utilizó como elemento principal un tubo de PVC con glándula de las siguientes dimensiones: diámetro interno de 8" y longitud de 17"; ambas cumplen con las dimensiones calculadas. Se utilizó un tubo de PVC debido a la variedad de opciones de accesorios compatibles (como registros sanitarios y tapones) con el tubo que se pudieran adaptar para funcionar como la placa

superior e inferior de la celda. Para sellar la celda del permeámetro se utilizaron dos accesorios de PVC; se utilizó como placa superior un registro sanitario completo de PVC de 8" de diámetro interno que cuenta con una tapa que permite abrir y cerrar la celda constantemente sin perder su hermeticidad; y como placa inferior de la celda se utilizó un tapón liso de 8" de diámetro.

- b. Reservorio de carga constante: Se buscó en el mercado local, un tanque con dimensiones similares al disponible en el Laboratorio de Suelos, Asfalto y Geología de la Universidad Tecnológica de Panamá y de un material lo suficientemente resistente para soportar el peso del agua sin deformarse. El modelo comercial más cercano a las dimensiones del tanque del laboratorio fue una caja de plástico transparente que tenía las siguientes medidas: 60.3cm de largo, 34.3 cm de alto y 40.6 cm de ancho.

Para mantener un volumen de agua similar al utilizado en el laboratorio, la altura del nivel de agua constante debería ser de aproximadamente 6.5 in. Para la preparación del tanque de carga constante se realizaron dos perforaciones: la del rebosadero y la conexión con la celda del permeámetro. La perforación para el rebosadero se realizó a una altura de 6.5 pulgadas medidas desde el fondo del tanque con el propósito de expulsar el agua que sobrepase el nivel delimitado.

- c. Sistema Hidráulico: Finalizada la construcción de la celda del permeámetro y el tanque de carga constante, el siguiente paso en la fabricación del permeámetro es el ensamblaje del sistema hidráulico. Este sistema está constituido por diferentes tubos de PVC de 1" de diámetro, accesorios, válvulas y conexiones que permiten el flujo regulado de agua desde el tanque de carga constante hasta la celda del permeámetro.
- d. Discos Porosos: Para la fabricación de los discos porosos necesarios para el permeámetro, se utilizaron materiales que fueran extremadamente permeables y que permitieran un mayor flujo de agua que las muestras de agregados que se iban a ensayar. Los materiales escogidos para fabricar los discos porosos fueron los siguientes: un geotextil no tejido ya que permite el paso del agua, pero evita el paso de las partículas de los agregados que pueden bloquear la salida del agua; y piedras pómez obtenidas en playas de Panamá para rellenar los espacios vacíos en el tapón y sobre la muestra a ensayar ya compactada.

## B. ARMADO DEL EQUIPO

El ensamblaje del equipo inicia con la colocación de la base del permeámetro sobre una superficie nivelada y la colocación del reservorio de carga constante sobre una plataforma elevada, para así garantizar un gradiente hidráulico adecuado. Una vez colocados ambos elementos se procedió a la instalación de la celda del permeámetro sobre la base. Dentro de la celda del permeámetro se colocó inicialmente el disco poroso inferior que va hasta

la parte inferior de la salida de agua y luego se situó otra capa de geotextil, la cual se fijó con un zuncho plástico a la salida de agua para así evitar su desplazamiento y el paso de partículas de la muestra hacia la válvula de salida.

Posteriormente, la celda se rellenó con la muestra a ensayar en 3 capas de igual espesor, compactadas cada una con 25 golpes con un cincel de 1" de diámetro hasta alcanzar una altura de muestra de 9". Sobre la muestra se colocó una nueva capa de geotextil y se rellenó el volumen restante de la celda con piedras pómez. Por último, se selló la celda con la tapa del registro sanitario y se realizó la conexión de las mangueras entre la válvula de entrada y el reservorio de carga constante, finalizando así el ensamblaje del permeámetro.

### C. VERIFICACIÓN DE FLUJO DEL SISTEMA

Una vez finalizado el ensamblaje del equipo se procedió a realizar la prueba de capacidad de flujo conforme a lo establecido en la norma ASTM D2434. Esta prueba establece que la capacidad de flujo del permeámetro sin muestra debe ser al menos 5 veces mayor que la obtenida con una muestra dentro de la celda del permeámetro, bajo las mismas condiciones de carga hidráulica [2]. Para garantizar la fácil replicación de los ensayos se fijó un punto de referencia mediante un nivel láser en la pared desde el cual se midió una altura de 52 cm hasta la salida de agua de la celda y de 218 cm hasta el rebosadero del tanque. Estas medidas se mantuvieron durante todos los ensayos para asegurar la igualdad de condiciones entre las pruebas de permeabilidad realizadas.

Antes de iniciar el ensayo, se realizó la verificación de las válvulas de entrada y salida de agua; y la de salida del aire. Posterior a esto se empezó el llenado de la celda con agua, manteniendo la válvula de salida de agua cerrada, para así garantizar la saturación de la muestra (cuando se realiza la prueba con muestra) y además comprobando que no quede aire en el sistema. Luego de esto se abrió la válvula de salida y se inició el ensayo, registrando los volúmenes de agua descargados en diferentes pruebas con duraciones de entre 2 a 5 minutos, con los cuales se puede determinar la capacidad de flujo del sistema con y sin muestra.

El material utilizado para la prueba de verificación con muestra fue arena, debido a su fácil disponibilidad en Panamá y a su alta permeabilidad en comparación con la de los agregados de capa base. Este último factor permite tener la seguridad de que, si el sistema cumple con la norma usando un medio poroso de mayor conductividad hidráulica, también lo hará con los agregados, que, al tener una conductividad menor, producen una diferencia aun mayor con la capacidad de flujo del sistema vacío, asegurando así el cumplimiento del permeámetro con la norma ASTM D2434 para evaluar estos agregados.

### 3. RESULTADOS

En la figura 1 se muestra el permeámetro completamente ensamblado, en esta figura se observan todos los elementos del permeámetro conectados y el equipo está listo para iniciar con los ensayos. En la figura 2 se muestra el equipo ya en funcionamiento y se aprecia el agua que pasa a través de la muestra y como esta se está recolectando para medir el volumen total de agua que pasa por la muestra en un intervalo de tiempo determinado.



Figura 1. Permeámetro ensamblado



Figura 2. Permeámetro en funcionamiento

Para determinar la capacidad de flujo del permeámetro con solo los elementos de la celda, sin muestra, se utilizaron recipientes calibrados en litros. Utilizando estos recipientes se realizaron cinco pruebas con una duración de 2 minutos cada una, en las cuales se recolecto el volumen de agua que descarga el permeámetro en este intervalo de tiempo. Con estos datos de volumen se calculó la capacidad de flujo del permeámetro sin muestra. Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Diámetro de la celda } (\varnothing) &= 8 \text{ in} = 20.32 \text{ cm} \\ \text{Altura de la muestra } (L) &= 9 \text{ in} = 22.86 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Área } (A) &= \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} = \frac{\pi \cdot (20.32 \text{ cm})^2}{4} \\ &= 324.293 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Tabla 1. Resultados de las pruebas de permeabilidad (sin muestra)

Prueba	Tiempo (s)	Volumen Total (cm <sup>3</sup> )	k (cm/s)	k (m/s)
1	120	66 629,630	0,240	0,00240
2	120	66 425,926	0,239	0,00239
3	120	65 944,444	0,238	0,00238

Se promediaron los valores de coeficientes de permeabilidad, para obtener un único valor

de  $k$  que se utilizó para el cálculo del gradiente hidráulico y la capacidad de flujo:

$$k_{prom} = 0.239 \frac{cm}{s} = 0.00239 \frac{m}{s} \qquad i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{218 \text{ cm} - 55 \text{ cm}}{22.86 \text{ cm}} = \frac{163 \text{ cm}}{22.86 \text{ cm}} = 7.130$$

La capacidad de flujo se calculó con la siguiente fórmula establecida por Darcy [3]:

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

$$Q_{vacío} = 0.203 \frac{cm}{s} \cdot 7.130 \cdot 324.293 \text{ cm}^2 = 552.778 \frac{cm^3}{s} = 0.000553 \frac{m^3}{s}$$

Este procedimiento se repitió con el permeámetro lleno de arena. El tiempo por prueba paso a ser de 5 minutos, para así recoger un volumen significativo de agua, y que sea posible realizar su medición. Los resultados obtenidos son los siguientes:

**Tabla 2. Resultados de las pruebas de permeabilidad (con muestra)**

Prueba	Tiempo (s)	Volumen Total (cm <sup>3</sup> )	k (cm/s)	k (m/s)
1	300	16 000,000	0,0231	0,000231
2	300	15 351,852	0,0221	0,000221
3	300	15 074,074	0,0217	0,000217
4	300	14 888,889	0,0215	0,000215
5	300	14 703,704	0,0212	0,000212

$$k_{prom} = 0.0219 \frac{cm}{s} = 0.000219 \frac{m}{s}$$

$$Q_{arena} = 0.0219 \frac{cm}{s} \cdot 7.130 \cdot 324.293 \text{ cm}^2 = 50.679 \frac{cm^3}{s} = 0.0000507 \frac{m^3}{s}$$

Con este valor se hizo la comprobación del cumplimiento de la norma:

$$Q_{vacío} \geq 5 \cdot Q_{arena}$$

$$552.778 \frac{cm^3}{s} \geq 5 \cdot 50.679 \frac{cm^3}{s}$$

$$552.778 \frac{cm^3}{s} \geq 253.395 \frac{cm^3}{s}$$

*Sí cumple*

Al realizar estos cálculos se pudo confirmar que el permeámetro si cumple con la capacidad de flujo necesaria establecida por la norma.

## 4. CONCLUSIONES

Finalizado el desarrollo y la construcción del permeámetro de carga constante fabricado con materiales accesibles y de bajo costo; se sometió este a la prueba de verificación de capacidad de flujo la cual confirmó su funcionamiento y hermeticidad. Además, con esta prueba se verificó que el equipo cumplió con los parámetros establecidos por la norma ASTM D2434 sobre la relación entre la capacidad de flujo del permeámetro con y sin muestra, garantizando así que el permeámetro fabricado obtendrá resultados confiables en los ensayos que se realizarán posteriormente a los diferentes agregados de capa base.

## Referencias

- [5] "Geotech data." Accessed: Jul. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.geotechdata.info/geotest/constant-head-permeability-test>
- [6] "Standard Test Method for Permeability of Granular Soils - ASTM D2434," Mar. 15, 2022, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D2434-22.
- [7] H. R. CEDERGREN, SEEPAGE, DRAINAGE, AND FLOW NETS, 3rd ed. 1989.

## Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC XVIII a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC XVIII ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.