

ANALISIS GRANULOMETRICO POR MEDIO DEL HIDROMETRO

I.N.V. E - 124

1. OBJETO

El análisis hidrométrico se basa en la Ley de Stokes, la cual relaciona la velocidad de una esfera, cayendo libremente a través de un fluido, con el diámetro de la esfera.

$$v = \frac{\tau_s - \tau_f}{1800 \cap} \times D^2$$

donde:

- v = Velocidad de la esfera (cm/s)
- τ_s = Densidad de la esfera (g/cm³)
- τ_f = Densidad del fluido (g/cm³)
- \cap = Viscosidad del fluido (g . s/cm²)
- D = Diámetro de la esfera (mm).

Se asume que la ley de Stokes puede ser aplicada a una masa de suelo dispersado, con partículas de varias formas y tamaños. El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo. Para ensayos de rutina con fines de clasificación, el análisis con hidrómetro se aplica a partículas de suelos que pasan el tamiz de 2.00 mm (No.10). Cuando se quiere más precisión, el análisis con hidrómetro se debe realizar a la fracción de suelo que pase el tamiz de 75 μ m (No.200).

2. EQUIPO

- 2.1 Tres (3) Balanzas, de sensibilidades 0.01 g, 0.1 g y 1 g.
- 2.2 Tamices, de 2.0 mm (No.10) y de 75 μ m (No.200)
- 2.3 Tamizador mecánico.

2.4 Aparato agitador, mecánico o neumático, con su vaso (Figuras. No. 1 y No. 2).

2.5 Hidrómetro.-Graduado para leer, de acuerdo con la escala que tenga grabada, el peso específico de la suspensión ó los gramos por litro de suspensión. En el primer caso, la escala tiene valores de peso específico que van de 0.995 a 1.038 y estará calibrado para leer 1.00 en agua destilada a 20 °C (68°F). Este Hidrómetro se identifica como 151 H. En el otro caso la escala tiene valores de gramos de suelo por litro (g/l) que van de -5 á+ 60. Se identifica como 152 H y está calibrado para el supuesto que el agua destilada tiene gravedad específica de 1.00 a 20 °C (68 °F) y que el suelo en suspensión tiene un peso específico de 2.65. Las dimensiones de estos hidrómetros son las mismas; sólo varían las escalas. (Ver Figura No. 4).

2.6 Cilindro de vidrio para sedimentación, de unos 457 mm (18") de alto, y 63.5 mm (2.5") de diámetro y marcado para un volumen de 1000 ml a 20 °C (68 °F).

2.7 Termómetro de inmersión, con apreciación de 0.5 °C (0.9 °F).

2.8 Cronómetro o reloj.

2.9 Horno, capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F).

2.10 Estufa o plancha de calentamiento.

2.11 Utensilios de uso general.- Envases apropiados para el manejo y secado de las muestras y un par de guantes de asbesto o caucho.

2.12 Agente Dispersante.- Una solución de hexametáfosfato de sodio; se usará en agua destilada o desmineralizada en proporción de 40 g de hexametáfosfato de sodio por litro de solución.

Las soluciones de esta sal deberán ser preparadas frecuentemente (al menos una vez al mes) o ajustar su pH de 8 a 9 por medio de carbonato de sodio. Las botellas que contienen soluciones deberán tener la fecha de preparación marcada.

2.13 Agua.- Toda agua utilizada deberá ser destilada o desmineralizada. El agua para el ensayo con hidrómetro deberá llevarse hasta la temperatura que prevalecerá durante el ensayo; así, si el cilindro de sedimentación se va a

colocar en baño de agua, la temperatura del agua destilada o desmineralizada que va a utilizarse se llevará a la temperatura de dicho baño. Si el cilindro de sedimentación se coloca a la temperatura ambiente del laboratorio, el agua deberá tener dicha temperatura. La temperatura normal de ensayo es la de 20 °C (68 °F). Sin embargo, variaciones de temperatura pequeñas, no implicarán el uso de las correcciones previstas.

3. CALIBRACION DEL HIDROMETRO

3.1 El hidrómetro debe ser calibrado para determinar su profundidad efectiva en términos de lecturas de hidrómetro. (Ver Figura. No.4). - Si se dispone de un hidrómetro tipo 151-H ó 152-H la profundidad efectiva puede ser obtenida de la tabla No.1. Si el hidrómetro disponible es de otro tipo, procédase a su calibración de acuerdo a los pasos siguientes:

3.2 Determínese el volumen del bulbo del hidrómetro. (V_B). Este puede ser determinado utilizando uno de los métodos siguientes:

Midiendo el volumen de agua desplazada.- Llénese con agua destilada o desmineralizada un cilindro graduado de 1000 ml de capacidad hasta aproximadamente 900 ml. Obsérvese y anótese la lectura del nivel del agua. El agua debe estar aproximadamente a 20 °C. (68 °F). Introdúzcase el hidrómetro y anótese la nueva lectura. La diferencia entre estas dos lecturas es igual al volumen del bulbo más la parte del vástago que está sumergida. El error debido a la inclusión del volumen del vástago es tan pequeño que puede ser despreciado para efectos prácticos.

Determinación del volumen a partir del peso del hidrómetro.- Pésese el hidrómetro con una aproximación de 0.01 g. Debido a que el peso específico del hidrómetro es aproximadamente igual a la unidad, el peso del hidrómetro en gramos, es equivalente a su volumen en centímetros cúbicos. Este volumen incluye el volumen del bulbo y del vástago. El error debido a la inclusión del volumen del vástago es despreciable.

3.3 Determínese el área "A" del cilindro graduado midiendo la distancia que existe entre dos marcas de graduación. El área "A" es igual al volumen incluido entre las dos graduaciones dividido entre la distancia medida.

3.4 Mídase y anótese la distancia desde la marca de calibración inferior en el vástago del hidrómetro hasta cada una de las marcas de calibración principales (R).

3.5 Mídase y anótese la distancia desde el cuello del bulbo hasta la marca de calibración inferior. La distancia "H" correspondiente a cada lectura "R", es igual a la suma de las dos distancias medidas en los pasos 3.4 y 3.5.

3.6 Mídase la distancia desde el cuello hasta la punta inferior del bulbo. La distancia $h/2$ localiza el centro del volumen de un bulbo simétrico. Si el bulbo utilizado no es simétrico, el centro del volumen se puede determinar con suficiente aproximación proyectando la forma del bulbo sobre una hoja de papel y localizando el centro de gravedad del área proyectada.

3.7 Determínense las profundidades efectivas "L", correspondientes a cada una de las marcas de calibración principales "R" empleando la fórmula:

$$L = H_R + \frac{1}{2} \cdot (h - V_B / A)$$

siendo:

- L = Profundidades efectivas
- H_R = Distancias correspondientes a las lecturas R.
- h = Distancia desde el cuello hasta la punta inferior del bulbo.
- V_B = Volumen del bulbo
- A = Área del cilindro graduado.

3.8 Constrúyase una curva que exprese la relación entre "R" y "L", como se muestra en la Figura. No. 5. Esta relación es esencialmente una línea recta para los hidrómetros simétricos.

4. PREPARACION DE LA MUESTRA

4.1 El tamaño aproximado de la muestra que se debe usar para el análisis por el hidrómetro varía con el tipo de suelo que va a ser ensayado. La cantidad requerida para suelos arenosos es de 75 a 100 g y para limos y arcillas de 50 a 60 g (Peso seco). El peso exacto de la muestra en suspensión puede ser determinado antes o después del ensayo. Sin embargo el secado al horno de algunas arcillas antes del ensayo puede causar cambios permanentes en los tamaños de granos aparentes; las muestras de estos suelos deben ser conservadas con su contenido de humedad natural, y ensayadas sin ser secadas al horno.

4.2 El peso se determina mediante la siguiente fórmula:

$$W_s = \frac{\text{Peso del suelo húmedo}}{1 + \frac{\text{humedad (w)}}{100}}$$

donde la humedad (w) se determinará usando una porción de muestra que no vaya a ser ensayada. (Norma INV E - 122).

5. PROCEDIMIENTO

El procedimiento consistirá en los siguientes pasos:

5.1 Anótese en el formato toda la información existente para identificar la muestra, como por ejemplo: obra, número de la muestra y otros datos pertinentes.

5.2 Determínese la corrección por defloculante y punto cero, Cd. y la corrección por menisco, Cm, a menos que ya sean conocidas (ver aparte 6.1 y 6.3).

Anótese toda esta información en el formato.

5.3 Determínese el peso específico de los sólidos, Gs, (Norma INV E-122).

5.4 Si el peso secado al horno se va a obtener al principio del ensayo, séquese la muestra al horno, déjese enfriar y pésese con una aproximación de 0.1 g. Anótese en el formato el valor obtenido. Colóquese la muestra en una cápsula de 250 ml previamente identificada con un número, agréguese agua destilada o desmineralizada hasta que la muestra quede totalmente sumergida. Colóquese el agente dispersante en este momento: 125 ml de solución de hexametáfosfato de sodio (40g/l).

Déjese la muestra en remojo por una noche hasta que los terrones de suelo se hayan desintegrado. Suelos altamente orgánicos requieren un tratamiento especial, y puede ser necesario oxidar la materia orgánica antes del ensayo. La oxidación puede ser llevada a cabo mezclando la muestra con una solución, al 30 %, de peróxido de hidrógeno; esta solución oxidará toda la materia orgánica.

Si el suelo contiene poca cantidad de materia orgánica, el tratamiento con peróxido de hidrógeno no es necesario.

5.5 Transfiérase la muestra con agua, de la cápsula a un vaso de dispersión (Figuras. Nos. 1 y 2), lavando cualquier residuo que quede en la cápsula con agua destilada o desmineralizada. Agréguese agua al vaso de dispersión si es necesario, hasta que la superficie de ésta quede de 50 a 80 mm por debajo de la boca del vaso; si el vaso contiene demasiada agua, ésta se derramará durante el mezclado. Colóquese el vaso de dispersión en el aparato agitador durante el tiempo de un minuto.

- Para lograr la dispersión se puede emplear también aire a presión en lugar del método mecánico del agitador. En este caso, se coloca un manómetro entre el vaso y la válvula de control, la cual se abre inicialmente para obtener una presión de 0.07 kg/cm² (1 psi). Se transfiere la lechada de suelo-agua de la cazuela al vaso de dispersión, lavando con agua destilada el remanente de la cazuela, y rellenando si es necesario, con más agua destilada hasta el volumen de 250 ml. Se tapa el vaso y se abre la válvula de control hasta obtener una presión de 1.4 kg/cm² (20 psi). La dispersión se hará de acuerdo con la siguiente tabla :

Indice de Plasticidad del Suelo	Periodo de dispersión min.
Menor del 5%	5
Del 6% a 20%	10
Mayor del 20%	15

Los suelos que contienen altos porcentajes de mica se dispersarán durante un (1) minuto.

5.6 Se transfiere la suspensión a un cilindro de sedimentación de 1000 ml. La suspensión debe ser llevada a la temperatura que se espera prevalecerá en el laboratorio durante el ensayo.

5.7 Un minuto antes de comenzar el ensayo, tómesese el cilindro de sedimentación y tapándolo con la mano o con un tapón adecuado, agítese la suspensión vigorosamente durante varios segundos, con el objeto de remover los sedimentos del fondo y lograr una suspensión uniforme. Continúese agitando hasta completar un minuto volteando el cilindro hacia arriba y hacia abajo alternativamente. Algunas veces, es necesario aflojar los sedimentos del fondo

del cilindro, mediante un agitador de vidrio antes de proceder a agitar la lechada. Se deben ejecutar sesenta (60) giros durante ese minuto.

Alternativamente, la suspensión puede ser agitada antes de proceder al ensayo mediante un agitador manual, semejante al que se muestra en el esquema de la Figura No.3. Moviendo dicho agitador hacia arriba y hacia abajo, a través de la suspensión, se consigue una distribución uniforme de las partículas de suelo. Este proceso evita también la acumulación de sedimentos en la base y en las paredes del cilindro graduado.

5.8 Al terminar el minuto de agitación, colóquese el cilindro sobre una mesa. Póngase en marcha el cronómetro. Si hay espuma presente, remuévala tocándola ligeramente con un pedazo de papel absorbente. Introdúzcase lentamente el hidrómetro en la suspensión. Se debe tener mucho cuidado cuando se introduce y cuando se extrae, para evitar perturbar la suspensión.

5.9 Obsérvense y anótense las dos primeras lecturas de hidrómetro, al minuto, y a los dos minutos después de haber colocado el cilindro sobre la mesa. Estas lecturas deben realizarse en el tope del menisco. Inmediatamente después de realizar la lectura de los 2 minutos, extráigase cuidadosamente el hidrómetro de la suspensión y colóquese en un cilindro graduado con agua limpia. Si el hidrómetro se deja mucho tiempo en la suspensión, parte del material que se está asentando se puede adherir al bulbo, causando errores en las lecturas. Luego, introdúzcase nuevamente el hidrómetro y realícense lecturas a los: 5, 15, 30, 60, 120, 250 y 1.440 minutos. Todas estas lecturas deben realizarse en el tope del menisco formado alrededor del vástago. Inmediatamente después de cada una de estas lecturas, extráigase el hidrómetro cuidadosamente de la suspensión y colóquese en el cilindro graduado con agua limpia.

5.10 Después de realizar la lectura de hidrómetro de los 2 minutos y después de cada lectura siguiente, colóquese un termómetro en la suspensión, mídase la temperatura y anótese en la planilla con una aproximación de 0.5 °C (0.9 °F). Los cambios de temperatura de la suspensión durante el ensayo afectan los resultados. Las variaciones en la temperatura deben ser minimizadas colocando el cilindro lejos de fuentes de calor tales como hornos, rayos de sol o ventanas abiertas. Una forma conveniente de controlar los efectos de la temperatura, es colocar el cilindro graduado que contiene la suspensión en un baño de agua.

5.11 Si el peso de la muestra se va a determinar al final del ensayo, lávese cuidadosamente toda la suspensión transfiriéndola a una cápsula de evaporación. Séquese el material al horno, déjese enfriar y determínese el peso

de la muestra. El peso seco de la muestra de suelo empleada se obtendrá restándole a este valor el peso seco del agente defloculante empleado.

6. CORRECCION DE LAS LECTURAS DEL HIDROMETRO

6.1 Antes de proceder con los cálculos, las lecturas de hidrómetro deberán ser corregidas por menisco, por temperatura, por defloculante y punto cero.

6.2 Corrección por menisco (Cm).- Los hidrómetros se calibran para leer correctamente a la altura de la superficie del líquido. La suspensión de suelo no es transparente y no es posible leer directamente a la superficie del líquido; por lo tanto, la lectura del hidrómetro se debe realizar en la parte superior del menisco. La corrección por menisco es constante para un hidrómetro dado, y se determina introduciendo el hidrómetro en agua destilada o desmineralizada y observando la altura a la cual el menisco se levanta por encima de la superficie del agua. Valores corrientes de Cm son:

Hidrómetro tipo 151 H: $C_m = 0,6 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$

Hidrómetro tipo 152 H: $C_m = 1,0 \text{ g/litro.}$

6.3 Corrección por temperatura (Ct).- A cada una de las lecturas de hidrómetro se debe aplicar también un factor de corrección por temperatura, el cual debe sumarse algebraicamente a cada lectura. Este factor puede ser positivo o negativo, dependiendo de la temperatura de la suspensión en el momento de realizar cada lectura. Obténgase el valor del factor de corrección por temperatura para cada lectura de hidrómetro empleando la tabla No.2 y anótese estos valores en su planilla.

6.4 Corrección por agente de dispersión y por desplazamiento del punto cero (Cd).

- Los granos de suelos muy finos en suspensión tienden normalmente a flocular y se adhieren de tal forma que tienden a precipitarse juntos. Por lo tanto, es necesario añadir a las muestras un agente de disgregación para evitar la floculación durante el ensayo. Los agentes defloculantes siguientes han sido utilizados satisfactoriamente para la mayoría de los suelos:

Agente Defloculante	Fórmula
<ul style="list-style-type: none"> • Hexametafosfato de sodio amortiguado con Carbonato de sodio (Calgón) • Polifosfato de sodio • Tripolifosfato de sodio • Tetrafosfato de sodio 	<p style="text-align: center;"> NaPO_3 o $(\text{NaPO}_3)_6$ $\text{Na}_{12}\text{P}_{10}\text{O}_{31}$ $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ $\text{Na}_6\text{P}_4\text{O}_{13}$ </p>

- La adición de un agente defloculante produce aumento en la densidad del líquido y obliga a realizar una corrección a la lectura del hidrómetro observado. Así mismo, como la escala de cada hidrómetro ha sido graduada para registrar una lectura cero o lectura inicial a una temperatura base, que generalmente es 20 °C (68 °F), existirá un desplazamiento del punto cero, y las lecturas de hidrómetro observadas también deberán corregirse por este factor.
- La corrección por defloculante se determina generalmente en conjunto con la corrección por punto cero; por ello se les denomina "corrección por defloculante y punto cero".
- El procedimiento para determinar la corrección por defloculante y punto cero consistirá en los pasos siguientes:

Se selecciona un cilindro graduado de 1000 ml de capacidad y se llena con agua destilada o desmineralizada con una cantidad de defloculante igual a la que se empleará en el ensayo. Si en el ensayo no se va a utilizar defloculante, llénese el cilindro sólo con agua destilada o desmineralizada. En este caso la corrección será solamente por punto cero. Realícese, en la parte superior del menisco, la lectura del hidrómetro e introdúzcase a continuación un termómetro para medir la temperatura de la solución. Calcúlese la corrección por defloculante y punto cero (Cd) mediante la fórmula:

$$-Cd = \tau' + Cm \pm Ct$$

donde:

- τ' = Lectura del hidrómetro, en agua con defloculante únicamente
- Cm = Corrección por menisco
- Ct = Corrección por temperatura, sumada algebraicamente.

7. CALCULOS

7.1 Lectura de hidrómetro corregida.- Calcúlense las lecturas de hidrómetro corregidas por menisco (R) sumándole a cada lectura de hidrómetro no corregida (R'), la corrección por menisco Cm. o sea:

$$R = R' + C_m$$

Anótense en la planilla los valores de R obtenidos.

7.2 Cálculo del diámetro de las partículas (D).- Determínese el diámetro de las partículas correspondientes a cada lectura de hidrómetro empleando el nomograma de la Figura No.6. En este nomograma, la escala (R) correspondiente a las profundidades efectivas (L) (ver tabla No.1), se elaborará empleando la curva de calibración correspondiente al hidrómetro que se va a emplear en el ensayo (Figura No.5). La secuencia de los pasos a seguir para calcular el diámetro de las partículas (D) mediante el nomograma de la Figura No.6, se indica esquemáticamente en la parte inferior derecha de dicha Figura.

El diámetro de las partículas de suelo en suspensión en el momento de realizar cada lectura de hidrómetro se puede calcular también con la fórmula siguiente:

$$D(\text{mm}) = K (L / t)$$

donde:

L = Profundidad efectiva en cm
t = Tiempo transcurrido en min.

y

$$K = \frac{30 \times \mu/g}{\tau_s - \tau_w}$$

donde:

g = Aceleración gravitacional = 980.7 cm/s²
 μ = Coeficiente de viscosidad del agua en Poises
 τ_s = Peso unitario de los sólidos del suelo en g/cm³.
 τ_w = Peso unitario del agua destilada, a la temperatura T, en g/cm³.

Los valores de K están tabulados en la tabla No. 3, en función del peso específico y la temperatura.

7.3 Cálculo del porcentaje más fino.- Para calcular el porcentaje de partículas de diámetro más fino que el correspondiente a una lectura de hidrómetro dada, utilice la fórmulas siguientes:

Para hidrómetros 151 H

$$\text{Porcentaje más fino} = \frac{G_s}{G_s - 1} \times \frac{100}{W_o} \times (R - C_d \pm C_t)$$

Para hidrómetros 152 H

$$\text{Porcentaje más fino} = \frac{100 \times a}{W_o} \times (R - C_d \pm C_t)$$

donde:

G_s = Peso específico de los sólidos (Ensayo INV E-222)

W_o = Peso de la muestra de suelo secado al horno que se empleó para el análisis del hidrómetro.

$(R - C_d \pm C_t)$ = Lectura de hidrómetro corregida por menisco menos corrección por defloculante y punto cero, más (sumada algebraicamente) corrección por temperatura.

a = Factor de corrección por peso específico (ver tabla No. 4).

Anótese todos los valores obtenidos en su planilla. El factor C_t puede ser positivo o negativo dependiendo de la temperatura de la suspensión en el momento de realizar la lectura. Úsese la fórmula $(R - C_d \pm C_t)$ dependiendo si C_t es positivo o negativo.

8. OBSERVACIONES

8.1 Los siguientes errores posibles causarían determinaciones imprecisas en un análisis granulométrico por hidrómetro.

- Suelo secado al horno antes del ensayo.- Excepto para el caso de suelos inorgánicos de resistencia seca baja, el secado al horno puede causar cambios permanentes en el tamaño de las partículas.
- Agente dispersante no satisfactorio o en cantidad insuficiente.- Siempre y cuando se vayan a ensayar suelos nuevos o no usuales, es necesario realizar tanteos para determinar el tipo y la cantidad de compuesto químico que producirá la dispersión y defloculación más efectivas.

- Dispersión incompleta del suelo en la suspensión.- Agitación insuficiente de la suspensión en el cilindro al comienzo del ensayo.
- Demasiado suelo en suspensión.- Los resultados del análisis hidrométrico serán afectados si el tamaño de la muestra excede las cantidades recomendadas.
- Perturbación de la suspensión cuando se introduce o se remueve el hidrómetro.- Tal perturbación es muy corriente que ocurra cuando el hidrómetro se extrae rápido después de una lectura.
- El hidrómetro no está suficientemente limpio.- La presencia de polvo o grasa en el vástago del hidrómetro puede impedir el desarrollo de un menisco uniforme.
- Calentamiento no uniforme de la suspensión.- Variación excesiva de la temperatura de la suspensión durante el ensayo.
- Pérdida de material después del ensayo.- Si el peso del suelo secado al horno se obtiene después del ensayo, toda la suspensión debe ser lavada cuidadosamente del cilindro.

9. CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

AASHTO T 88

ASTM D 422

MOP E 115 (Venezuela)

NLT 104