

## PERMEABILIDAD DE SUELOS GRANULARES (CABEZA CONSTANTE)

INV E – 130 – 13

### 1 OBJETO

---

- 1.1** Este método de ensayo describe un procedimiento para determinar el coeficiente de permeabilidad mediante un método de cabeza constante para el flujo laminar de agua a través de suelos granulares. El procedimiento está destinado a establecer valores representativos del coeficiente de permeabilidad de suelos granulares presentes en depósitos naturales para ser colocados en terraplenes o cuando se empleen como bases bajo pavimentos. Para limitar las influencias de consolidación durante el ensayo, este procedimiento está limitado a suelos granulares alterados que no contengan más de 10 % de partículas que pasen tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200).
- 1.2** Esta norma reemplaza la norma INV E–130–07.

### 2 CONDICIONES FUNDAMENTALES DEL ENSAYO

---

- 2.1** Las siguientes condiciones ideales de ensayo son prerequisites para el flujo laminar de agua a través de suelos granulares, bajo condiciones de cabeza constante:
- 2.1.1** Continuidad de flujo, sin cambios en el volumen del suelo durante el ensayo.
  - 2.1.2** Flujo con los vacíos del suelo saturados con agua y sin burbujas de aire dentro de los mismos.
  - 2.1.3** Flujo uniforme sin cambios en el gradiente hidráulico.
  - 2.1.4** Proporcionalidad directa de la velocidad de flujo con gradientes hidráulicos por debajo de ciertos valores críticos, a partir de los cuales se inicia el flujo turbulento.
- 2.2** Todos los demás tipos de flujo que involucran saturación parcial de los vacíos del suelo, flujo turbulento, y flujo no uniforme, son de carácter transitorio y

producen coeficientes de permeabilidad variables y dependientes del tiempo; por esto, requieren condiciones y procedimientos especiales de ensayo.

### 3 EQUIPO

- 3.1 Permeámetros** – Como el mostrado en la Figura 130 - 1. Deberán tener cilindros para muestras con diámetro mínimo de, aproximadamente, 8 a 12 veces el tamaño máximo de partícula, de acuerdo con la Tabla 130 - 1. El permeámetro se deberá ajustar con: (1) un disco poroso o una malla reforzada adecuada para el fondo, con una permeabilidad mayor que la de la muestra de suelo, pero con aberturas suficientemente pequeñas (no mayores que el tamaño que separa el 10 % más fino del suelo) para impedir el movimiento de partículas; (2) tomas de manómetros para medir la pérdida de carga, "h", sobre una longitud, "l", equivalente, al menos, al diámetro del cilindro; (3) un disco poroso o una malla reforzada adecuada con un resorte adherido a la parte superior, o cualquier otro dispositivo, para aplicar una ligera presión de resorte, de 22 a 45 N (5 a 10 lbf) de carga total, cuando la placa superior se halla colocada en su sitio. Esto mantendrá la densidad y el volumen del suelo sin cambio durante la saturación y durante el ensayo de permeabilidad, para satisfacer los requerimientos prescritos en el numeral 2.1.1.
- 3.2 Tanque de cabeza constante** – Con filtro, como se muestra en la Figura 130 - 1, para suministrar agua y para remover el aire de la conexión de agua, provisto de válvulas de control adecuadas para mantener las condiciones descritas en el numeral 2.1.2.
- Nota 1: Si se prefiere, se puede emplear agua desaireada.*
- 3.3 Embudos amplios** – Equipados con conductos cilíndricos especiales de 25 mm (1") de diámetro para partículas de tamaño máximo de 9.5 mm (tamiz de 3/8"), y de 12.7 mm (1/2") de diámetro para partículas de tamaño de 2.00 mm (tamiz No. 10). La longitud del conducto deberá ser mayor que la longitud total de la cámara de permeabilidad, por lo menos en 150 mm (6").
- 3.4 Equipo para la compactación del espécimen** – Se puede emplear el equipo de compactación que se considere deseable. Se sugieren los siguientes: (1) un pisón vibratorio provisto de un pie de compactación de 51 mm (2") de diámetro; (2) un pisón de impacto con un pie apisonador de 51 mm (2") de diámetro, y (3) una varilla para pesas deslizantes de 100 g (0.25 lb) (para arenas) a 1 kg (2.25 lb) (para suelos con un contenido apreciable de grava),

que tenga una altura de caída ajustable a 102 mm (4") para arenas y a 203 mm (8") para suelos con alto contenido de grava.

- 3.5** *Bomba de vacío* – O aspirador de chorro de agua, con grifo para evacuar y saturar muestras de suelo bajo vacío completo (Figura 130 - 2).
- 3.6** *Tubos manométricos* – Con escalas métricas para medir cabeza de agua.
- 3.7** *Balanza* – De 2 kg (4.4 lb) de capacidad y posibilidad de lectura de 1 g (0.002 lb).
- 3.8** *Cucharón* – Con una capacidad de alrededor de 100 g. (0.25 lb) de suelo.
- 3.9** *Elementos misceláneos* – Termómetros, reloj con apreciación de segundos, vaso graduado de 250 ml, jarra de 1 litro, cubeta para mezclar, cucharas, etc.

Tabla 130 - 1. Diámetro del cilindro

EL TAMAÑO MÁXIMO DE PARTÍCULA SE ENCUENTRA ENTRE LOS TAMICES DE ABERTURAS	DÍAMETRO MÍNIMO DEL CILINDRO			
	MENOS DE 35 % RETENIDO EN EL TAMIZ:		MÁS DE 35 % RETENIDO EN EL TAMIZ:	
	2.00 mm (No. 10)	9.5 mm (3/8")	2.00 mm (No. 10)	9.5 mm (3/8")
2.00 mm (No. 10) y 9.5 mm (3/8")	76 mm (3")	-	114 mm (4.5 mm)	-
9.5 mm (3/8") y 19.0 mm (¾")	-	152 mm (6")	-	229 mm (9")

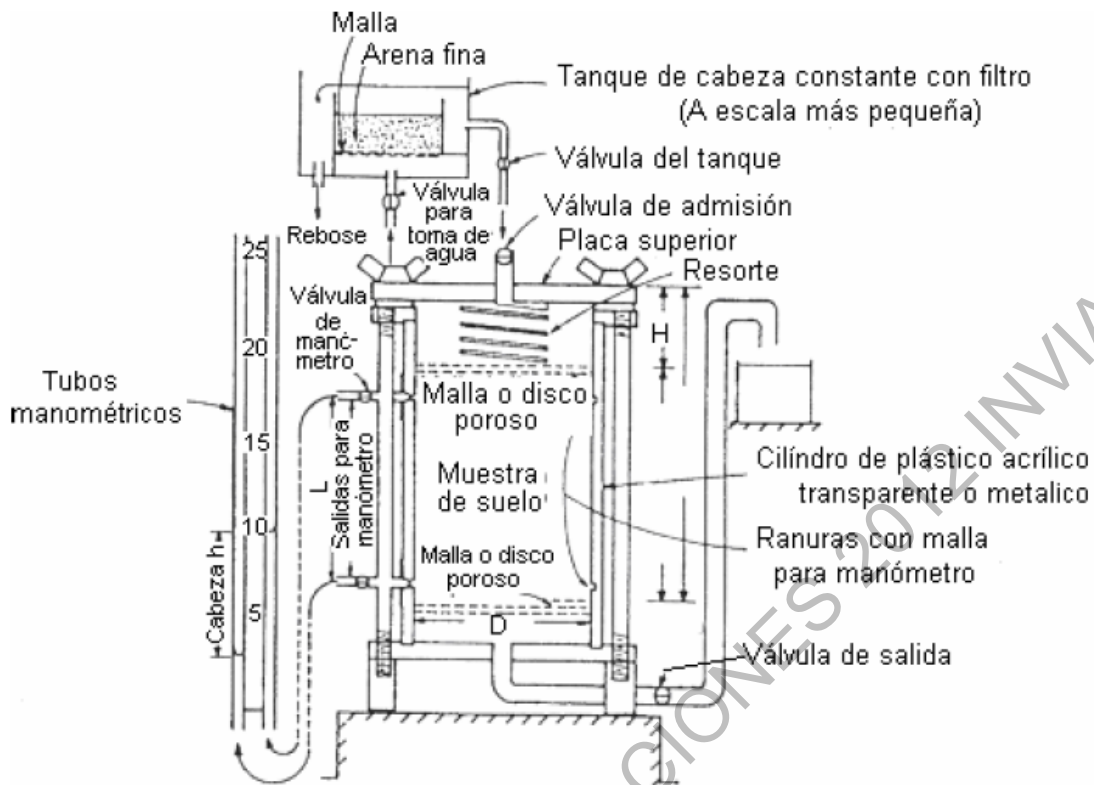


Figura 130 - 1. Permeámetro de cabeza constante

#### 4 MUESTRA

- 4.1** Se deberá escoger por cuarteo una muestra representativa de suelo granular secado al aire, que contenga menos del 10 % de pasante por el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200), y en cantidad suficiente para satisfacer las exigencias de los numerales 4.2 y 4.3.
- 4.2** Se deberá realizar un análisis granulométrico, de acuerdo con la norma INV E-123, sobre una muestra representativa de la totalidad del suelo, antes del ensayo de permeabilidad. Las partículas mayores de 19.0 mm (3/4") deberán ser separadas por tamizado. Los sobretamaños no deberán ser empleados para el ensayo de permeabilidad, pero su porcentaje deberá ser reportado.

*Nota 2: Para establecer valores representativos de coeficientes de permeabilidad para el intervalo que pueda existir en la situación que se esté investigando, se deberán obtener para ensayo muestras de los suelos más finos, intermedios y más gruesos.*

- 4.3 Del material del cual se han removido los sobretamaños (ver numeral 4.2) se escoge, mediante cuarteo, una cantidad aproximadamente igual al doble de la requerida para llenar la cámara del permeámetro.

## 5 PREPARACIÓN

- 5.1 El tamaño del permeámetro que se va a emplear deberá cumplir lo estipulado en la Tabla 130 - 1.

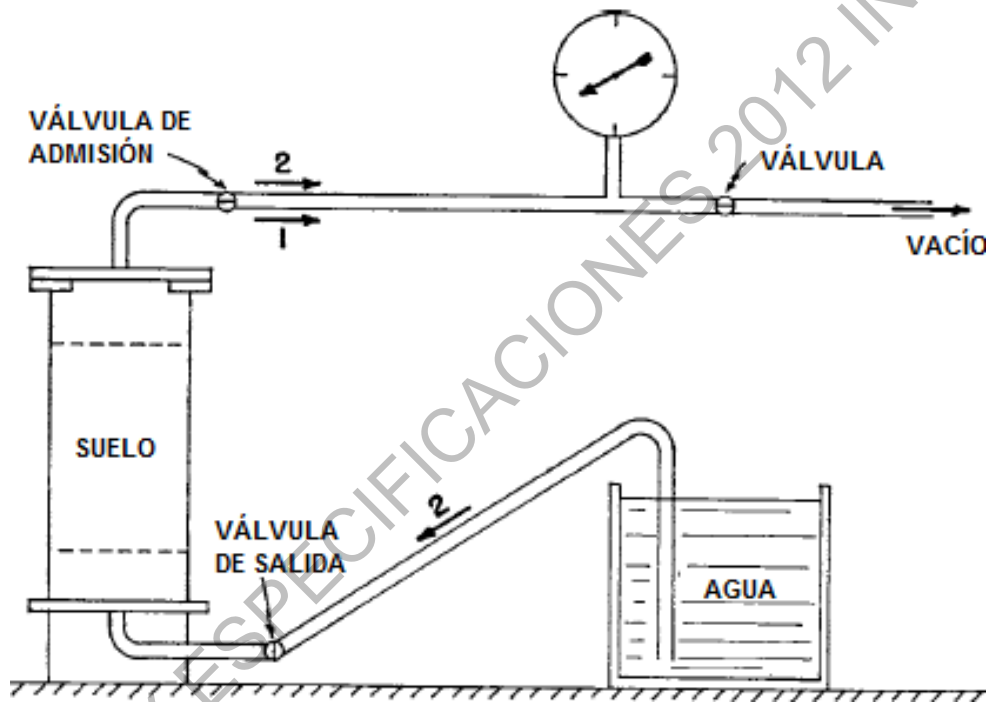


Figura 130 - 2. Dispositivo para evacuar y saturar el espécimen

- 5.2 Se deben efectuar las siguientes medidas iniciales en centímetros o en centímetros cuadrados según corresponda, y se anotan en el formato de informe (Figura 130 - 3): el diámetro interior "D" del permeámetro, la longitud "L" entre las salidas de manómetro; la profundidad " $H_1$ ", medida en cuatro puntos simétricamente espaciados desde la superficie superior de la placa tope del cilindro de permeabilidad, hasta la parte superior de la piedra porosa superior, o de la malla colocada temporalmente sobre la placa porosa o malla inferior. Esto deduce automáticamente el espesor de la placa porosa superior o malla, de las medidas de altura usadas para determinar el volumen del suelo colocado en el cilindro de permeabilidad. Se usa una placa tope duplicada, que tenga cuatro aberturas grandes simétricamente colocadas, a través de las

cuales se puedan efectuar las medidas requeridas para determinar el valor promedio de " $H_1$ ". Se calcula el área de la sección transversal, " $A$ ", de la muestra.

**5.3** Se toma una pequeña parte de la muestra escogida como se prescribe en el numeral 4.3, para las determinaciones de humedad. Se anota la masa de la muestra sobrante secada al aire (Ver numeral 4.3),  $M_1$ , para las determinaciones de peso unitario.

**5.4** Se coloca el suelo preparado mediante uno de los procedimientos siguientes, en capas delgadas de espesor uniforme tras la compactación, aproximadamente igual al tamaño máximo de partícula, pero no menor de unos 15 mm (0.60").

**5.4.1** Para suelos con un tamaño máximo de 9.5 mm (3/8") o menos; se coloca en el aparato de permeabilidad el embudo de tamaño apropiado, como se prescribió en el numeral 3.3, con el conducto en contacto con la placa porosa inferior o malla, o con la capa previamente formada, y se llena el embudo con suelo suficiente para formar una capa, tomando suelo de diferentes áreas de la muestra contenida en la bandeja. Se levanta el embudo a una altura de 15 mm (0.60"), o aproximadamente igual al espesor de la capa no consolidada que se va a conformar, y se distribuye el suelo con un movimiento lento en espiral, trabajando desde el perímetro del aparato hacia el centro, de manera que se forme una capa uniforme. Se remezcla el suelo que se encuentra en la bandeja para cada capa sucesiva, con el fin de reducir la segregación que se hubiera podido producir.

**5.4.2** Para suelos con un tamaño máximo mayor de 9.5 mm (3/8"), se distribuye el suelo con un cucharón. Se puede lograr un extendido uniforme deslizando el cucharón con suelo en posición aproximadamente horizontal con una leve pendiente descendente a lo largo de la superficie interior del dispositivo hasta llegar al fondo o hasta la capa formada, inclinando luego el cucharón y levantándolo hacia el centro con un sencillo movimiento lento, lo que permite al suelo correr suavemente sobre el cucharón sin segregación. Se gira suficientemente el cilindro para la cucharada siguiente, progresando así en torno al perímetro interior para formar una capa uniforme compactada, de espesor igual al tamaño máximo de partícula.

Ensayo No. \_\_\_\_\_ Fecha de ensayo \_\_\_\_\_  
 Localización de la muestra \_\_\_\_\_ Fecha muestra \_\_\_\_\_ Informe \_\_\_\_\_  
 Sondeo \_\_\_\_\_ Muestra \_\_\_\_\_ Profundidad \_\_\_\_\_

a) DESCRIPCION DEL MATERIAL \_\_\_\_\_  
 Para ser empleado: \_\_\_\_\_

b) DETERMINACION DEL PESO UNITARIO  
 Diámetro,  $\phi$ , cm \_\_\_\_\_ Altura antes, H1 \_\_\_\_\_  
 Área, A,  $\text{cm}^2$  \_\_\_\_\_ Altura después, H2 \_\_\_\_\_  
 Longitud, L, cm \_\_\_\_\_ Altura neta, cm \_\_\_\_\_  
 Contenido de humedad (secado al aire) \_\_\_\_\_  
 Masa unitaria seca,  $\text{g}/\text{cm}^3$  (lb/pe<sup>3</sup>) D \_\_\_\_\_  
 D (máx) \_\_\_\_\_ Relación de vacíos, e. \_\_\_\_\_  
 D (mín) \_\_\_\_\_ Densidad relativa, D.R. \_\_\_\_\_

c) ENSAYO DE PERMEABILIDAD (GRADO DE COMPACTACIÓN)

Enayo No	MANOMETRO		Cabeza h	Q $\text{cm}^3$	t (s)	Q / (At)	h / L	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	k (cm /seg)
	M1	M2							
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Figura 130 - 3. Formato para la recolección de los datos del ensayo de permeabilidad (cabeza constante)

**5.5** Se compactan capas sucesivas de suelo a la densidad relativa deseada, empleando un procedimiento apropiado, como se describe a continuación, hasta una altura de alrededor de 2 cm (0.8") por encima de la salida del manómetro superior.

**5.5.1** *Densidad mínima (densidad relativa del 0 %)* – Se continúan colocando capas de suelo en forma sucesiva mediante uno de los procedimientos descritos en los numerales 5.4.1 o 5.4.2, hasta cuando el aparato esté lleno al nivel apropiado.

**5.5.2** *Densidad máxima (densidad relativa del 100 %):*

**5.5.2.1** *Compactación mediante el pisón vibratorio* – Se compacta totalmente cada capa de suelo con el pisón vibratorio mediante golpes distribuidos uniformemente sobre la superficie de la capa, siguiendo una trayectoria regular. La presión de contacto y la duración de la acción vibratoria en cada punto no deberán hacer que el suelo escape por debajo de los bordes de la pata de compactación, tendiendo así a aflojar la capa. Se debe realizar un número suficiente de coberturas para producir la densidad máxima, lo que prácticamente queda en evidencia cuando no haya movimiento visible de las partículas superficiales adyacentes a los bordes del pisón de compactación.

**5.5.2.2** *Compactación mediante el pisón de peso deslizante* – Se compacta completamente cada capa de suelo mediante golpes de compactación uniformemente distribuidos sobre la superficie de la capa. Se ajusta la altura de caída y se proporcionan suficientes coberturas para producir la densidad máxima, de acuerdo con el tamaño de las partículas y con el contenido de grava del suelo.

**5.5.2.3** *Compactación mediante otros métodos* – La compactación se puede cumplir mediante otros métodos aprobados, como los proporcionados mediante equipos vibratorios para empaque, con los cuales se debe tener cuidado para obtener un espécimen uniforme sin segregaciones de partículas por sus tamaños.

**5.5.3** *Densidad relativa intermedia entre 0 y 100 %* – En un recipiente separado del mismo diámetro que el cilindro de permeabilidad, se ajusta la compactación mediante tanteos, para obtener valores reproducibles de la densidad relativa. Se compacta el suelo en el cilindro de permeabilidad mediante estos procedimientos en capas delgadas, hasta una altura de alrededor de 2 cm (0.80") por encima de la salida del manómetro superior.

*Nota 3: Con el fin de relacionar sistemáticamente y de manera representativa las condiciones de densidad relativa que pueden regir en depósitos naturales o en terraplenes compactados, se deberá efectuar una serie de ensayos de permeabilidad que cubra el rango de las densidades relativas en el campo.*



**5.6 Preparación del espécimen para el ensayo de permeabilidad:**

- 5.6.1** Se nivela la superficie superior del suelo, colocando la placa porosa o la malla superior en posición y rotándola suavemente hacia adelante y hacia atrás.
- 5.6.2** Se miden y anotan: la altura final de la muestra, ( $H_1 - H_2$ ), midiendo la profundidad  $H_2$  desde la superficie superior de la placa tope perforada empleada para medir  $H_1$ , hasta el tope de la placa porosa superior o malla, en cuatro puntos simétricamente dispuestos, después de comprimir ligeramente el resorte para asentar la placa porosa o la malla durante las medidas; la masa final del suelo secado al aire empleado en el ensayo ( $M_1 - M_2$ ), pesando el remanente de suelo dejado en la bandeja ( $M_2$ ). Se calculan y anotan las masas unitarias, la relación de vacíos, y la densidad relativa de la muestra de ensayo.
- 5.6.3** Con el empaque en su sitio, se presiona hacia abajo la placa superior contra el resorte y se fija con seguridad en la parte superior del cilindro del permeámetro, produciendo un sello hermético. Esto satisface la condición descrita en el numeral 2.1.1, en el sentido de mantener la densidad inicial sin cambio significativo de volumen durante el ensayo.
- 5.6.4** Empleando una bomba de vacío o una aspiradora adecuada, se aspira la muestra bajo 500 mm (20") de mercurio, como mínimo, durante 15 minutos, para remover el aire de los vacíos y el adherido a las partículas. Se continúa la operación mediante una saturación lenta de la muestra de abajo hacia arriba (Figura 130 - 2) bajo vacío total, con el fin de liberar cualquier aire restante en la muestra. La saturación continuada de la muestra se puede mantener más adecuadamente mediante el uso de: (1) agua desaireada o (2) de agua mantenida a una temperatura de flujo suficientemente alta para causar una disminución del gradiente de temperatura en el espécimen durante el ensayo. En el ensayo se podrá emplear agua natural o agua con bajo contenido de minerales (nota 4), pero se deberá anotar en el formato de ensayo, en cualquier caso, el fluido utilizado. Esto satisfará la condición descrita en el numeral 2.1.2 para la saturación de los vacíos del suelo.

*Nota 4: Agua natural es la que se presenta in situ en el suelo o en la roca. Si es posible, se debe emplear esta agua, pero (al igual que el agua desaireada), puede ser un refinamiento poco práctico para la ejecución de ensayos en gran escala.*

- 5.6.5** Después de saturado el espécimen y de que el permeámetro se encuentre lleno de agua, se cierra la válvula del fondo en el tubo de

desagüe (Figura 130 - 2) y se desconecta el vacío. Se debe tener cuidado de constatar que el sistema de flujo de permeabilidad y el sistema de manómetros se hallen libres de aire y estén trabajando satisfactoriamente. Se llena el tubo de admisión con agua proveniente del tanque de carga constante, abriendo ligeramente la válvula del filtro del tanque. Se conecta el tubo de admisión al tope del permeámetro, se abren ligeramente la válvula de admisión y los grifos del manómetro de salida para permitir que fluya el agua, eliminándose así el aire. Se conectan los tubos manométricos de agua a las salidas de manómetro y se llenan con agua para remover el aire. Se cierra la válvula de admisión y se abre la de desagüe, para que el agua alcance en los tubos manométricos un nivel estable bajo cabeza cero.

## 6 PROCEDIMIENTO

- 6.1** Se abre ligeramente la válvula de admisión del tanque filtrante para la primera prueba en las condiciones descritas en el numeral 2.1.3, demorándose las medidas de gasto y de cabeza hasta que se alcance una condición de cabeza estable sin que exista variación apreciable de los niveles de los manómetros. Se miden y anotan el tiempo, "t", la cabeza, "h", (diferencia de nivel en los manómetros), el gasto, "Q", y la temperatura del agua, "T".
- 6.2** Se repiten las pruebas con incrementos de cabeza de 0.5 cm con el fin de establecer exactamente la región de flujo laminar con velocidad,  $v$  (siendo  $v = Q/At$ ), directamente proporcional al gradiente hidráulico, "i" (siendo  $i = h/L$ ). Cuando se hagan patentes las desviaciones de la relación lineal, indicando con ello la iniciación de condiciones de flujo turbulento, se pueden emplear intervalos de cabeza de 1 cm para llevar el ensayo suficientemente dentro de la zona del flujo turbulento, con el fin de definir esta zona, si esto fuere significativo para las condiciones del campo.

*Nota 5: Se requieren valores mucho más bajos del gradiente hidráulico  $h/L$ , de los que generalmente se reconocen, para asegurar condiciones de flujo laminar. Se sugieren los siguientes valores: compacidad suelta, relaciones de  $h/L$  de 0.2 a 0.3, y compacidad densa, relaciones de  $h/L$  de 0.3 a 0.5. Los valores menores de  $h/L$  se aplican a los suelos más gruesos y los mayores a los suelos más finos.*

- 6.3** Al concluir el ensayo de permeabilidad, se drena y se examina la muestra para establecer si era esencialmente homogénea y de carácter isotrópico. Cualquier clase de rayas o capas horizontales alternadas claras y oscuras evidencian la segregación de finos.

## 7 CÁLCULOS

7.1 Se calcula el coeficiente de permeabilidad,  $k$ , así:

$$k = \frac{Q L}{A t h} \quad [130.1]$$

- Donde:  $k$ : Coeficiente de permeabilidad;
- $Q$ : Gasto, es decir cantidad de agua descargada;
- $L$ : Distancia entre manómetros;
- $A$ : Área de la sección transversal del espécimen;
- $t$ : Tiempo total de desagüe;
- $h$ : Diferencia de cabeza en los manómetros.

7.2 Se corrige la permeabilidad a 20° C (68° F), multiplicando “ $k$ ” por la relación entre la viscosidad de agua a la temperatura del ensayo y la viscosidad del agua a 20° C (Tabla 130 - 2).

Tabla 130 - 2. Relación entre la viscosidad del agua y la temperatura a una presión de 101.325 kPa

TEMPERATURA °C	VISCOSIDAD DINÁMICA kg/m.s	TEMPERATURA °C	VISCOSIDAD DINÁMICA kg/m.s
0.00	0.001792	21.00	0.000979
1.00	0.001731	22.00	0.000955
2.00	0.001674	23.00	0.000933
3.00	0.001620	24.00	0.000911
4.00	0.001569	25.00	0.000891
5.00	0.001520	26.00	0.000871
6.00	0.001473	27.00	0.000852
7.00	0.001429	28.00	0.000833
8.00	0.001386	29.00	0.000815
9.00	0.001346	30.00	0.000798
10.00	0.001308	31.00	0.000781
11.00	0.001271	32.00	0.000765
12.00	0.001236	33.00	0.000749
13.00	0.001202	34.00	0.000734

TEMPERATURA °C	VISCOSIDAD DINÁMICA kg/m.s	TEMPERATURA °C	VISCOSIDAD DINÁMICA kg/m.s
14.00	0.001170	35.00	0.000720
15.00	0.001139	36.00	0.000705
16.00	0.001109	37.00	0.000692
17.00	0.001081	38.00	0.000678
18.00	0.001054	39.00	0.000666
19.00	0.001028	40.00	0.000653
20.00	0.001003	41.00	0.0003414

## 8 INFORME

**8.1** El informe del ensayo de permeabilidad deberá incluir la siguiente información:

- 8.1.1** Proyecto, fechas, número de la muestra, sitio, y cualquier otra información pertinente.
- 8.1.2** Análisis granulométrico, clasificación, tamaño máximo de partícula y porcentaje de cualquier material de sobretamaño no utilizado.
- 8.1.3** Masa unitaria seca, relación de vacíos, densidad relativa a la cual se colocó el material, densidad máxima y densidad mínima.
- 8.1.4** Declaración de cualquier desviación respecto de estas condiciones de ensayo, de manera que los resultados puedan ser evaluados y empleados.
- 8.1.5** Datos completos de ensayo, como se indican en el formato para los datos de ensayo (Figura 130 - 3).
- 8.1.6** Curvas que representen la velocidad,  $Q/(At)$ , contra el gradiente hidráulico,  $h/L$ ; que cubran los rangos de las identificaciones del suelo y de las densidades relativas.

## 9 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 2434 – 68 (2006)