

Montaje de la Prueba “Determinación del Tamaño de las Partículas de Arena Menores a 75 Micras en Base a su Velocidad de Asentamiento Usando La Ley De Stokes” para el Laboratorio de Análisis Petrofísicos

Lina Fernanda López Rueda, Edwing Andrés Camargo Pinto

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero de Petróleos

Director

Félix Arenas Rueda

Ingeniero de Petróleos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2020

**Dedicatoria**

Mis agradecimientos van dirigidos principalmente a Dios por todas las bendiciones recibidas, a mis padres y esposa por el apoyo incondicional, a mi director de proyecto por la confianza y a mi compañera de tesis por su trabajo y cumplimiento.

Edwing Andres Camargo

**Tabla de contenido**

Introducción .....	13
1. Objetivos .....	14
1.1. Objetivo general.....	14
1.2. Objetivos específicos .....	14
2. Marco de referencia.....	15
2.1. Descripción litológica .....	15
2.2. Clasificación de las partículas minerales del suelo.....	15
2.3. Características De Limos y Arcillas .....	15
2.4. Propiedades mecánicas de los suelos.....	16
2.4.1. Resistencia al corte .....	17
2.4.2. Presión lateral del suelo .....	17
2.4.3. Capacidad de carga .....	17
2.4.4. Permeabilidad .....	17
2.4.5. Estabilidad de taludes .....	17
2.5. Granulometría .....	18
2.6. Curva granulométrica .....	18
2.7. Hidrómetro convencional .....	18
2.8. Hidrómetro 152H.....	19
2.9. Análisis granulométrico.....	20

2.10. Técnicas de análisis granulométrico .....	21
2.11. Método de la pipeta.....	21
2.12. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro .....	21
3. Fundamento Ley de Stokes .....	23
4. Metodología para cálculo de tamaño de partículas .....	26
4.1. Objetivo .....	26
4.2. Equipos y materiales.....	26
4.3. Preparación de la muestra .....	27
4.4. Procedimiento para realización de la prueba .....	27
4.5. Corrección de las lecturas del hidrómetro .....	28
4.5.1. Corrección por menisco (Cm).....	29
4.5.2. Corrección por temperatura (Ct).....	29
4.5.3. Corrección por defloculante y punto cero (Cz).....	31
4.6. Cálculos .....	31
4.7. Resultados de las pruebas .....	36
4.7.1. Ensayo 1. Granulometría por hidrómetro para arcilla. ....	38
4.7.2. Ensayo 2. Granulometría por hidrómetro para bentonita.....	40
4.7.3. Ensayo 3. Granulometría por hidrómetro para cal.....	42
4.7.4. Curva granulométrica general.....	44
4.8. Análisis de resultados .....	44

4.9. Observaciones .....	45
4.10. Ventajas y desventajas del método .....	45
5. Conclusiones .....	46
6. Recomendaciones.....	47
Referencias bibliográficas.....	48

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Clasificación De Las Partículas Minerales Del Suelo .....	15
Tabla 2. Características De Limos y Arcillas.....	15
Tabla 3. Factor de corrección por temperatura. ....	29
Tabla 4. Cálculo del diámetro de la esfera.....	31
Tabla 5. Valores de K.....	33
Tabla 6. Valores de longitud efectiva para hidrómetro 152H.....	34
Tabla 7. Corrección por gravedad específica de la roca .....	36
Tabla 8. Características generales de los ensayos .....	37
Tabla 9. Datos iniciales primer ensayo granulometría por hidrómetro.....	38
Tabla 10. Cálculos primer ensayo granulometría por hidrómetro .....	38
Tabla 11. Datos iniciales segundo ensayo granulometría por hidrómetro .....	40
Tabla 12. Cálculos segundo ensayo granulometría por hidrómetro.....	40
Tabla 13. Datos iniciales tercer ensayo granulometría por hidrómetro .....	42
Tabla 14. Cálculos tercer ensayo granulometría por hidrómetro.....	42

**Lista de Figuras**

Figura 1. Hidrómetro en suspensión (Das, B. M. 2011). .....	19
Figura 2. Partes del hidrómetro 152H.....	20
Figura 3. Lectura del hidrómetro (Bowles J., 1982). .....	22
Figura 4. Diagrama de fuerzas sobre una esfera. ....	24
Figura 5. Muestras.....	36
Figura 6. Curva Granulométrica primer ensayo.....	39
Figura 7. Curva Granulométrica segundo ensayo.....	41
Figura 8. Curva granulométrica tercer ensayo. ....	43
Figura 9. Curva Granulométrica General.....	44

### Resumen

**Título:** Montaje De La Prueba “Determinación Del Tamaño De Las Partículas De Arena Menores A 75 Micras En Base A Su Velocidad De Asentamiento Usando La Ley De Stokes” Para El Laboratorio De Análisis Petrofísicos\*

**Autor:** Lina Fernanda López Rueda, Edwing Andrés Camargo Pinto \*\*

**Palabras Clave:** Granulometría, Hidrómetro, Ley de Stokes.

### Descripción:

Conociendo la importancia de caracterizar un yacimiento en la industria petrolera es importante que el egresado de la Escuela de Ingeniería de Petróleos adquiera y aumente su conocimiento acerca de los métodos que actualmente se utilizan para tal fin. Razón por la cual el principal objetivo de este proyecto es conocer el tamaño de grano y por ende el tipo de roca que conforma el yacimiento; mediante el análisis granulométrico por medio del hidrómetro se realiza la clasificación granulométrica de dichas partículas según su velocidad de asentamiento relacionándola directamente con su tamaño tomando como base la ley de Stokes, así, se da cumplimiento a este objetivo con el fin de completar la curva granulométrica y conocer a detalle la composición de la roca en estudio.

Para tal fin, en el laboratorio de análisis petrofísicos de la Universidad Industrial de Santander se realizó el montaje de los equipos y materiales necesarios para la ejecución de la prueba, y se desarrolló analítica y experimentalmente la ley de Stokes realizando la fundamentación teórica y matemática. De esta manera, todo el personal de laboratorio y el estudiantado de la escuela de Ingeniería de Petróleos podrá determinar las características de la roca de manera rápida y apropiada.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Félix Arenas Rueda, Ingeniero de Petróleos.

### Abstract

**Title:** Lab Test Assembly "Determination of the Size of Sand Particles Less Than 75 Microns Based on Their Settlement Rate Using Stokes' Law" for the Petrophysical Analysis Laboratory\*

**Author:** Lina Fernanda López Rueda, Edwing Andrés Camargo Pinto \*\*

**Key Words:** Granulometry, Hydrometer, Stokes' Law.

### Description:

Understanding the importance of characterizing a field in the oil industry, it is important that graduates of the Petroleum Engineering School acquire and increase their knowledge about the methods currently used for this purpose. Therefore, the main objective of this project is characterizing the grain size and therefore the type of rock that conforms the reservoir. Through particle size analysis by means of the hydrometer, the particle size classification of these particles is made according to their settlement speed, relating it directly to their size based on Stokes' law, thus, this objective is fulfilled in order to complete the particle size curve and know in detail the composition of the rock under study.

To this end, in the laboratory of petrophysical analysis of the Industrial University of Santander, the equipment and materials necessary for the execution of the test were assembled, and Stokes' law was developed analytically and experimentally, carrying out the theoretical and mathematical foundations. In this way, all the laboratory personnel and the students of the Petroleum Engineering School will be able to determine the characteristics of the rock in a fast and appropriate way.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Physicochemical Engineering Department. Petroleum Engineering School. Director: Félix Arenas Rueda, Petroleum Engineer.

## **Introducción**

En su trabajo diario un ingeniero de petróleos está expuesto a muchos desafíos, uno de ellos es conocer las características petrofísicas que contiene el yacimiento. Una parte de estas características es el estudio de los diferentes tipos de roca que tiene como finalidad determinar el tamaño de grano, a esto se le conoce como análisis granulométrico. Para tamaños mayores al tamiz Mesh No 200 (75 micras) se usa el método del tamiz o método mecánico, pero para tamaños menores a 75 micras actualmente el laboratorio de análisis petrofísicos de la Universidad Industrial de Santander no cuenta con ninguna prueba diferente a la del método mecánico que permita su clasificación, es por esto que esta investigación busca mediante el método del hidrómetro, clasificar dichas partículas según su velocidad de asentamiento relacionándola directamente con el tamaño tomando como base la ley de Stokes.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo general**

Realizar el montaje para el desarrollo de la prueba “determinación del tamaño de partículas de arena inferiores a 75 micras en base a su velocidad de asentamiento usando la ley de Stokes” y escribir el libro con los procedimientos y cálculos que intervienen en la práctica.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Recopilar el material bibliográfico y experimental para la determinación del tamaño de las partículas de arena menores a 75 micras.
- Realizar pruebas preliminares para el mejor entendimiento de la metodología.
- Desarrollar la matemática para los respectivos cálculos tales como: densidad del fluido, densidad de la partícula, viscosidad de la mezcla y velocidad de asentamiento de las partículas.
- Realizar la prueba llevando a cabo todos los cálculos que los resultados sean apropiados y verificables utilizando muestras patrón.
- Redactar el libro con el procedimiento detallado y preciso teniendo en cuenta la evaluación de todas las variables involucradas en el análisis.

## 2. Marco de referencia

### 2.1. Descripción litológica

La descripción litológica es la identificación detallada de las características geológicas, físicas y mineralógicas de la roca, tomando en consideración el tipo de roca.

### 2.2. Clasificación de las partículas minerales del suelo

**Tabla 1**

*Clasificación De Las Partículas Minerales Del Suelo*

<b>Clasificación Textural</b>	<b>Tamaño de partícula (mm)</b>
Grava (partículas visibles y gruesas)	>2
Arena (partículas visibles y finas)	0.0625 < X < 2
Limo (Partículas no visibles y tacto áspero)	0.002 y 0.0625 mm
Arcilla (Partículas no visibles y tacto suave)	0.002 mm

Geotecnia y Cimientos I (2ª edición, 1975) J. A. Jiménez Salas y J. L. de Justo Alpañes

### 2.3. Características De Limos y Arcillas

**Tabla 2**

*Características De Limos y Arcillas*

<b>Limos (entre 0.002 y 0.06 mm)</b>	<b>Arcillas (&lt;0.002 mm)</b>
No suelen tener propiedades coloidales	Suelen tener propiedades coloidales
Partículas forma redondeada	Partículas forma laminar
Mayor permeabilidad	Menor permeabilidad

Los terrones secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a polvo con los dedos

Los terrones secos se pueden partir, pero no reducir a polvo con los dedos

Predominan las características de masa

Predominan las características de superficie

A partir de 0,002 mm y a medida que aumenta el tamaño de las partículas, se va haciendo cada vez mayor la proporción de minerales no arcillosos

Consisten en su mayor parte en minerales arcillosos.

---

Geotecnia y Cimientos I (2ª edición, 1975) J. A. Jiménez Salas y J. L. de Justo Alpañes

#### 2.4. Propiedades mecánicas de los suelos

La mecánica de suelos se encarga de estudiar las fuerzas o cargas que existen en la superficie terrestre y el comportamiento de estas. (Duque Escobar G,2017). El suelo tiene un conjunto muy variado de propiedades mecánicas, este estudio ha venido progresando y perfeccionándose de tal manera que por sus múltiples propiedades tienen aplicaciones en muchos campos de la ingeniería.

La mecánica de suelos incluye los siguientes aspectos:

- Génesis y composición de suelos
- Transporte y deposición de los suelos.
- Mineralogía del suelo.
- Relación masa-suelo.
- Tensión efectiva y capilaridad.
- Presión total.
- Presión de poros de agua.
- Condiciones hidrostáticas.

- Clasificación de los suelos.
- Métodos de prospección de suelos.

A continuación, se mencionan algunas propiedades de la mecánica de suelos que se relacionan con esta práctica.

**2.4.1. Resistencia al corte.** La resistencia al corte se refiere al nivel de fuerzas cortantes que un material puede resistir sin fracturarse, Sus unidades son Newton por metro cuadrado.

**2.4.2. Presión lateral del suelo.** Es la presión que ejerce la tierra horizontalmente. Un ejemplo sencillo sería, en un recipiente puede ser un vaso, lo llenamos de tierra, entonces la presión lateral del suelo es la presión ejercida sobre las paredes de él y sus unidades son Pascales Newton por metro cuadrado.

**2.4.3. Capacidad de carga.** La capacidad de carga es la capacidad de la tierra en torno a una estructura para soportar las cargas aplicadas.

**2.4.4. Permeabilidad.** Es la facilidad con la que un fluido fluye a través de un medio poroso.

**2.4.5. Estabilidad de taludes.** La estabilidad de taludes se refiere a la resistencia de una pendiente de fallo o colapso. (*Thomas James, propiedades mecánicas de los suelos*).

## 2.5. Granulometría

El análisis granulométrico es un procedimiento manual o mecánico por medio del cual se puede separar dichos granos según sus tamaños; de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño con respecto al peso total (Chakraborty et al.2006).

## 2.6. Curva granulométrica

También llamada *curva de distribución de tamaño de partícula*; es una representación gráfica de los resultados del ensayo de granulometría obtenida en un laboratorio, los datos graficados son acumulados (Duque, Gonzalo; Escobar, C. 2002).

El análisis granulométrico da a conocer los porcentajes en peso de las arcillas y limos (finos) y de las fracciones gruesas (gravas) después de agitar la muestra de suelo y pasarla a través de tamices de diferentes tamaños, determinando así el porcentaje de cada tamaño de partícula.

La forma de las curvas permite deducir que si tienden a la verticalidad su variabilidad en los tamaños es reducida mientras que si tienden a ser inclinadas muestran una variación importante del tamaño de las partículas. El porcentaje del material es graficado en las ordenadas y el tamaño de la abertura del tamiz en las abscisas (Das, B. M. 2011).

## 2.7. Hidrómetro convencional

Se basa en el principio de la sedimentación de los granos del suelo en agua. Por simplicidad se asume que todas las partículas del suelo son esferas y funciona gracias al principio de Arquímedes. Al introducirse en un líquido, el hidrómetro permanece sumergido parcialmente de manera vertical

gracias a un bulbo que tiene en su extremo inferior y el nivel del líquido marca sobre una escala de vidrio que está graduada en unidades de densidad su respectivo valor.

## 2.8. Hidrómetro 152H

Cuando las partículas son muy finas, no se podrá hacer análisis granulométrico por mallas. Lo recomendado es usar el método del hidrómetro que se vale de la ley de Stokes y la velocidad de sedimentación para calcular el tamaño de las partículas. En esta ley se enuncia que si una partícula esférica cae dentro del agua experimenta casi de inmediato una velocidad uniforme que depende del diámetro de la partícula, de su densidad y de la viscosidad del agua (Stokes, 1850). La gravedad específica es una función de la cantidad de partículas presentes por unidad de volumen en suspensión a esa profundidad (Das, B. M. 2011).

Las características del hidrómetro usado son:

- Material en contacto con el líquido: vidrio borosilicato.
- Medidas en gramos por litro (g/L) con un rango de -5 a + 60 g/L.
- Divisiones de 1 g/L a 68 F.

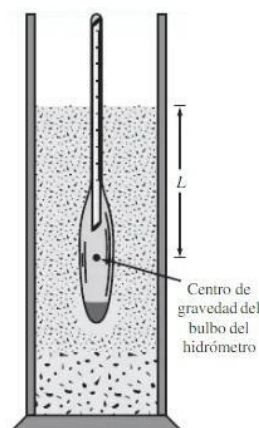


Figura 1. *Hidrómetro en suspensión* (Das, B. M. 2011).

En la Figura 1, se observa un hidrómetro en suspensión vertical y en el fondo como quedan las partículas a medida que pasa el tiempo.

En el siguiente esquema se observan las partes del hidrómetro 152H

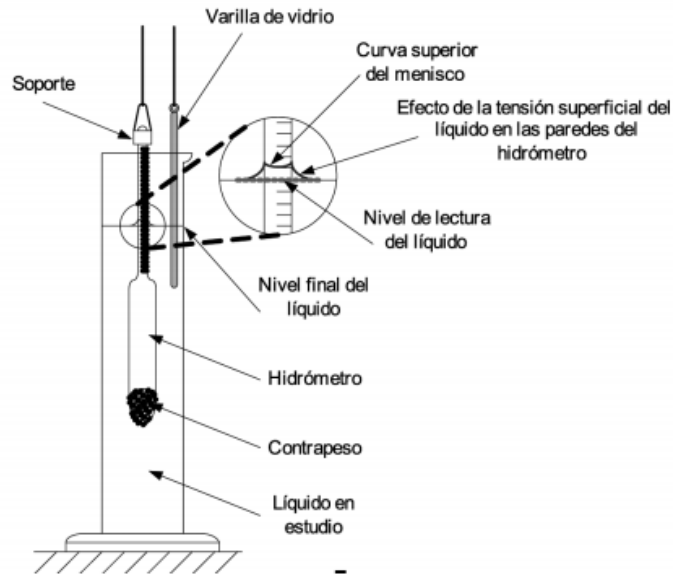


Figura 2. *Partes del hidrómetro 152H*

## 2.9. Análisis granulométrico

La variedad del tamaño de las partículas del suelo es muy amplia; va desde grandes bloques hasta granos tan pequeños que difícilmente pasan por una malla.

La granulometría por tamizado consiste en confeccionar la curva granulométrica de una muestra, la cual es representativa de la distribución de los tamaños de las partículas. Este procedimiento hace uso de mallas de diferentes aberturas, las cuales retienen los granos en cada una de ellas según su tamaño (Cañas, 2007). En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra.

### **2.10. Técnicas de análisis granulométrico**

La determinación de la distribución del tamaño de partículas es uno de los más comunes e importantes análisis dentro del campo de la física de suelos; es usado en análisis texturales para clasificación de suelos con propósitos agronómicos e ingenieriles (Gonzalez & coronado, 2007).

La efectividad del proceso y de sus adecuados resultados depende fundamentalmente de la preparación de la muestra, la forma de las partículas y la técnica empleada. También depende de conocer los principios usados en dicha práctica como en los instrumentos necesarios para llevarla a cabo y en los factores necesarios para interpretar adecuadamente los resultados. A continuación dos técnicas de relevancia con la práctica realizada.

### **2.11. Método de la pipeta**

El método de la pipeta es un procedimiento de muestreo directo, que consiste en cuantificar las partículas minerales del suelo en forma gravimétrica. Se toma una submuestra con una pipeta a una profundidad y tiempo determinado basado en la suposición de eliminación de partículas mayores a un diámetro  $x$ . (Gee, G.W. and J.W.Bauder.1979). Es importante que las partículas analizadas estén independientes unas de otras es decir que no existan agregados de partículas y por esa razón se hace un tratamiento de dispersión antes de dicho análisis (Carter & Gregorich, 2008).

### **2.12. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro**

Este es uno de los análisis de suelo más antiguo y común, brinda la información del tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo. La ley fundamental para realizar análisis

granulométrico por hidrómetro es formulada por Stokes, y consiste en que si una partícula esférica cae dentro del agua adquiere una velocidad uniforme que depende del diámetro de la partícula, de su densidad y de la viscosidad del agua (Das, B. M. 2011).

Es importante tener en cuenta que para la realización del ensayo no se usa una suspensión compuesta de agua y suelo únicamente, porque se precipita casi todo el suelo a causa de la formación de grumos originados por la presencia de las cargas eléctricas que se encuentran en el suelo, es por esto que el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (IGAC, 2006) estableció el uso de un dispersante químico llamado:

- Hexametáfosfato de sodio ( $\text{NaPO}_3$ ). Comercialmente se conoce como *Calgon*. Se usará agua destilada a razón de 40 g de hexametáfosfato sódico por cada litro de solución. En este procedimiento se usó como defloculante el hexametáfosfato de sodio.

Se adjunta una imagen explicativa sobre la lectura del hidrómetro.

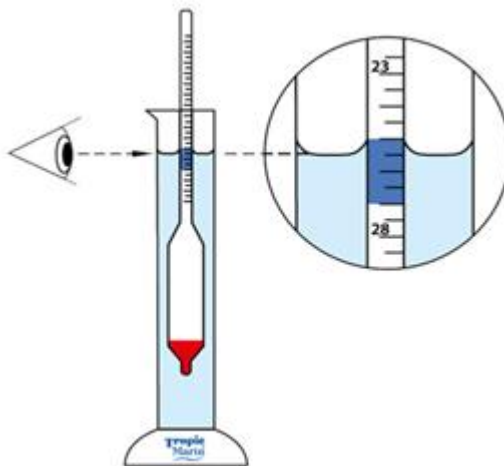


Figura 3. Lectura del hidrómetro (Bowles J., 1982).

La razón por la cual se usó el hidrómetro 152H fue por la escala debido a que tiene valores de gramos de suelo por litro (g/l) que van de -5 a + 60 y está calibrado bajo un supuesto; que el agua destilada tiene gravedad específica de 1.00 a 20 °C(68°F) (Bowles J. 1982).

A continuación, se referencia el fundamento teórico con el cual se determinará el diámetro de las partículas en base a la ley de Stokes.

### 3. Fundamento Ley de Stokes

Uno de los métodos más usados para conocer la distribución del tamaño de partículas de la roca, es el análisis granulométrico por medio del hidrómetro; Método sustentado en la ley de Stokes porque permite conocer el “diámetro equivalente” de una partícula asumiendo que cada una tiene la misma densidad y se asienta con una velocidad vertical constante (De las Heras, S., 2012).

Stokes asume las siguientes condiciones para el fluido y la partícula:

- I. Las partículas son esferas rígidas y lisas.
- II. Las partículas se están asentando en flujo laminar, es decir, el número de Reynolds es menor que 0.1.
- III. La suspensión en la que se encuentran las partículas está totalmente diluida.
- IV. No hay interacción entre las partículas y el líquido.
- V. El diámetro del cilindro de suspensión es grande comparado al diámetro de las partículas.
- VI. Todas las partículas alcanzan su velocidad terminal inmediatamente.
- VII. La densidad es la misma para todas las partículas, es decir, independientemente del diámetro. Las partículas alcanzan su velocidad terminal casi de inmediato y la suposición (VI) queda así justificada (Valencia & Huertas, 2018)

Sobre una partícula de suelo en una solución líquida actúan tres fuerzas: el peso, el empuje de Arquímedes y una fuerza de rozamiento.

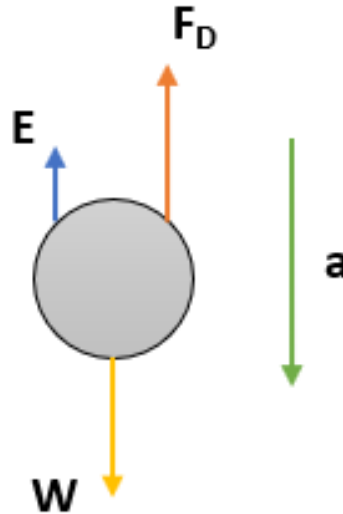


Figura 4. Diagrama de fuerzas sobre una esfera.

- **Peso de la esfera (W)**

El peso de la esfera está definido como el producto de la masa  $m$  por la gravedad  $g$ . Siendo la masa, el producto de la densidad del material  $\rho_e$  por el volumen de la esfera que es igual a  $\frac{\pi}{6} D_e^3$ .

$$W = mg = \rho_e * \frac{\pi}{6} D_e^3 * g \quad (1)$$

- **Empuje de Arquímedes (E)**

De acuerdo con el principio de Arquímedes, el cual expone que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza vertical hacia arriba igual al peso del fluido, podemos afirmar que, el empuje de Arquímedes será, el producto de la densidad del fluido  $\rho_f$ , por el volumen del cuerpo sumergido  $V_e$ , y por la aceleración de la gravedad  $g$ .

$$E = \rho_f V_e g = \rho_f * \frac{\pi}{6} D_e^3 * g \quad (2)$$

- **Fuerza de rozamiento ( $F_D$ )**

La fuerza de arrastre  $F_D$  sobre un cuerpo de geometría dada resulta muy difícil de determinar analíticamente, ya que depende de gran número de factores. Por eso es necesario recurrir básicamente a la adquisición de datos experimentales y, con esta finalidad, es costumbre expresar dicha fuerza en la forma:

$$F_D = C_D \left( \frac{1}{2} v^2 \rho_f \right) A \quad (3)$$

donde  $v$  es la velocidad relativa del cuerpo en el fluido,  $\rho_f$  es la densidad del fluido,  $A$  es el área de la sección transversal máxima que el cuerpo ofrece al flujo y  $C_D$  es un parámetro empírico llamado coeficiente de arrastre cuyo valor depende de la forma geométrica del cuerpo y de la orientación de este respecto al flujo, así como del valor del número de Reynolds asociado con el flujo alrededor del cuerpo.

Teniendo en cuenta la definición del coeficiente de arrastre, puede comprobarse que para valores de  $Re < 0,1$  dicho coeficiente será:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (4)$$

Reemplazando en la ecuación de la fuerza de rozamiento, el coeficiente de arrastre, el número de Reynolds y el área de la esfera, obtenemos:

$$F_D = 3\pi\mu v D_e \quad (5)$$

Según la segunda ley de Newton descrita en la ecuación 6,

$$\sum F = ma \quad (6)$$

Reemplazando las ecuaciones del peso, el empuje y la fuerza de rozamiento, y conociendo que la velocidad límite se alcanza cuando la aceleración sea cero,

$$\rho_e * \frac{\pi}{6} D_e^3 * g - \rho_f * \frac{\pi}{6} D_e^3 * g - 3\pi\mu v D_e = 0 \quad (7)$$

Despejando la velocidad de la ecuación anterior,

$$v = \frac{D_e^2 (\rho_e - \rho_f) g}{18\mu} \quad (8)$$

La ecuación anterior relaciona la velocidad de cada una de las partículas presentes en el fluido y su diámetro (Duque, G., & Escobar, C. 2012).

#### 4. Metodología para cálculo de tamaño de partículas

##### 4.1. Objetivo

Realizar el análisis de una muestra de arena fina para determinar el tamaño de los granos menores a 0.075mm y la abundancia de los correspondientes, con el fin de comprender los datos obtenidos y ser capaz de interpretarlos.

##### 4.2. Equipos y materiales

- Horno
- Balanza
- Termómetro
- Cronómetro

- Hidrómetro (152H – 151H)
- 2 probetas de 1000 ml
- Mezclador o batidora
- Mortero
- Agente dispersante o de floculante (Hexametafosfato de sodio)
- Agua destilada

### **4.3. Preparación de la muestra**

El tamaño aproximado de la muestra que se usa para la prueba varía de acuerdo con el tipo de roca. La cantidad para rocas arenosos es de 75 a 100 g y para limos y arcillas de 50 a 60 g.

### **4.4. Procedimiento para realización de la prueba**

- I.** Tomar la muestra de arena de la bandeja ubicada bajo el tamiz N° 200 (para el caso del laboratorio de Análisis Petrofísicos de la Escuela de Petróleos de la UIS).
- II.** En un recipiente de 250 ml, mezclar 50 gr de la muestra secada al horno agregando agua hasta que la muestra quede totalmente sumergida. Verter el agente dispersante en la mezcla: 125 ml de solución al 4% de hexametafosfato de sodio.
- III.** Después de 16 horas, transferir la mezcla a un vaso de dispersión lavando cualquier residuo que quede en el recipiente. Agregar agua al vaso de dispersión hasta que la superficie de este quede de 50 a 80 mm por debajo de la boca del vaso. Colocar el vaso en el aparato agitador durante un minuto.

- IV.** Transferir la mezcla a un cilindro de sedimentación de 1000 ml colocando un tapón (o la palma de la mano) en la parte superior, agitar la suspensión en un arco de 180 grados por un periodo de 1 minuto, evitando así la acumulación de sedimentos en la base y en las paredes del cilindro.
- V.** Al terminar la agitación ubicar la probeta sobre una superficie plana y sin vibración. Introducir lentamente el hidrómetro en la suspensión e inmediatamente iniciar el cronómetro y realizar lecturas a 1, 2, 3 y 4 minutos. Tomar la temperatura para cada uno de los tiempos.
- VI.** Realizar nuevamente la agitación y realizar la medición hasta que las cuatro lecturas a los determinados tiempos sean las mismas (Si una lectura cambia se debe realizar nuevamente la prueba). Todas las lecturas se deben realizar en el tope del menisco.
- Continuar la prueba haciendo lecturas a 8, 16, 30, 60, 120, 240, 480, 960 y 1440 minutos.

**Nota:** 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.

#### **4.5. Corrección de las lecturas del hidrómetro**

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

**4.5.1. Corrección por menisco (Cm).** Se determina introduciendo el hidrómetro en agua destilada y observando la altura a la cual el menisco se levanta por encima de la superficie del agua.

- Hidrómetro 151H:  $C_m = 0.6 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$
- Hidrómetro 152H:  $C_m = 1.0 \text{ g/L}$

**4.5.2. Corrección por temperatura (Ct).** Si no se dispone de un baño de agua o de un cuarto de temperatura constante que permita realizar toda la prueba a la misma temperatura, cada lectura del hidrómetro se debe corregir por temperatura. Esta corrección puede ser positiva o negativa, esto depende de la temperatura de la suspensión en el momento de realizar cada lectura. El valor del factor de corrección por temperatura para cada lectura de hidrómetro se obtiene de la siguiente Tabla, que está tabulada por la ASTM D-422. Para hidrómetro 152h ver columna derecha, para hidrómetro 151h ver columna izquierda.

**Tabla 3**

*Factor de corrección por temperatura.*

Temperatura °C	Ct	
	Hidrómetro graduado en	
	Densidad ( $\text{g/cm}^3$ ) $\times 10^3$	Concentración (g/litro)
10	-1.3	-2.0
11	-1.2	-1.9
12	-1.1	-1.8
13	-1.0	-1.6
14	-0.9	-1.4
15	-0.8	-1.2

16	-0.6	-1.0
17	-0.5	-0.8
18	-0.3	-0.5
19	-0.2	-0.3
20	0.0	0.0
21	0.2	0.3
22	0.4	0.6
23	0.6	0.9
24	0.8	1.3
25	1.0	1.7
26	1.3	2.0
27	1.5	2.4
28	1.8	2.9
29	2.0	3.3
30	2.3	3.7

INVIAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá. Norma Invias E 124-07. Año 2007

Los valores tabulados fueron calculados por la expresión:

$$C_t = \left[ \rho_{w_{20(^{\circ}C)}} - \rho_{w_{t(^{\circ}C)}} - \partial(T - 20) \right] \times \frac{2.65}{1.65} \times 10^3 \quad (9)$$

Donde:

$\rho_{w_{20(^{\circ}C)}}$ : Densidad del agua a 20°C

$\rho_{w_{t(^{\circ}C)}}$ : Densidad del agua a t °C

$\partial$ : Coeficiente de dilatación volumétrica del hidrómetro

$T$ : Temperatura (°C)

**4.5.3. Corrección por defloculante y punto cero (Cz).** 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. Para realizar esta corrección, se usa un cilindro graduado de 1000 ml de capacidad y se llena con agua destilada con una cantidad de defloculante igual a la que se emplea en el ensayo. Realizar en la parte superior del menisco la lectura del hidrómetro y a continuación introducir un termómetro para medir la temperatura de la solución. La ecuación para calcular esta corrección se describe a continuación:

$$C_z = t' + C_m + C_t \quad (10)$$

Donde:

$C_z$ : Corrección por defloculante y punto cero

$C_m$ : Corrección por menisco

$C_T$ : Corrección por temperatura

$t'$  = lectura del hidrómetro, en agua con defloculante.

#### 4.6. Cálculos

Tras realizar la prueba se tabulan los valores obtenidos con el hidrómetro y se realiza el cálculo del diámetro de la esfera de acuerdo con la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Cálculo del diámetro de la esfera*

Tiempo (min)	T (°C)	R (g/L)	$C_t$ (g/L)	$C_z$ (g/L)	$R'$ (g/L)	L (cm)	K	$D_e$ (g/L)	%que pasa

De la ecuación 8 despejar el diámetro de las esferas así:

$$D_e = \sqrt{\frac{30\mu v}{g(\rho_e - \rho_f)}} \quad (11)$$

$D_e$ : Diámetro (mm)

$\mu$ : Viscosidad (Pa\*s)

$v$ : Velocidad (cm/min)

$\rho_e$ : Densidad de la esfera (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_f$ : Densidad del fluido (g/cm<sup>3</sup>)

$g$ : Gravedad (cm/s<sup>2</sup>)

Sabiendo que la velocidad es:

$$v = \frac{L}{t} \quad (12)$$

E igualando el resto de la ecuación 11 a una constante K, se obtiene que:

$$K = \sqrt{\frac{30\mu}{g(\rho_e - \rho_f)}} \quad (13)$$

Reemplazando las ecuaciones 12 y 13 en 11, se deduce que la ecuación para determinar el diámetro de partícula es:

$$D_e = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (14)$$

Para poder conocer el diámetro es necesario conocer los valores de K, longitud efectiva (L) y la lectura corregida del hidrómetro (R'), a continuación se muestra cómo calcularlos.

- **Constante K**

Para determinar esta constante es necesario conocer la gravedad específica de la muestra, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$G_s = \frac{\rho_e}{\rho_f} \quad (15)$$

De esta manera, reemplazando en la ecuación 13 se obtiene:

$$K = \sqrt{\frac{30\mu}{g(G_s - 1)\rho_f}} \quad (16)$$

El valor de K puede ser evaluado por separado ya que la  $G_s$  depende de la temperatura, por esto, la ASTM D-422 tabuló valores para este coeficiente tal como se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Valores de K*

Temp	Gravedad específica de los sólidos (Gs)								
	°C	2.45	2.5	2.55	2.6	2.65	2.7	2.75	2.8
16	0.01514	0.01505	0.01481	0.01457	0.01435	0.01414	0.01394	0.01374	
17	0.01511	0.01486	0.01462	0.01439	0.01417	0.01396	0.01376	0.01356	
18	0.01492	0.01467	0.01443	0.01421	0.01399	0.01378	0.01359	0.01339	
19	0.01474	0.01449	0.01425	0.01403	0.01382	0.01361	0.01342	0.01323	
20	0.01456	0.01431	0.01408	0.01386	0.01365	0.01344	0.01325	0.01307	
21	0.01438	0.01414	0.01391	0.01369	0.01348	0.01328	0.01309	0.01291	
22	0.01421	0.01397	0.01374	0.01353	0.01332	0.01312	0.01294	0.01276	
23	0.0144	0.01381	0.01358	0.01337	0.01317	0.01297	0.01279	0.01261	
24	0.01388	0.01365	0.01342	0.01321	0.01301	0.01282	0.01264	0.01246	
25	0.01372	0.01349	0.01327	0.01306	0.01286	0.01267	0.01249	0.01232	

26	0.01357	0.01334	0.01312	0.01291	0.01272	0.01253	0.01235	0.01218
27	0.01342	0.01319	0.01297	0.01277	0.01258	0.01239	0.01221	0.01204
28	0.01327	0.01304	0.01283	0.01264	0.01244	0.01255	0.01208	0.01191
29	0.01312	0.0129	0.01269	0.01249	0.01230	0.01212	0.01195	0.01178
30	0.01298	0.01276	0.01256	0.01236	0.01217	0.012299	0.01182	0.01165

Fuente: INVIAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá. Norma Invias E124-07. Año 2007

- **Lectura corregida del hidrómetro (R')**

$$R' = R + C_m + C_T - C_Z \quad (17)$$

R: Lectura del hidrómetro (g/L)

- **Longitud efectiva (L)**

Los valores de longitud efectiva son basados en el hidrómetro y el cilindro de sedimentación, por lo cual la ASTM D-422 calculó dichos valores para el hidrómetro 152H.

**Tabla 6**

*Valores de longitud efectiva para hidrómetro 152H*

Lectura Hidrómetro, R'	Longitud Efectiva, L (cm)	Lectura Hidrómetro, R'	Longitud Efectiva, L (cm)	Lectura Hidrómetro, R'	Longitud Efectiva, L (cm)
0	16.3	21	12.9	41	9.6
1	16.1	22	12.7	42	9.4
2	16.0	23	12.5	43	9.2
3	15.8	24	12.4	44	9.1
4	15.6	25	12.2	45	8.9

5	15.5	26	12.0	46	8.8
6	15.3	27	11.9	47	8.6
7	15.2	28	11.7	48	8.4
8	15.0	29	11.5	49	8.3
9	14.8	30	11.4	50	8.1
10	14.7	31	11.2	51	7.9
11	14.5	32	11.1	52	7.8
12	14.3	33	10.9	53	7.6
13	14.2	34	10.7	54	7.4
14	14.0	35	10.6	55	7.3
15	13.8	36	10.4	56	7.1
16	13.7	37	10.2	57	7.0
17	13.5	38	10.1	58	6.8
18	13.3	39	9.9	59	6.6
19	13.2	40	9.7	60	6.5
20	13.0				

Fuente: INVIAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá. Norma Invias E124-07. Año 2007

- **Porcentaje más fino (%más fino)**

Porcentaje de suelo que permanece en suspensión al nivel en el cual el hidrómetro está midiendo la concentración de la suspensión.

$$\%mas\ fino = \frac{aR'}{W_s} \times 100 \quad (18)$$

$a$ : Corrección por gravedad específica de la roca.

$W_s$ : Peso de la muestra usado en la prueba.

La corrección por gravedad específica de la roca se tabula en la Tabla a continuación:

**Tabla 7**

*Corrección por gravedad específica de la roca*

Gs	a
2.5	1.04
2.55	1.02
2.6	1.01
2.65	1
2.7	0.99
2.75	0.98
2.8	0.97

Fuente: INVIAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá. Norma Invias E124-07. Año 2007

#### 4.7. Resultados de las pruebas

Con el fin de realizar una comparación de los resultados que se obtienen en la prueba de análisis granulométrico, se llevan a cabo 3 ensayos con diferentes tipos de muestras siguiendo los lineamientos estipulados en el procedimiento anterior.

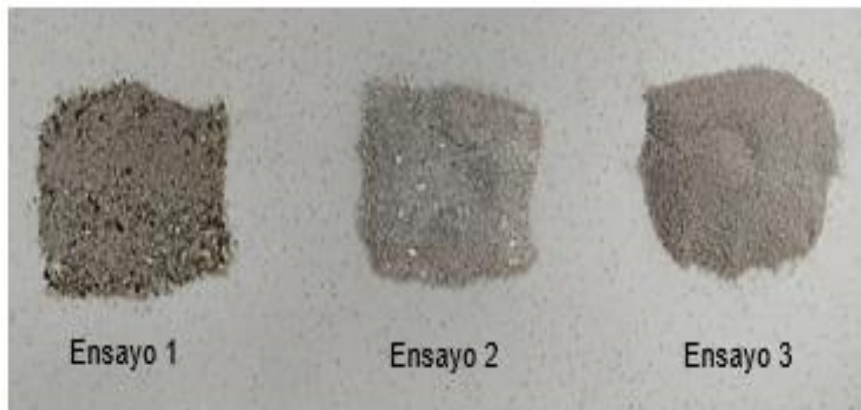


Figura 5. *Muestras*

Todos los ensayos se realizan con las siguientes características:

**Tabla 8**

*Características generales de los ensayos*

Características	
Hidrómetro	152H
Cilindro	1000 ml
Defloculante	Hexametáfosfato de Sodio
Temperatura	28 °C
Peso muestra (Ws)	50 gr

A continuación, se presentan los resultados de cada ensayo con su respectiva gráfica.

**4.7.1. Ensayo 1. Granulometría por hidrómetro para arcilla.****I. Datos iniciales****Tabla 9***Datos iniciales primer ensayo granulometría por hidrómetro*

Datos de la prueba	
$C_m$ (g/L)	1
$t'$	5
$G_s$	2.65
$a$	1
$W_s$ (gr)	50

**II. Cálculos****Tabla 10***Cálculos primer ensayo granulometría por hidrómetro*

Tiempo (min)	T (°C)	R (g/L)	$C_t$ (g/L)	$C_z$ (g/L)	$R'$ (g/L)	L (cm)	K	$D_c$ ( $\mu$ m)	% Más fino
1	25	52	1.7	7.7	47.0	8.6	0.01286	37.71	94
2	25	49	1.7	7.7	44.0	9.1	0.01286	27.43	88
3	25	48	1.7	7.7	43.0	9.2	0.01286	22.52	86
4	25	45	1.7	7.7	40.0	9.7	0.01286	20.03	80
8	25	42	1.7	7.7	37.0	10.2	0.01286	14.52	74
16	25	36	1.7	7.7	31.0	11.2	0.01286	10.76	62
30	25	32	1.7	7.7	27.0	11.9	0.01286	8.10	54
60	25	29	1.7	7.7	24.0	12.4	0.01286	5.85	48
120	26	26	2	8	21.0	12.9	0.01272	4.17	42

240	26	22	2	8	17.0	13.5	0.01272	3.02	34
480	25	19	1.7	7.7	14.0	14	0.01286	2.20	28
960	24	15	1.3	7.3	10.0	14.7	0.01301	1.61	20
1440	25	13	1.7	7.7	8.0	15	0.01286	1.31	16

III. Gráfica

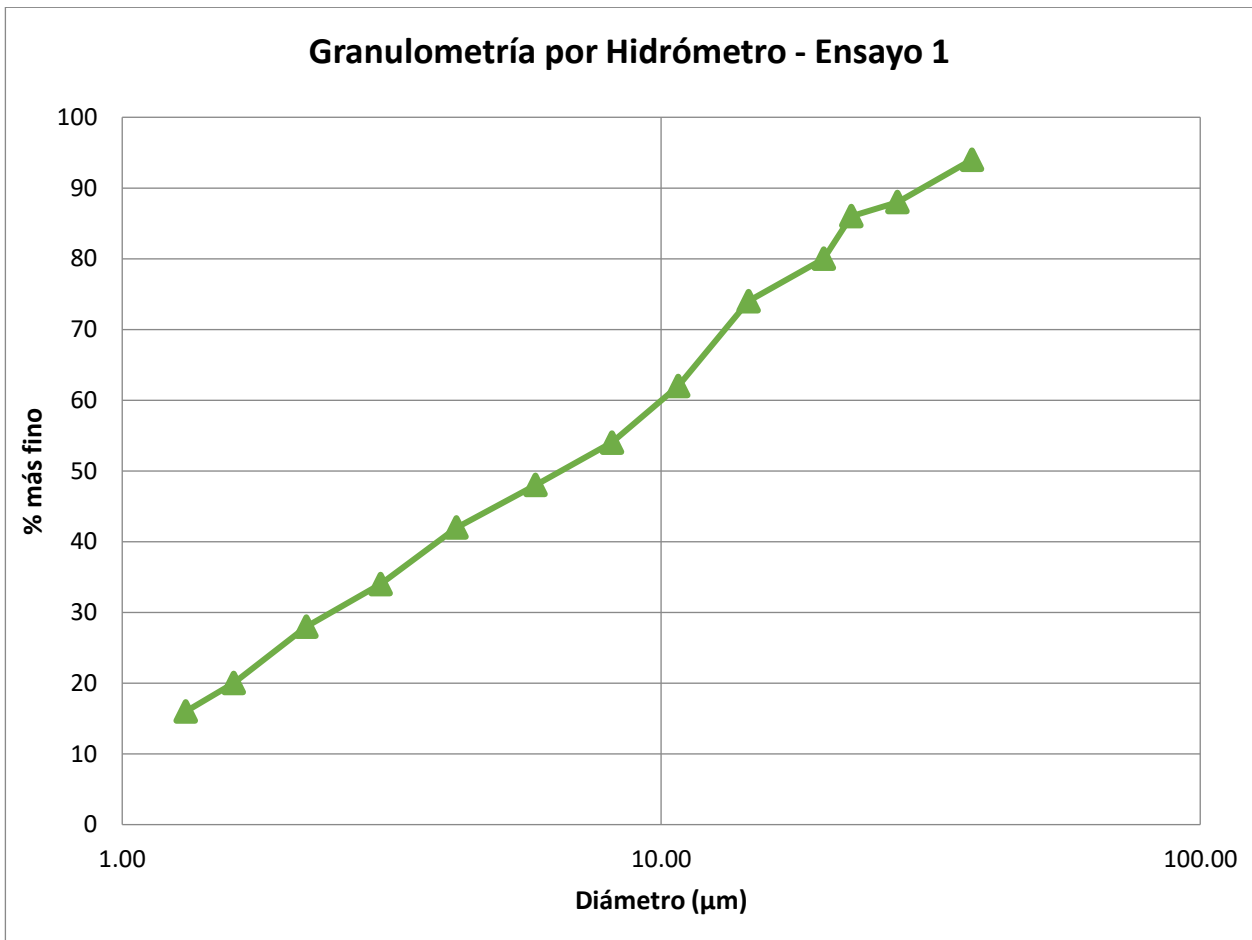


Figura 6. Curva Granulométrica primer ensayo.

**4.7.2. Ensayo 2.** Granulometría por hidrómetro para bentonita**I. Datos iniciales****Tabla 11***Datos iniciales segundo ensayo granulometría por hidrómetro*

Datos de la prueba	
$C_m$ (g/L)	1
$t'$	5
$G_s$	2.7
$a$	0.99
$W_s$ (gr)	50

**II. Cálculos****Tabla 12***Cálculos segundo ensayo granulometría por hidrómetro*

Tiempo (min)	T (°C)	R (g/L)	$C_t$ (g/L)	$C_z$ (g/L)	$R'$ (g/L)	L (cm)	K	$D_c$ ( $\mu$ m)	% Más fino
1	24	50	1.30	7.3	45.0	8.9	0.01264	37.71	89.1
2	25	47	1.70	7.7	42.0	9.4	0.01249	27.08	83.16
3	25	46	1.70	7.7	41.0	9.6	0.01249	22.34	81.18
4	25	43	1.70	7.7	38.0	9.9	0.01249	19.65	75.24
8	25	39	1.70	7.7	34.0	10.7	0.01249	14.44	67.32
16	25	39	1.70	7.7	34.0	10.7	0.01249	10.21	67.32
30	25	39	1.70	7.7	34.0	10.7	0.01249	7.46	67.32
60	26	37	2.00	8	32.0	11.1	0.01235	5.31	63.36
120	26	37	2.00	8	32.0	11.1	0.01235	3.76	63.36

240	25	37	1.70	7.7	32.0	11.1	0.01249	2.69	63.36
480	24	37	1.30	7.3	32.0	11.1	0.01264	1.93	63.36
960	24	36	1.30	7.3	31.0	11.2	0.01264	1.37	61.38
1440	25	36	1.70	7.7	31.0	11.2	0.01249	1.10	61.38

III. Gráfica

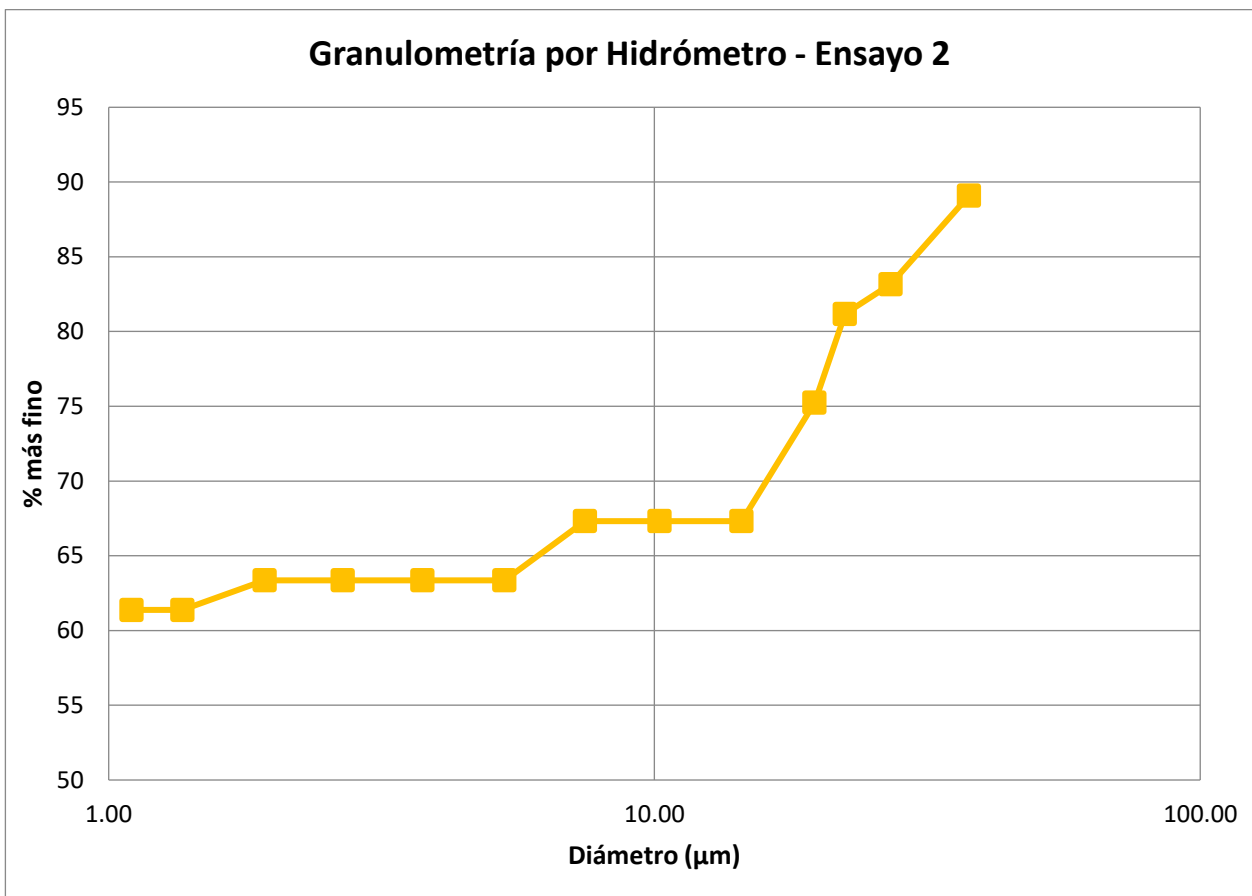


Figura 7. Curva Granulométrica segundo ensayo.

### 4.7.3. Ensayo 3. Granulometría por hidrómetro para cal

#### I. Datos iniciales

**Tabla 13**

*Datos iniciales tercer ensayo granulometría por hidrómetro*

Datos de la prueba	
$C_m$ (g/L)	1
$t'$	5
$G_s$	2.7
$a$	0.99
$W_s$ (gr)	50

#### II. Cálculos

**Tabla 14**

*Cálculos tercer ensayo granulometría por hidrómetro*

Tiempo (min)	T (°C)	R (g/L)	$C_t$ (g/L)	$C_z$ (g/L)	$R'$ (g/L)	L (cm)	K	$D_e$ ( $\mu\text{m}$ )	% Más fino
1	24	40	1.3	7.3	35.0	10.6	0.01264	41.15	69.3
2	24	38	1.3	7.3	33.0	10.9	0.01264	29.51	65.34
3	25	38	1.7	7.7	33.0	10.9	0.01249	23.81	65.34
4	25	37	1.7	7.7	32.0	11.1	0.01249	20.81	63.36
8	25	35	1.7	7.7	30.0	11.4	0.01249	14.91	59.4
16	25	35	1.7	7.7	30.0	11.4	0.01249	10.54	59.4
30	25	33	1.7	7.7	28.0	11.7	0.01249	7.80	55.44
60	25	30	1.7	7.7	25.0	12.2	0.01249	5.63	49.5

120	25	30	1.7	7.7	25.0	12.2	0.01249	3.98	49.5
240	25	30	1.7	7.7	25.0	12.2	0.01249	2.82	49.5
480	26	30	2	8	25.0	12.2	0.01235	1.97	49.5
960	25	28	1.7	7.7	23.0	12.5	0.01249	1.43	45.54
1440	24	28	1.3	7.3	23.0	12.5	0.01264	1.18	45.54

III. Gráfica

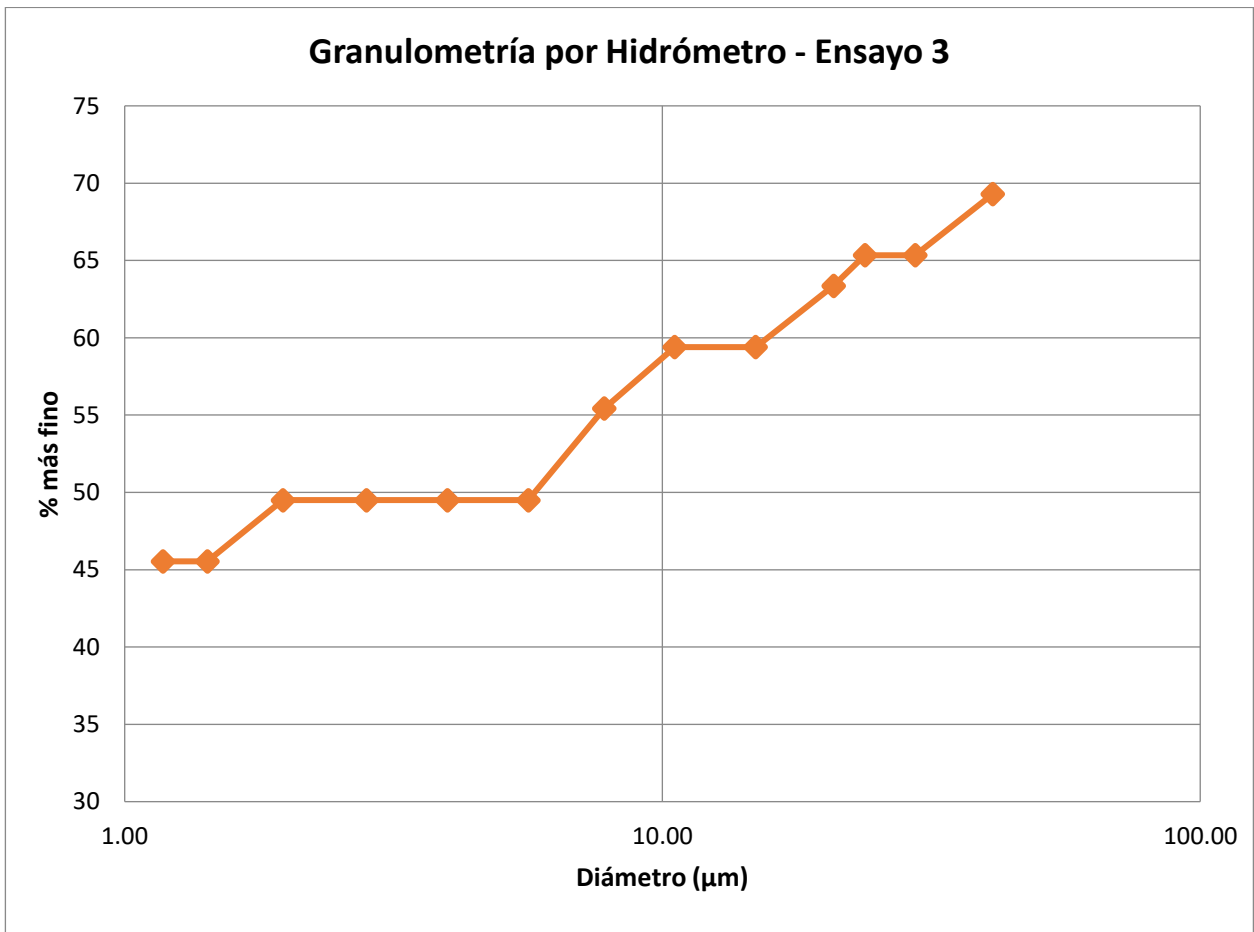


Figura 8. Curva granulométrica tercer ensayo.

#### 4.7.4. Curva granulométrica general

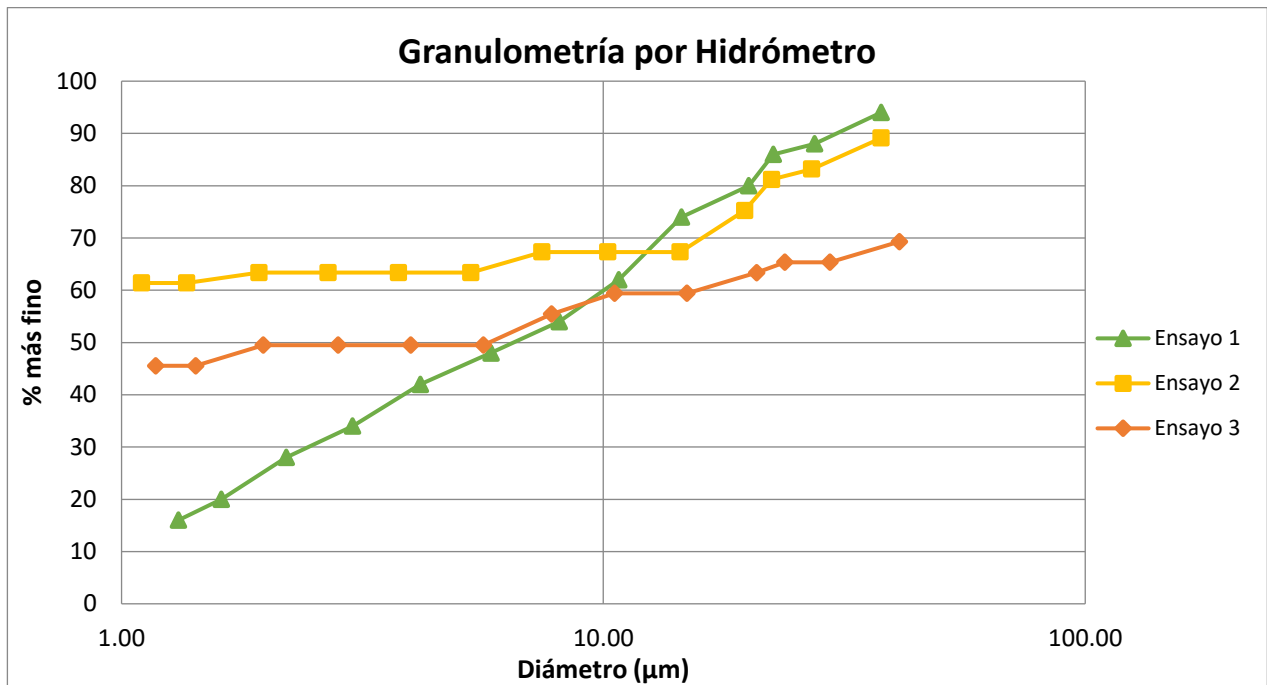


Figura 9. Curva Granulométrica General.

#### 4.8. Análisis de resultados

- Al graficar los datos % más fino vs diámetro de partículas ( $D_p$ ), se deduce que para los ensayos 2 y 3 la curva presenta poca inclinación con respecto al eje vertical lo que permite concluir que es una roca fina mal gradada. Para el ensayo 1 la inclinación de la curva es más notable, considerándose como una roca bien gradada.
- Debido a la disminución de la viscosidad del fluido se analiza que a mayor temperatura mayor velocidad de sedimentación.
- Para partículas muy pequeñas su velocidad de sedimentación es pequeña por lo que es recomendable dejar la muestra varios días en reposo.

#### **4.9. Observaciones**

Las imprecisiones en los resultados de la prueba pueden ser debido a:

- Dispersión incompleta del suelo en la suspensión debido a insuficiente agitación de la suspensión en el cilindro al comienzo del ensayo.
- Al extraer e introducir el Hidrómetro se pueden presentar perturbaciones en la suspensión.
- La presencia de impurezas en el hidrómetro puede impedir el desarrollo de un menisco uniforme.

#### **4.10. Ventajas y desventajas del método**

**I.** La principal ventaja del análisis granulométrico por hidrómetro es la realización de pruebas simultáneas. Se realiza una lectura en un ensayo, se retira el hidrómetro, y después de limpiarlo se toma la lectura en otro ensayo.

**II.** El hidrómetro es económico y fácil de adquirir.

**III.** Si bien, tras realizar el ensayo se realizan ciertas correcciones (menisco, temperatura y defloculante), los errores humanos involuntarios al manipular el hidrómetro generan imprecisiones en los resultados de la prueba.

## 5. Conclusiones

- El método del hidrómetro nos permite hallar la cantidad de material fino presente en una muestra roca.
- Al implementar el método de análisis granulométrico por hidrómetro es posible realizar correlaciones con el método seco (Método mecánico).
- El ensayo está basado en la ley de Stokes, la cual relaciona la velocidad de sedimentación de una partícula esférica con su diámetro, por lo cual asumimos que todas las partículas presentes en las muestras son esferas perfectas.
- Hay un porcentaje de error que puede afectar mínimamente el resultado debido al error humano durante la prueba como puede ser el activar y detener el cronómetro, o perturbación de la suspensión cuando se introduce o remueve el hidrómetro, entre otros.
- La implementación de la prueba en el laboratorio de Análisis Petrofísicos permitirá al estudiantado realizar un análisis exhaustivo de la granulometría de la roca, con el fin de completar la curva granulométrica y conocer a detalle la composición de esta.
- Una vez aprobado el proyecto se tiene como objetivo implementar el Método de Análisis Granulométrico en el laboratorio de Análisis Petrofísicos de la Universidad.

## 6. Recomendaciones

- Para partículas muy pequeñas su velocidad de sedimentación es pequeña por lo que es recomendable dejar la muestra varios días en reposo.
- Al formarse el menisco alrededor del vástago no puede hacerse la lectura correcta, por tanto, es necesario realizar la corrección por menisco sumando la altura de este.

### Referencias bibliográficas

- Allen, T. (1974) *Particle size measurement*. Chapman and Hall, Londres.
- American Society For Testing And Materials: *Standard test method for particle-size analysis of soils. D 422–63* (1972), 1985, Annual book of ASTM standards 04.08:117–127, ASTM, Philadelphia, PA, 1985.
- Bouyoucos, G., Agron, J. (1962). *Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils*. Vol. 54: 464-465.
- Cañas, J. S. (2007). Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz no. 200 en agregado mineral por lavado. 15.
- Carter, M.R. and Gregorich, E.G., Eds. (2008) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nd Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Chakraborty, D.; Chakraborty, A.; Santra, P.; Tomar, R. K.; Garg, R. N.; Sahoo, R. N.; Choudhury, S. G.; Bhavanarayana, M.; y Kalra, N. 2006. Prediction of hydraulic conductivity of soils from particle–size distribution. *Current Sci.* 90(11):1526 – 1531.
- Das, B. M., & León, J. C. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. México^ eD. F DF: Cengage Learning.
- De la Coruña, J., Catedrático de Estructuras Conceptos generales de la mecánica del suelo.
- De las Heras Jiménez, S. (2012). *Mecánica de fluidos en ingeniería*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Duque, G., & Escobar, C. (2012). *Consolidación de suelos. Mechanical de Los Suelos*, 80–109. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/1864/10/cap9.pdf>

- Duque Escobar, G. (2017). Estructura del suelo y granulometría. *Manual de Geología Para Ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia, 48–71. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/53252/17/estructuradelsueloygranulometria.pdf>
- Duque, Gonzalo; Escobar, C. (2013). *Mecánica De Los Suelos I. Origen Formación Y Constitución Del Suelo*, Físicoquímica de Las Arcillas, 1–8.
- Ed. Barth, H.G. John Wiley and sons. (1984). *Modern methods of particle size análisis. Chemical Analysis*. Vol. 73. Nueva York.
- Gee, G.W. and J.W. Bauder. (1979). *Particle size analysis by hydrometer: A simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters*. Soil Sci. Soc. Amer. J., vol. 43: 1004-1007.
- Gee, G. W., & Or, D. (2002). *Particle-size analysis. in Methods of Soil Analysis*. Part 4: Physical Methods, 255-293.
- González, H. M., & Coronado, J. G. (2007). *The hydrometer method: theoretical basis for its employment in determining the soil particle-size distribution*. 16(3), 7.
- Hendershot, W., Lalonde, H., & Duquette, M. (2007). *Ion Exchange and Exchangeable Cations*. Soil Sampling and Methods of Analysis, Second Edition. <https://doi.org/10.1201/9781420005271.ch18>
- Ingeniería y construcción. Granulometría De Suelos. [En línea]. Bogotá. [Citado 7 marzo, 2018] Disponible en internet: < <https://civilgeeks.com/2013/11/25/granulometria-suelos-ing-nestor-luis-sanchez/> >
- INVIAS. *Método de ensayo normal para el uso del penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad*. Bogotá. Norma Invias. E– 172 – 07. Año 2007

INVIAS. *Análisis granulométrico por medio del hidrómetro*. Bogotá. Norma Invias E 124-13. Año 2013

Jiménez Salas, J. A., & de Justo Alpañes, J. L. (1975). *Diferencias entre limos y arcillas. Estados de consistencia*. Geotecnia Y Cimientos I, 1975.

Medina, H., Garcia J. & Nuñez, D.. (2007). *The hydrometer method: theoretical basis for its employment in determining the soil particle-size distribution*. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 16, 19-24.

Ripoll, A. B., & Sánchez-Pastor, M. P. S. (2005). *Fundamentos y Aplicaciones de la Mecánica de Fluidos*. McGraw-Hill.

Shames, I. H., Moneva, J. M., & Crusells, S. P. (1995). *La mecánica de los fluidos (Vol. 2)*. Colombia: McGraw-Hill.

Wertheimer, A.L., Wilcock, W.L. (1976) Light Scattering measurements of particle distributions.