

## **Red Argentina Protierra 2020**

---

# **PROTOCOLO DE ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS**

---

## PRESENTACIÓN

Este trabajo pretende reunir en un documento único los métodos de ensayo de laboratorio para la identificación de los distintos tipos de suelo. Para la confección del mismo se han empleado como referencia normas nacionales redactadas por el Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM y la Dirección Nacional de Vialidad Argentina DNV.

Comisión de Materiales, Sistemas Constructivos y Ensayos de Laboratorio.

### Participaron en la redacción de este documento

*Bertrand Pahaut*

*Cecilia Brizuela Barros*

*Federico Videla*

*Guadalupe Cuitiño*

*Laura Bellmann*

*Lucas Peisino*

*Luis Canavesi*

*Mariano Matar Arturo*

*María Dolores Aramburu*

*Nahuel Castaño Llugard*

*Pablo Costamagna*

*Santiago Cabrera*

## INDICE

<b>1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO .....</b>	<b>4</b>
1.1. Preparación de la muestra .....	5
1.2. Procedimiento .....	6
1.3. Resultados .....	7
<b>2. PROCEDIMIENTO DEL HIDRÓMETRO.....</b>	<b>9</b>
2.1. Instrumentos .....	9
2.2. Preparación de la muestra .....	9
2.3. Principio general del método del hidrómetro.....	10
<b>3. MÉTODO DE ENSAYO DEL MATERIAL FINO QUE PASA EL TAMIZ IRAM #200 POR LAVADO.....</b>	<b>11</b>
3.1. Instrumental.....	11
3.2. Muestreo .....	11
3.3. Procedimiento .....	12
3.4. Calculo .....	13
<b>4. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) Y DEL LÍMITE PLÁSTICO (LP) DE UNA MUESTRA DE SUELO. ÍNDICE DE FLUIDEZ (IF) E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP) .....</b>	<b>14</b>
4.1. Métodos de ensayo para la determinación del límite líquido .....	14
4.2. Método de ensayo para la determinación del límite plástico .....	18
4.3. Índice de plasticidad.....	20
4.4. Índice de fluidez .....	23
<b>5. LIMITE DE CONTRACCIÓN .....</b>	<b>24</b>
5.1. Instrumental.....	24
5.2. Procedimiento de ensayo.....	24
5.3. Cálculo del límite de contracción .....	25
<b>6. COMPACTACIÓN DE SUELOS (PROCTOR).....</b>	<b>27</b>
6.1. Objetivo .....	27
6.2. Instrumental.....	27
6.3. Procedimiento de ensayo.....	28
6.4. Cálculos y resultados .....	30
6.5. Trazado de la curva humedad densidad .....	31
6.6. Planillas y curvas.....	31
6.7. Incidencia del material grueso .....	32

# 1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

El análisis granulométrico se realizará en base a la Norma **IRAM 1505:2005 "Agregados. Análisis Granulométrico"**.

El análisis granulométrico de los suelos o granulometría de suelos es uno de los ensayos más básicos y sencillos para caracterizar un suelo, pero no por ello menos importante. De hecho, únicamente con este ensayo ya podemos aproximarnos a las características geotécnicas del suelo. El suelo es constituido básicamente por partículas que pueden ser agrupadas de acuerdo con las dimensiones de los granos, los agregados se dividen en finos y gruesos. Se entiende por agregados gruesos (piedra partida y canto rodado) a las rocas que constituyen partículas que son retenidas por el tamiz N° 4 (4,8 mm). Las partículas contenidas en determinada franja son clasificadas como grava, arena, limo y arcilla; siendo que la arena también puede ser subdividida y calificada como gruesa, mediana y fina, ver Tabla 1. El análisis de la distribución por tamaños de las partículas que componen un agregado, se denomina comúnmente Análisis Granulométrico. La curva granulométrica es determinada a través de dos ensayos: para las partículas más grandes – grava y arena – se utiliza el proceso de tamizado y, para las partículas más finas – limo y arcilla – el análisis es hecho por sedimentación. Con los valores obtenidos de % que pasa por cada malla, se confecciona la llamada Curva Granulométrica, presentando en el eje de ordenadas dichos porcentajes en escala natural y en el eje de abscisas se representan las aberturas de mallas en escala logarítmica.

Suelo	Tamaño (mm)	Tamiz	Características	Método utilizado
Grava	76.2 – 4.75	3" – N° 4	Inerte y resistente	Tamizado
Arena	Gruesa 4.75 – 2	N° 4 - N° 10	Inerte y sin cohesión	
	Media 2 – 0.42	N° 10 - N° 40		
Fina 0.42 - 0.074	N° 40 - N° 200			
Limo	0.074 – 0.005		Sin cohesión, disminuye la resistencia de la arena	Hidrómetro
Arcilla	0.005 – 0.001		posee fuerte cohesión, sin estabilidad volumétrica, expande en la presencia del agua; presenta propiedades físicas y químicas bastante variadas según su origen	

Tabla 1: Clasificación de suelos y metodología de ensayo utilizada

El instrumental requerido para llevar a cabo los análisis granulométricos consiste en

- Un vibrador mecánico
- Tamices IRAM según según las características indicadas en la norma IRAM 1501.
- Fondo recibidor y tapa.
- Cuarteador de muestras o partidor de Jones.
- Balanza que permita pesar al 0,1 % de la masa de la muestra a ensayar.
- Estufa capaz de mantener una temperatura de 105 ° C ± 5° C.

## 1.1. Preparación de la muestra

El procedimiento del ensayo dependerá del grado de consolidación de las muestras. En general la rutina a seguir es la siguiente:

- Cuarteo
- Desagregación mecánica
- Desagregación química
- Secado y pesado de la muestra

### Procedimiento

Sucesivas divisiones de la muestra total en cuartos, con el objeto de obtener una porción representativa de todas las características originales. Se hace un montículo de muestra sobre una superficie limpia y con una espátula o cuchara, se lo divide en cuatro porciones iguales. Se retienen las dos cuartas partes alternantes (guardando el resto de la muestra) y se repite con ella la operación hasta conseguir aproximadamente el peso de material requerido. La cantidad exacta de material a usarse dependerá fundamentalmente del tamaño y selección de los sedimentos. A manera de guía se pueden sugerir los siguientes pesos aproximados (Carver, 1971, pág.51-52):

- Grava fina: 500 grs
- Arena gruesa: 200 grs
- Arena mediana: 100 grs
- Arena fina: 25-50 grs
- Fracción menor: 5-25 grs

### Desagregación mecánica

En el caso de tener una roca consolidada o semi-consolidada (terrones arcillosos) se debe efectuar la separación de los elementos, para permitir el análisis de la misma. Generalmente se realiza una desagregación parcial antes del cuarteo y otra posterior a él, para eliminar todos los grumos y obtener los clastos individuales. Para ello los pasos a seguir son los siguientes:

- Se seca el sedimento al aire libre o a 40°C en horno.
- Desagregar todos los grumos inicialmente con los dedos para luego usar un pilón de madera o goma en un mortero de porcelana (también puede usarse un rodillo de madera) ejerciendo presión para separar los granos sin que se rompan los clastos (ya que sino formarían parte de un intervalo granulométrico de menor tamaño).

### Desagregación química

Cumplido los pasos anteriores se efectúa la desagregación química de la muestra, o sea la eliminación de los materiales cementantes. Los ensayos que se realizan deben efectuarse en orden estricto, ya que de no hacerse así podrían producirse efectos contrarios a los buscados, debido a que los reactivos utilizados pueden reaccionar con subproductos. El orden establecido es el siguiente:

- Eliminación de materia orgánica (con peróxido de hidrógeno, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)
- Eliminación de carbonatos (con ácido clorhídrico, HCl)

Primeramente, y a los efectos de cuantificar someramente el grado de reactividad de la muestra, debe tomarse una pequeña cantidad de la misma para efectuar pruebas con distintos reactivos. Si las reacciones son positivas, se hacen luego con el resto de la muestra cuarteada. En caso de ser negativa una prueba, se pasa a la siguiente, siguiendo el orden establecido. Es importante recordar que se debe tomar el peso seco de la muestra antes y después de cada ensayo para cuantificar.

**a) Eliminación de la materia orgánica**

Con este procedimiento rara vez se elimina completamente la materia orgánica, pero aun así es muy útil para dispersar el sedimento. Si hay poca materia orgánica, colocar la muestra (previamente pesada) en un recipiente y agregar 100 ml de peróxido de hidrógeno al 6% (20 vol.) lentamente y con agitación constante. Repetir esta operación hasta que cese el burbujeo. Cubrir el recipiente y calentar a 40°C por espacio de 1 hora. Luego se filtra, se seca y se calcula la materia orgánica por diferencia de peso. Si hay mucha materia orgánica presente, agregar agua oxigenada al 40 %, muy despacio, agitando al mismo tiempo y hasta que se detenga el burbujeo. Luego calentar a 40°C durante 10' evitando pérdidas de material por excesiva violencia del burbujeo. Evaporar hasta que se haga una pasta delgada, sin llevar a sequedad. Posteriormente agregarle entre 10 a 30 ml de agua oxigenada 30% y cubriéndola con un vidrio de reloj calentarla entre 40-60°C durante 1-12 hs. Este procedimiento debe repetirse hasta que se haya removido toda la materia orgánica. Finalmente, dar un pequeño hervor para remover el exceso de agua oxigenada (controlando el pH que debe ser 6- 7).

**b) Eliminación de cemento y clastos carbonáticos**

El ataque se realiza con HCl, teniendo en cuenta que afecta también a los componentes fosfáticos y sulfuros (no se recomienda si se deben efectuar estudios mineralógicos). Se coloca la muestra en un erlenmeyer y se le agrega 25 ml de agua destilada, agitando para mezclar. Se agrega lentamente HCl 10% hasta que se detenga la efervescencia. Si el material carbonático es abundante se producirá un gran volumen de líquido. Entonces se podrá agregar lentamente ácido concentrado, extrayendo (de ser necesario) el líquido por medio de un sifón. Posteriormente calentar a 80-90°C y agregar HCl hasta obtener un pH de 3,5 a 4 y mantenerlo en ese valor. Si hay mucho carbonato, los iones de Ca disueltos interferirán con la dispersión de la muestra, con la remoción de la materia orgánica con agua oxigenada (por eso se debe eliminar primero) y precipitarán como oxalato de Ca en el tratamiento de remoción de los óxidos de Fe. Por lo tanto, se debe lavar la muestra con HCl 0,1%, repitiéndolo 3 o 4 veces. El líquido resultante debe ser analizado para determinar Ca, colocando una pequeña cantidad en un tubo de ensayos en medio alcalino y agregando oxalato de amonio. Si hay Ca se producirá la precipitación de oxalato de Ca (blanco). Finalmente se lava la muestra hasta obtener un pH de 6-7.

**Secado y pesado de la muestra**

Finalizado los ataques químicos y luego de haber lavado la muestra hasta obtener pH neutro, se procede a secar y pesar el material dejándolo preparado para comenzar el análisis granulométrico. La muestra se seca en un horno a 40°C (si no hay arcillas presentes se puede secar hasta a 100°C). Posteriormente se deja expuesta 1 hora a la humedad ambiente para que alcance el equilibrio con la del laboratorio. Luego, se pesa al miligramo anotando el dato para ser usado posteriormente para los cálculos de porcentajes luego del análisis granulométrico.

## 1.2. Procedimiento

Los pasos a seguir en la determinación granulométrica se detallan a continuación:

- La muestra se seca en la estufa durante 24hs + 1h a la temperatura de 105°C + 5°C hasta que la masa sea constante. Se considera masa constante cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas tomadas sobre la misma muestra a intervalos de 1h es menor que 0.2%.
- Los resultados son poco afectados por el contenido de humedad, salvo cuando el tamaño máximo nominal del agregado sea menor que 13.2mm o cuando el agregado grueso tenga un contenido apreciable del material que pase por el tamiz IRAM 4.75mm o cuando el agregado grueso sea altamente absorbente, como es el caso de un agregado liviano.
- Se determina la masa de la muestra de ensayo.

- Se coloca el conjunto de tamices uno por encima del otro en el orden del tamaño de las aberturas decrecientes de arriba hacia abajo y la muestra de suelo se coloca en el tamiz superior.
- Se pesa cada tamiz con su retenido parcial, verificando que no se ha superado la carga máxima permitida para el tamiz.
- Se procede a la suma de las masas de suelo retenido en todos los tamices. Si ésta difiere en más del 0,3% de la masa de la muestra seca original, debe repetirse el ensayo empleando una nueva muestra del mismo suelo.



TAMIZ	ABERTURA (mm)
-	10.00
# 4	4.75
# 10	2.00
# 20	0.85
# 40	0.43
# 60	0.25
# 100	0.15
# 200	0.08

Figura 1: Ensayo de tamizados: Serie de tamices recomendada y equipo electrónico de tamizado (Fuente: Neves et al, 2009)

### 1.3. Resultados

Se calculan los porcentajes que pasan, los porcentajes retenidos acumulados y los porcentajes retenidos parciales, con una aproximación del 0,1 % sobre la base de la masa total de la muestra seca original.

Los resultados del análisis mecánico se presentan generalmente en graficas semilogarítmicas como curvas de distribución granulométrica. Los diámetros de las partículas se grafican en escala logarítmica y el porcentaje correspondiente de finos en escala aritmética. Los porcentajes de grava, arena, limo y partículas de arcillas presentes en el suelo se obtienen de la curva de distribución granulométrica, ver Figura 2.

A partir del trazado de la curva de granulometría, se podrá observar la homogeneidad o heterogeneidad de dicho suelo, siendo lo óptimo que la curva este dentro de la zona griseada de la Figura3.

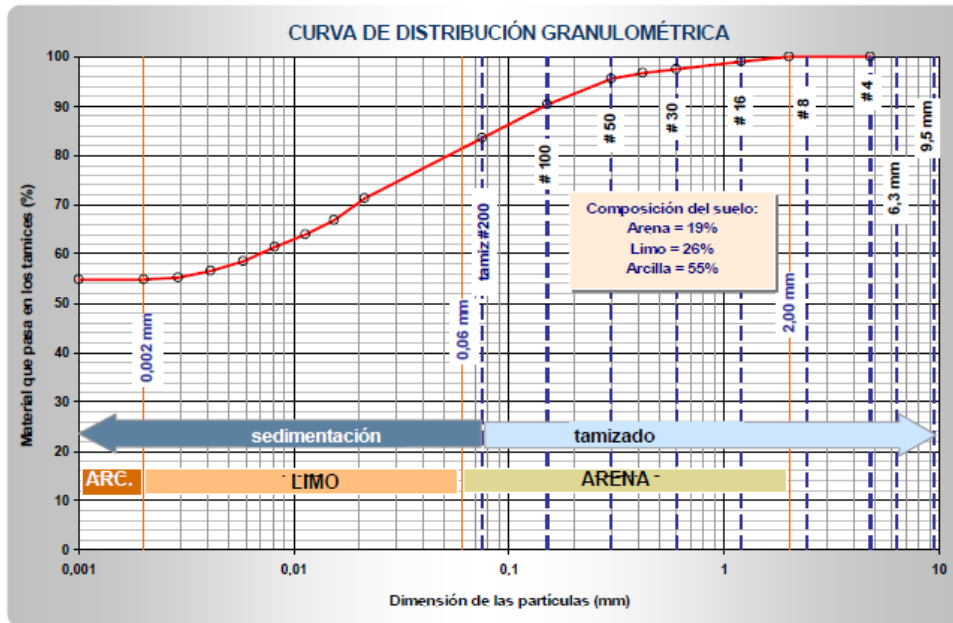


Figura 2: Ejemplo de la curva de distribución granulométrica con indicación de las fracciones que componen el suelo, además de las franjas para ensayo de tamizado y sedimentación (Fuente: Neves et al, 2009)

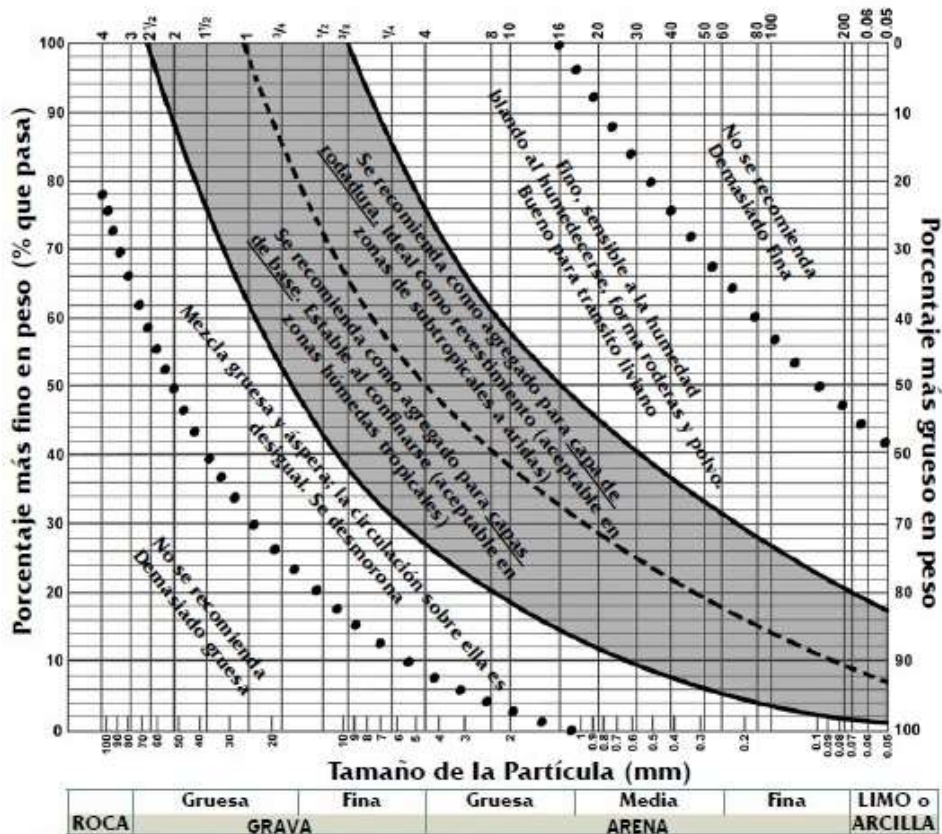


Figura3: Intervalos de variación de la granulometría para diferentes usos de acuerdo con el comportamiento buscado.



## 2. PROCEDIMIENTO DEL HIDRÓMETRO

En el ensayo de sedimentación, se mide la velocidad de decantación de las partículas dispersas en el agua, en función de la variación de la densidad de la solución, calculándose sus proporciones en la muestra. El hidrómetro, cualquiera que sea su tipo, es un dispositivo que permite medir la densidad de la solución en la cual se suspende. Este método de prueba cubre las determinaciones cuantitativas de la distribución de tamaño de las partículas de las fracciones finas de los suelos. La distribución de tamaños de partículas más grandes de 75 µm (retenidas en el tamiz No 200) se determina por tamizado, en tanto que la distribución de las partículas más pequeñas que 75 µm se determina por un proceso de sedimentación, usando un hidrómetro.

### 2.1. Instrumentos

- Balanza, de sensibilidad 0.1 g
- Tamices, de 2.0 mm (N° 10) y de 74 µm (N°200)
- Aparato agitador, mecánico o neumático, con su vaso.
- Hidrómetro. Graduado para leer, de acuerdo con la escala que tenga grabada, el peso específico de la suspensión o 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 (gr/l) que van de -5 a +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.
- 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.
- Termómetro de inmersión, con apreciación de 0.5 °C (0.9 °F).
- Cronómetro o reloj.
- Horno, capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F).
- 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.
- 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.

### 2.2. Preparación de la muestra

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 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. El peso se determina mediante la siguiente fórmula:

$$W_s = \frac{\text{Peso del suelo humedo}}{1 + \frac{\text{Humedad (w)}}{100}} \quad (1)$$

Donde la humedad (w) se determinará usando una porción de muestra de suelo que no vaya a ser ensayada.

### 2.3. Principio general del método del hidrómetro

Se toma una probeta con agua, se introduce suelo, se agita hasta lograr una suspensión uniforme; luego se deja en reposo para ir midiendo, con hidrómetro para distintos tiempos transcurridos, Figura 4, la densidad de la suspensión disminuye a medida que las partículas se asientan. La profundidad del densímetro es variable con la densidad de la suspensión, es la base para calcular esa distribución de tamaños de granos finos que pasa la malla o tamiz N° 200, con  $\phi = 0,074$  mm. El sistema se calcula con el apoyo de “La Ley de Stokes”, Ec (2):

$$D = \sqrt{\frac{18n*v}{\gamma_s - \gamma_f}} \quad (2)$$

Donde:

- v = velocidad en cm/seg = constante
- n = viscosidad en Poises = gr/cm sg
- $\gamma$  = peso unitario del sólido y del fluido en gr/cm<sup>3</sup>
- D = diámetro de una esferita (diámetro equivalente) en cm.
- Para calcular el porcentaje de partículas de diámetro mas fino, se utiliza la siguiente ecuación (3):

$$\text{Porcentaje mas fino} = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \times \frac{100}{W_o} \times (R - C_d + C_t) \quad (3)$$

Donde:

- $\gamma_s$  = Peso unitario de los sólidos.
- $W_o$  = Peso de la muestra de suelo secado al horno y que se empleó en el ensayo.
- (R-Cd-Ct) = Lectura del hidrómetro corregida por meniscos menos la corrección por el defloculante más corrección por temperatura (Este valor puede ser positivo o negativo dependiendo de la temperatura de la suspensión al momento de realizar la lectura).



Figura 4: Ensayo de sedimentación: aparato dispersor, transferencia del suelo disperso para la probeta de 1 lt y homogeneización de la temperatura del densímetro (Fuente: Neves et al, 2009).

### 3. MÉTODO DE ENSAYO DEL MATERIAL FINO QUE PASA EL TAMIZ IRAM #200 POR LAVADO

En este método se separan las partículas arcillosas y de otra naturaleza que están adheridas a la superficie del agregado, así como los materiales solubles, mediante un lavado repetido, con agitación y posterior decantación. Se describen dos procedimientos para llevar a cabo el análisis, A- que solamente utiliza agua para la operación de lavado y el B- que incluye un agente humectante para facilitar el desprendimiento del material fino que pasa el tamiz IRAM 75  $\mu\text{m}$  del material más grueso. Con la mayoría de los agregados el agua es adecuada para separar el material más fino del grueso. En algunos casos, sin embargo, el material más fino está adherido a las partículas más gruesas. En tales casos, el material fino se separa más fácilmente añadiendo un agente humectante al agua de lavado.

Este ensayo se realizará en base a la Norma **IRAM 1540:2004 "Agregados. Método de ensayo del material fino que pasa por el tamiz IRAM 75  $\mu\text{m}$ , por lavado"**.

#### 3.1. Instrumental

- Balanza: Se requiere de una balanza con una precisión de 0.1gr o d 0.1% de la masa de la muestra de ensayo.
- Tamices: Es necesario un tamiz IRAM 75  $\mu\text{m}$  y otro tamiz IRAM 1.18mm.
- Recipiente: un recipiente de tamaño adecuado para contener la muestra cubierta con agua y permitir una vigorosa agitación, sin que se produzcan pérdidas de muestra o de agua.
- Estufa: Una estufa capaz de mantener una temperatura regulada a 105°C + 5°C.
- Agente humectante: Se debe contar con un agente dispersante como un detergente comercial, que facilite la separación del material fino.

#### 3.2. Muestreo

Se realiza el muestreo de la misma forma que para el caso del ensayo de granulometría por tamices. La masa seca de la muestra para el ensayo responderá a lo establecido en la Tabla 2. El producto final de la reducción será la muestra de ensayo, no debiendo efectuarse la reducción hasta una masa determinada.

Tamaño máximo nominal (mm)	Masa mínima (gr)
2.36	100
4.75	500
9.5	1.000
19	2.500
> 37,5	5.000

Tabla 2: Masa de la muestra

### 3.3. Procedimiento

#### a) Lavado solamente con agua

Se seca la muestra de ensayo hasta masa constante a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Se determina la masa al 0.1% más próximo de la masa de la muestra de ensayo ( $m_s$ ). Se considera masa constante cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas tomadas sobre la misma muestra a intervalos de 1h es menor al 0.2%. Se coloca la muestra de ensayo en el recipiente y se agrega agua hasta cubrirla completamente. Se agita la muestra con vigor para lograr la completa separación de todas las partículas más finas de  $75 \mu\text{m}$ , de las partículas más gruesas. En caso de ser necesario, la muestra se dejará sumergida el tiempo necesario para que las partículas de suelo se separen.

A continuación, se vierte el agua de lavado que contiene los sólidos disueltos y en suspensión sobre el juego de tamices con el tamiz de mayor tamaño en la parte superior. Se debe cuidar de que no se produzca la pérdida de las partículas más gruesas fuera del tamiz. Se agrega una segunda carga de agua a la muestra contenida en el recipiente, se agita y se vuelca en el tamiz nuevamente. Este proceso se repite hasta que el agua de lavado sea limpia. Se regresa todo el material retenido en los tamices al recipiente, mediante la aplicación de un chorro de agua sobre la muestra lavada. Se seca la muestra del agregado lavado hasta que la masa sea constante, a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  y se determina la masa al 0.1% más próximo de la masa original de la muestra ( $m_l$ ).



Figura 5: Instrumental para ensayo de lavado del material fino por tamiz  $75 \mu\text{m}$

#### b) Lavado usando un agente humectante

Se prepara la muestra de la misma forma que para el procedimiento A. Después de secar y determinar la masa, se coloca la muestra de ensayo en el recipiente agregando agua hasta cubrirla completamente y luego se agrega el agente humectante al agua. Se agita la muestra con vigor para lograr la completa separación de todas las partículas más finas de las más gruesas. Se debe tener precaución que al momento de poner el detergente y se realice la agitación de la muestra, no se produzca una espuma excesiva que pueda hacer desbordar los tamices y arrastrar material con ella.

A continuación, se vierte el agua de lavado que contiene los sólidos disueltos y en suspensión sobre el juego de tamices con el tamiz de mayor tamaño en la parte superior. Se debe cuidar de que no se produzca la pérdida de las partículas más gruesas fuera del tamiz. Se agrega una segunda carga de agua a la muestra contenida en el recipiente, se agita y se vuelca en el tamiz nuevamente. Este proceso se repite hasta que el agua de lavado sea limpia. Se regresa todo el material retenido en los tamices al recipiente, mediante la aplicación de un chorro de agua sobre la muestra lavada. Se seca la muestra del agregado lavado hasta que la masa sea constante, a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  y se determina la masa al 0.1% más próximo de la masa original de la muestra.

### 3.4. Cálculo

Se calcula la cantidad de material fino que pasa el tamiz IRAM 75  $\mu\text{m}$ , por lavado, aplicando la ecuación (4) siguiente.

$$m_f = \frac{m_s - m_l}{m_s} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

- $m_f$  = La cantidad de material fino que pasa por el tamiz IRAM 75  $\mu\text{m}$  por lavado, en porcentaje.
- $m_s$  = La masa seca original de la muestra determinada después del tamizado y secado en el horno.
- $m_l$  = La masa de la muestra después del lavado.

## 4. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) Y DEL LÍMITE PLÁSTICO (LP) DE UNA MUESTRA DE SUELO. ÍNDICE DE FLUIDEZ (IF) E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)

Según su grado de humedad, el suelo puede ser líquido, plástico o sólido. El aspecto y la consistencia de los suelos y, en particular de las arcillas presentes, varían de manera muy nítida conforme la cantidad del agua que contiene. Atterberg (apud Caputo, 1978) desarrolló ensayos que consisten en medir el grado de humedad del suelo en los diversos estados de consistencia (Figura 6). La plasticidad del suelo y los límites de consistencia son determinados a través de dos ensayos: límite líquido y el límite plástico. Los ensayos de plasticidad son realizados solamente con la parte fina del suelo, representada por el material que pasa en el tamiz de abertura 0,42 mm (N°40). El límite líquido (LL) es el grado de humedad determinado por el aparejo de Casagrande. Él es constituido por una cuchara metálica unida a una manivela que la mueve, haciéndola caer sobre una base sólida, un cierto número de veces, hasta el cerramiento de 1 cm de la ranura estándar, hecha previamente en el suelo colocado en la cuchara. El límite líquido corresponde al tenor de humedad en que la ranura se cierra con 25 golpes. El límite plástico (LP) es el grado de humedad necesario y suficiente para deslizar una porción de suelo humedecido sobre una placa de vidrio, hasta formar un pequeño cordón con 3 mm de diámetro y 12 a 15 cm de longitud. La diferencia entre los límites de liquidez y de plasticidad determina el índice de plasticidad ( $IP = LL - LP$ ).

Los métodos de ensayo propuestos para se basan en la norma IRAM 10501:2007 y las Normas de Ensayos de la Dirección Nacional de Vialidad).

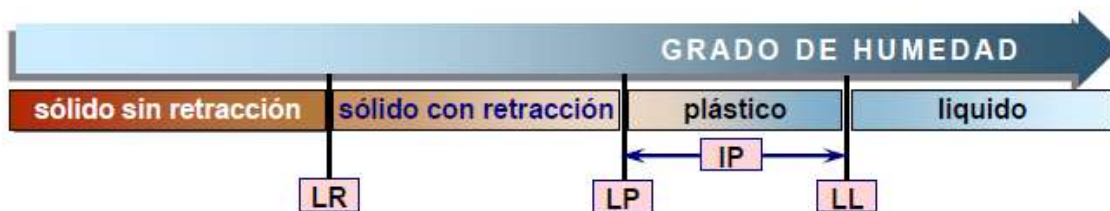


Figura 6: Estado del suelo en función del grado de humedad (Neves et al, 2009)

### 4.1. Métodos de ensayo para la determinación del límite líquido

Se establecen las variantes siguientes:

- Procedimiento mecánico.** Este proceso es un resultado basado en la determinación de la línea de fluidez, con un mínimo de tres intentos. Este procedimiento se recomienda para determinaciones corrientes.
- Procedimiento acelerado (de un solo punto).** Se llega al resultado por cálculo, luego de una sola determinación. Este procedimiento se recomienda para determinaciones corrientes, con las salvedades impuestas en su procedimiento.

#### Instrumental

Para la determinación del límite líquido se usa el siguiente instrumental:

- Mortero de porcelana o madera con pilón revestido con goma, de medidas corrientes.
- Tamiz IRAM 425 micrómetros (N° 40).
- Cápsula de porcelana o hierro enlozado de 10 a 12 cm., de diámetro.
- Espátula de acero flexible con hoja de 75 a 80mm. de largo y 20mm de ancho, con mango de madera.

- Aparato para la determinación semimecánica del límite líquido de las dimensiones y demás características indicadas en la Figura 7.
- Acanalador de bronce o acero inoxidable.
- Pesa filtros de vidrio o aluminio de 40mm de diámetro y 30mm de altura aproximadamente.
- Buretas de vidrio con robinetas.
- Balanza de precisión con sensibilidad de 1 centigramo.
- Estufa para secado de muestras regulable, que asegure temperaturas de 105°C. –110°C.
- Elementos varios de uso corriente: bandejas para mezclas de material, rociadores, probetas, espátulas, etc.

#### Preparación del equipo de ensayo

Para calibrar el aparato se gradúa el tornillo A (Figura 7) para lograr que la máxima altura de caída libre, del punto de la cuchara que golpea sobre la plancha de ebonita o de caucho. El ajuste se logra por medio de una barra de sección rectangular, de 10 mm de altura, que se coloca debajo de la cuchara del aparato. Para dicha operación se puede utilizar el cabo del acanalador. Después de ajustado el aparato, se aprieta el tornillo B, que impide se desajuste el A durante el ensayo.

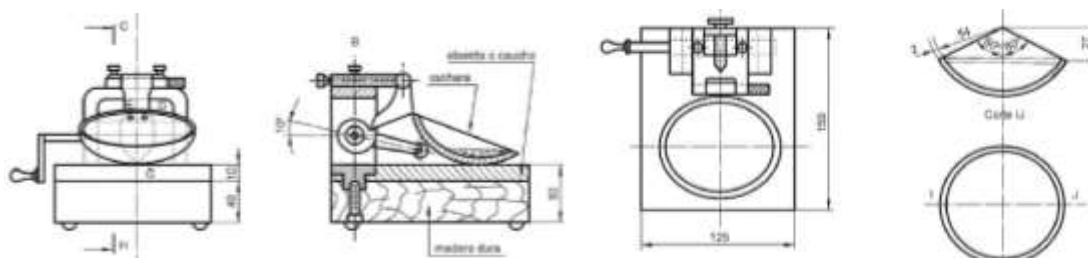


Figura 7: Aparato de Casagrande para determinar el límite líquido

#### Preparación de la muestra

El ensayo se realiza sobre la fracción del material que pasa por el tamiz IRAM 425  $\mu\text{m}$  (Nº 40).

##### a) Suelos finos

Si se trata de suelo fino se toma por cuarteo una porción de 400 gr a 500 gr, de suelo secado al aire y se lo hace pasar por el tamiz IRAM 425  $\mu\text{m}$  (Nº 40). La porción retenida por este tamiz se coloca en el mortero y se la desmenuza en el mortero con el pilón revestido en goma. Se tamiza y se repite la operación hasta que pase en su totalidad o se evidencie que la parte retenida está constituida por partículas individuales, de tamaño mayor que la abertura del tamiz. Debe tenerse en cuenta que la operación de desmenuzar con el pilón del mortero tiene por finalidad deshacer grumos y no romper partículas de arena. Se reúnen todas las porciones obtenidas y se mezclan cuidadosamente, para obtener un material homogéneo.

##### b) Suelos finos con material grueso.

Si la muestra contiene material grueso, se separa éste por tamizado a través del tamiz IRAM 2mm. (Nº 10) y con la parte fina se procede como se indicó en el ítem 4.1.3.1. Si a pesar del desmenuzamiento se observa que queda material fino adherido a las partículas gruesas, estas se ponen en maceración con la menor cantidad posible de agua y se hacen pasar por el tamiz IRAM 425  $\mu\text{m}$  (Nº 40). Se recoge el líquido que pasa, el que será evaporado a sequedad, a temperatura no mayor a 60° C. El residuo se desmenuza, y se incorpora a las demás fracciones ya obtenidas, mezclándose cuidadosamente hasta obtener un material homogéneo.

#### 4.1.1. Procedimiento mecánico

- Se toman 50 o 60 gr. del material obtenido y se coloca en una cápsula de hierro enlozado o porcelana.
- Se humedece con agua destilada o potable de buena calidad, dejándose reposar por lo menos durante 1 hora.
- Posteriormente se continúa agregando agua en pequeñas cantidades mezclando cuidadosamente con la espátula después de cada agregado procurando obtener una distribución homogénea de la humedad y teniendo en especial cuidado de deshacer todos los grumos que se vayan formando.
- Cuando la pasta adquiere una consistencia tal que, al ser dividida en dos porciones, éstas comiencen a fluir cuando se golpea la cápsula contra la palma de la mano, se transfiere una porción de la misma a la cápsula de bronce del aparato, se la amasa bien y se la distribuye como lo indica la figura 8, de manera que el espesor en el centro sea aproximadamente de 1 cm.
- Con el acanalador se hace una muesca en forma tal que quede limpio el fondo de la cápsula en un ancho de 2 mm; la muesca debe seguir una dirección normal al eje de rotación en su punto medio, Figura 8.
- Se acciona la manivela a razón de dos vueltas por segundo, y se cuenta el número de golpes necesarios para que, por fluencia se cierren los bordes inferiores de la muesca, en una longitud de aproximadamente 12 mm.
- Verificar si la unión es por fluencia y no por corrimiento de toda la masa. Para esto se procura separar con la espátula los bordes unidos. Si hubo corrimiento de toda la masa la separación se logra fácilmente, quedando limpio el fondo de la cápsula. En cambio, si ha habido fluencia, la cápsula mueve únicamente la parte que ataca y el resto queda adherido al fondo de la cápsula.
- Se retira una porción de pasta, de peso más o menos 10 gr. de la parte en la que se produjo la unión, y se la coloca en el pesafiltro previamente tarado. Se pesa y se anota en la planilla. También se anotará el peso del pesafiltro, su número de identificación y el número de golpes requeridos para lograr la unión de la pasta.
- Se repiten estas operaciones dos veces más, con contenidos crecientes de agua, procurando que los números de golpes requeridos para el cierre de la muesca sean, uno mayor y otro menor de 25 golpes.
- La pasta colocada en el pesafiltro para cada operación se seca en la estufa a temperatura de 105° a 110° C hasta peso constante.

NOTA: Para los suelos altamente plásticos, arcillas muy pesadas, se deberá preparar la muestra, el día anterior al ensayo. Efectuado esto, se cotejará al resultado obtenido al hallado siguiendo el procedimiento normal del ensayo. En caso de obtenerse valores diferentes se adoptará el logrado por la muestra humedecida el día anterior al de ejecución del ensayo.



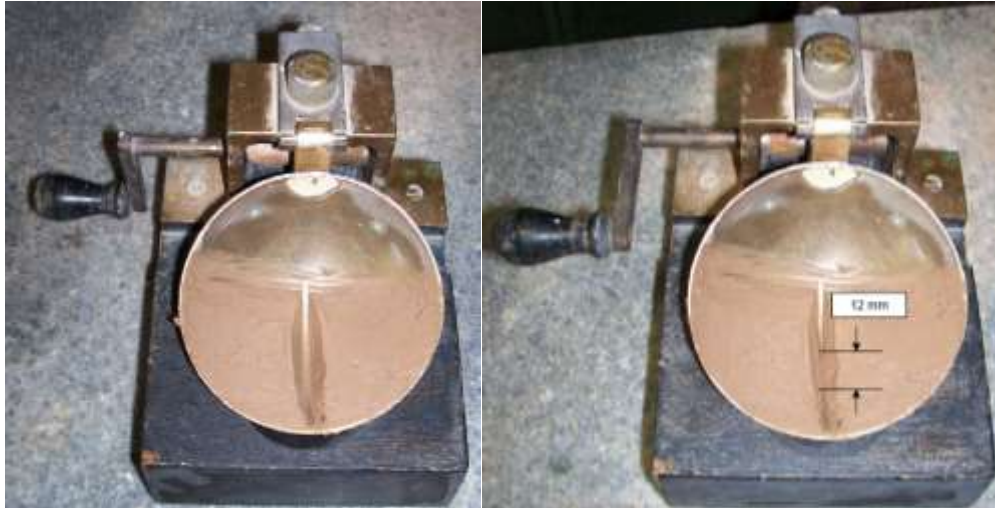


Figura 8: Muestra de suelo en la cuchara de Casagrande, antes y después de realizado el ensayo

### Cálculo

La humedad se determina empleando la ecuación (5):

$$H = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_t} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

- H es la humedad, en por ciento
- $P_1$  el peso del pesafiltro más la porción pasta de suelo húmedo
- $P_2$  el peso del pesafiltro más el suelo seco
- $P_t$  el Peso del pesafiltro vacío

### Representación gráfica

Con los datos obtenidos se confecciona un gráfico cartesiano ortogonal, Figura 9, representando en las abscisas el número de golpes en escala logarítmica y en las ordenadas la humedad porcentual en escala aritmética. De esta manera se determina un punto para cada ensayo efectuado. Los puntos así obtenidos, tres como mínimo, se encuentran aproximadamente sobre una recta, denominada *línea de fluidez*. La humedad correspondiente al punto en que la línea de fluidez corta a la ordenada correspondiente a 25 golpes es el que corresponde al límite líquido.



Figura 9: Gráfico para la determinación del Límite Líquido (LL)

#### 4.1.2. Procedimiento acelerado

El procedimiento es similar al indicado precedentemente en 4.1.4. La humedad de la muestra debe ser tal que se requieran entre 20 y 30 golpes para la unión de los bordes de la muestra. Como medida de seguridad y ajuste deben realizarse dos intentos consecutivos antes de extraer la muestra para determinar el contenido de humedad. Nunca debe agregarse suelo seco a la pasta.

##### Cálculos

La humedad se calcula según lo indicado en la fórmula 5. El límite líquido (LL) se calcula con dos decimales, utilizando la ecuación (6) siguiente:

$$LL = Hx \left( \frac{N}{25} \right)^{0,12} \quad (6)$$

Siendo:

- LL el límite líquido, en por ciento
- H la humedad, en por ciento, calculada según
- N el número de golpes requeridos para unir los bordes inferiores del suelo, con un contenido de humedad H

#### 4.2. Método de ensayo para la determinación del límite plástico

El límite plástico es el contenido de humedad existente en un suelo, expresado en por ciento del peso de suelo seco, es el límite entre el estado plástico y el estado sólido del mismo. Este límite se define arbitrariamente como el más bajo contenido de humedad con el cual el suelo, al ser moldeado en barritas cilíndricas de menor diámetro cada vez, comienza a agrietarse cuando las barritas alcanzan a tener 3 mm. de diámetro.

##### Instrumental

Para la determinación del límite líquido se usa el siguiente instrumental:

- Mortero de porcelana o madera con pilón revestido con goma, de medidas corrientes.
- Tamiz IRAM 425  $\mu\text{m}$  (N° 40).
- Cápsula de porcelana o hierro enlozado de 10 a 12 cm., de diámetro.
- Espátula de acero flexible con hoja de 75 a 80mm. de largo y 20mm. de ancho, con mango de madera.
- Vidrio plano de 30 x 30 cm., o un trozo de mármol de las mismas dimensiones.
- Trozos de alambre galvanizado redondos de 3mm. de diámetro para ser utilizados como elementos de comparación.
- Pesa filtros de vidrio o aluminio de 40mm. de diámetro y 30mm. de altura aproximadamente.
- Buretas de vidrio graduada, con robinete.
- Balanza de precisión con sensibilidad de 1 centigramo.
- Estufa para secado de muestras regulable, que asegure temperaturas de 105°C. a 110°C.
- Elementos varios de uso corriente: bandejas para mezclas de material, rociadores, probetas, espátulas, etc.

##### Preparación de la muestra

El ensayo se realiza sobre la porción del material que pasa por el tamiz IRAM 425  $\mu\text{m}$  (N° 40).

a) Suelos finos

Si se trata de suelo fino se toma por cuarteo una porción de 400 gr a 500 gr, de suelo secado al aire y se lo hace pasar por el tamiz IRAM 425  $\mu\text{m}$  (Nº 40). La porción retenida por este tamiz se coloca en el mortero y se la desmenuza en el mortero con el pilón revestido en goma. Se tamiza y se repite la operación hasta que pase en su totalidad o se evidencie que la parte retenida está constituida por partículas individuales, de tamaño mayor que la abertura del tamiz. Debe tenerse en cuenta que la operación de desmenuzar con el pilón del mortero tiene por finalidad deshacer grumos y no romper partículas de arena. Se reúnen todas las porciones obtenidas y se mezclan cuidadosamente, para obtener un material homogéneo.

b) Suelos finos con material grueso

Si la muestra contiene material grueso, se separa éste por tamizado a través del tamiz IRAM 2mm. (Nº 10) y con la parte fina se procede como se indicó en el ítem anterior. Si a pesar del desmenuzado se observa que queda material fino adherido a las partículas gruesas, estas se ponen en maceración con la menor cantidad posible de agua y se hacen pasar por el tamiz IRAM 425  $\mu\text{m}$  (Nº 40). Se recoge el líquido que pasa, el que será evaporado a sequedad, a temperatura no mayor a 60º C. El residuo se desmenuza, y se incorpora a las demás fracciones ya obtenidas, mezclándose cuidadosamente hasta obtener un material homogéneo.

Procedimiento de ensayo

- Se toman 15 gr a 20 gr del material obtenido según el apartado anterior (según el tipo de suelo) y se colocan en una cápsula de porcelana o de hierro enlozado.
- Se humedece con agua destilada o potable de buena calidad, dejándose reposar por lo menos durante 1 hora.
- Posteriormente se continúa agregando agua en pequeñas cantidades, mezclando cuidadosamente con la espátula después de cada agregado; procurando obtener una distribución homogénea de la humedad y teniendo especial cuidado de deshacer todos los grumos que se vayan formando.
- Se continúa el mezclado hasta obtener que la pasta presente una consistencia plástica que permita moldear pequeñas esferas sin adherirse a las manos del operador.
- Una porción de la parte así preparada se hace rodar por la palma de la mano sobre láminas de vidrio, dándole la forma de pequeños cilindros, Figura 10.
- La presión aplicada para hacer rodar la pasta debe ser suficiente para obtener que las barritas cilíndricas mantengan un diámetro uniforme en toda su longitud.
- La velocidad con la que se manipula a la pasta haciéndola rodar debe ser tal de obtener de 80 a 90 impulsos por minuto, entendiéndose como un impulso un movimiento completo de la mano hacia delante y atrás.
- Si el diámetro de los cilindros es menor de 3 mm. de diámetro y no presentan fisuras o signos de desmenuzamiento, se reúnen los trozos y se amasan nuevamente tantas veces como sea necesario. La operación también se repite si las barritas cilíndricas se agrietan antes de llegar al diámetro de 3mm. En este caso se reúne el material amasándolo con más agua hasta completa uniformidad.
- El ensayo se da por finalizado cuando las barritas cilíndricas comienzan a fisurarse o agrietarse al alcanzar los 3mm. de diámetro, punto que resulta fácil de establecer comparándolo con los trozos de alambre.
- Obtenido este estado se colocan las barritas cilíndricas en un pesafiltro, tapándolo de inmediato para evitar evaporación; se pesan y se secan en estufa a 105º C – 110º C hasta peso constante.

NOTA: Para los suelos altamente plásticos, arcillas muy pesadas, se deberá preparar la muestra, el día anterior al ensayo. Efectuado esto, se cotejará al resultado obtenido al hallado siguiendo el

procedimiento normal del ensayo. En caso de obtenerse valores diferentes se adoptará el logrado por la muestra humedecida el día anterior al de ejecución del ensayo.



Figura 10: Ensayo de determinación del límite de plasticidad (LP)

### Cálculos

El Límite Plástico del suelo se calcula con la siguiente ecuación (7):

$$LP = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_t} \times 100 \quad (7)$$

Donde:

- LP es el Límite plástico.
- $P_1$  es el peso del pesa filtro más el suelo húmedo, al centígramo.
- $P_2$  es el peso del pesa filtro más el suelo seco, al centígramo.
- $P_t$  es el peso del pesa filtro vacío, al centígramo.

### 4.3. Índice de plasticidad

El índice de plasticidad de un suelo es la diferencia numérica entre los valores del límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) de un mismo suelo, ecuación (8).

Es decir:

$$IP = LL - LP \quad (8)$$

### Observaciones

- a. Si el suelo presenta características de plasticidad bien definidas, se amasa el suelo con un contenido de humedad que satisfaga las condiciones establecidas en el ensayo del límite plástico y se ejecuta este. Luego se agrega más agua a la pasta restante en la cápsula y se realiza el ensayo del límite líquido.
- b. Si el suelo tiene poca plasticidad, se realiza primeramente el ensayo de límite líquido y de inmediato con la parte del material restante se ejecuta el ensayo de límite plástico.
- c. Si el suelo no tiene plasticidad, pero si límite líquido. Este caso se presenta cuando al intentar formar la barrita cilíndrica, ésta se rompe antes de alcanzar el diámetro de 3mm. se determina el límite líquido y se indica  $IP= 0$ .
- d. El suelo no tiene plasticidad ni tampoco puede determinarse el valor del límite líquido. Pasa esto cuando el suelo por su excesiva aridez no permite conformar la pastilla en la cápsula del

aparato para la determinación semi mecánica del límite líquido (aparato de Casagrande). Se indica entonces sin límite líquido,  $IP=0$ .

### Representación gráfica

La *carta de plasticidad* para los suelos de grano fino está dividida en seis secciones por la línea A oblicua dada por la ecuación (9) y dos líneas verticales trazadas en  $LL = 30\%$  y  $LL = 50\%$ , Figura 11 y 12. Cada sección del gráfico corresponde a un grupo de suelos con características mecánicas bien definidas, Figura 13. Las tres secciones por encima de la línea A corresponden a los suelos arcillosos inorgánicos de baja, mediana o alta plasticidad. Las tres secciones que están por debajo de la línea A corresponden a los limosos inorgánicos de compresibilidad diversa, los limosos orgánicos y los arcillosos orgánicos. Los suelos con un índice de plasticidad inferior al 10% y un límite líquido inferior al 20% son suelos no cohesivos. Estos aparecen en otra sección del gráfico de plasticidad y en su caso las consideraciones anteriores no proceden.

$$IP = 0,73x(LL - 20) \quad (9)$$

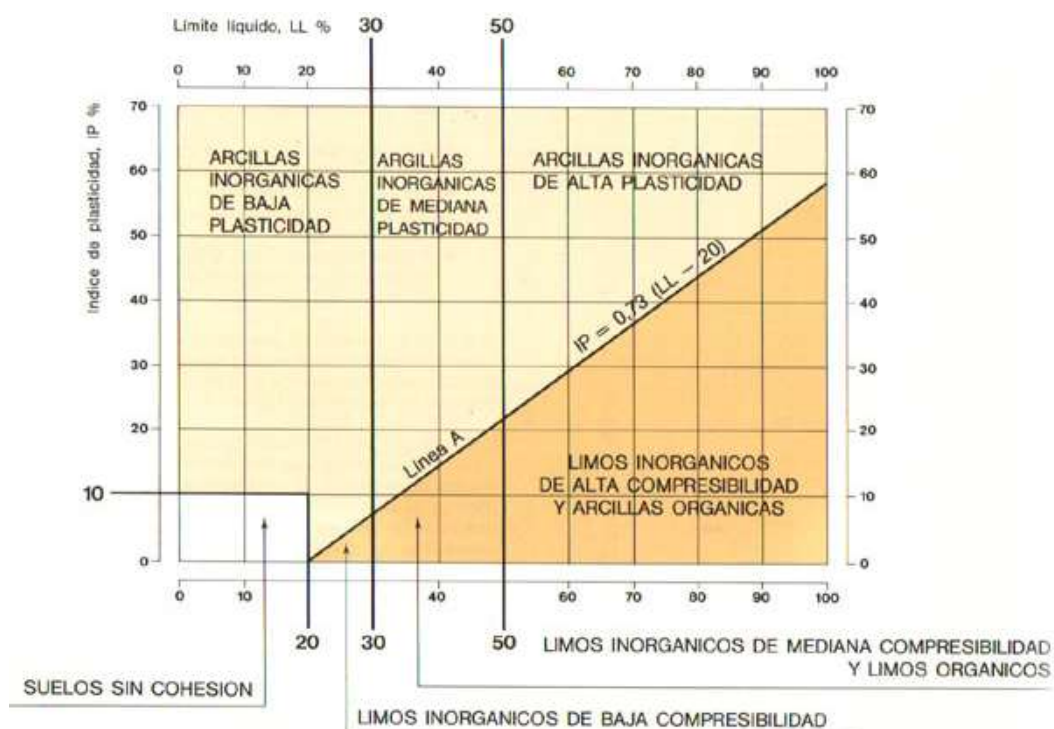


Figura 11: Gráfico de plasticidad modificada de los suelos de grano fino

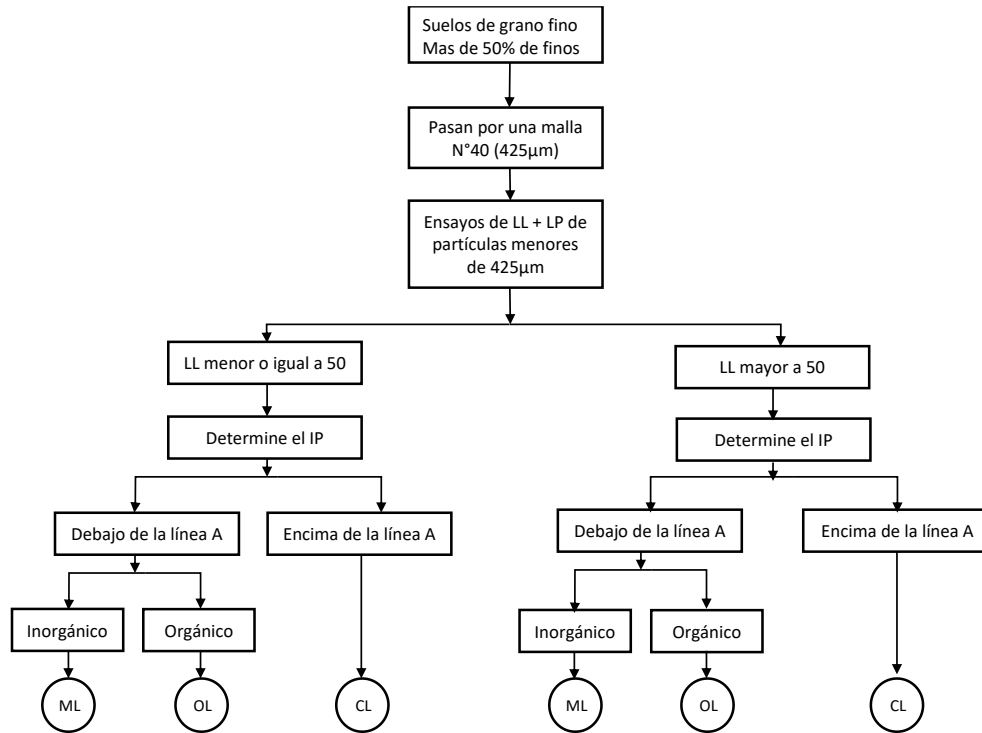


Figura 12: Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (definición de los principales grupos de suelos de grano fino)

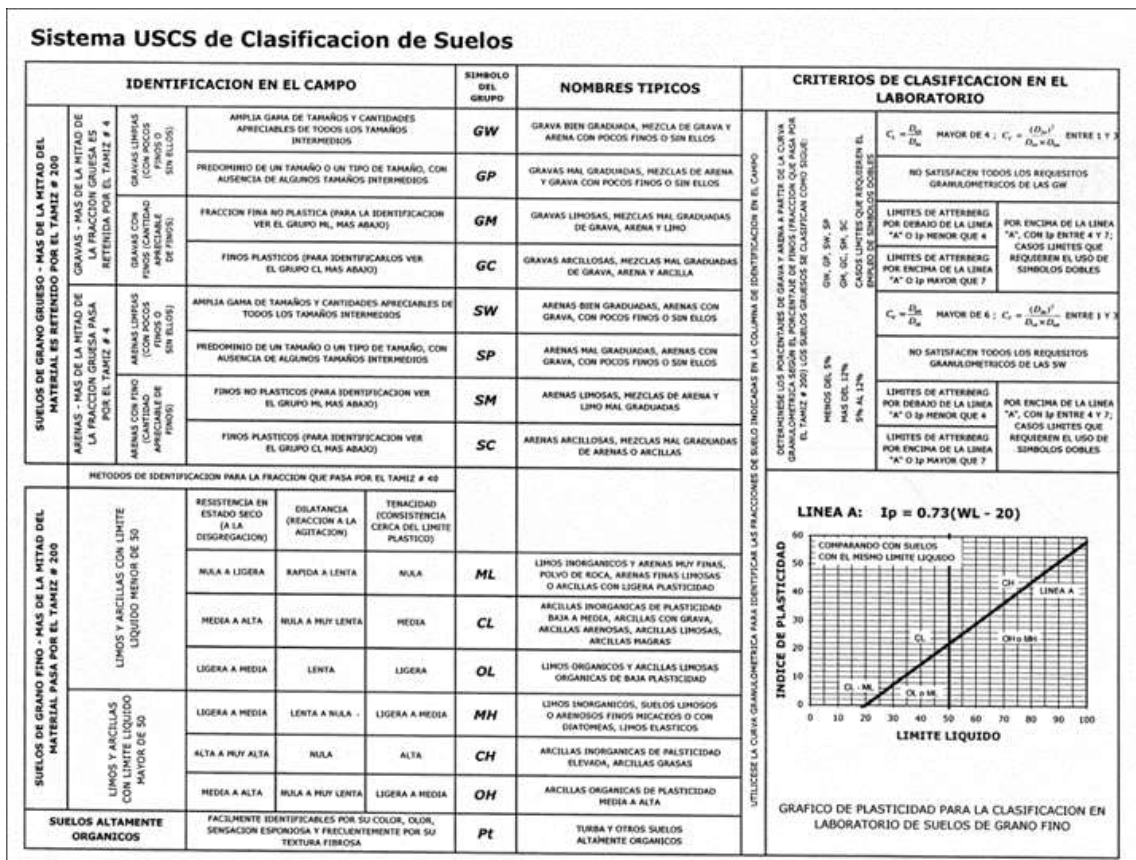


Figura 13: Gráfico de plasticidad para la clasificación en laboratorio de suelos de grano fino

#### 4.4. Índice de fluidez

Una arcilla muy seca presenta una consistencia dura, y un aspecto en forma de terrón. Esa misma arcilla muy húmeda muestra en cambio una consistencia muy blanda: resulta obvio que la consistencia de la arcilla disminuye al aumentar la humedad. Con el fin de cuantificar el grado de consistencia se emplea un índice de fluidez ( $I_f$ ) que da idea de la relación entre la humedad del suelo en el intervalo de plasticidad, ecuación (9):

$$I_f = \frac{w-LP}{LL-LP} \quad (9)$$

Siendo:

- $I_f$  el índice de fluidez
- $w$  el contenido de humedad del suelo en situ
- $LL$  el límite líquido
- $LP$  el límite plástico

Valores de  $I_f$  negativos indican una arcilla de consistencia sólida. Si  $0 < I_f < 1$  la arcilla presenta una consistencia plástica, mientras que para  $I_f > 1$  la arcilla muestra una consistencia líquida.

## 5. LIMITE DE CONTRACCIÓN

En el estado semisólido, el proceso de decrecimiento de volumen del suelo es precisamente igual al valor de agua perdida por evaporación. Sin embargo, cuando el contenido de humedad llega a un cierto valor mínimo, la muestra deja de disminuir su volumen con la pérdida de humedad, pero el peso de la muestra continúa decreciendo. Puede decirse que en ese punto la muestra pasa de un estado semisólido a uno sólido. El límite entre los dos estados es marcado por el cambio de color de oscuro a claro y el contenido de humedad correspondiente a dicho límite "límite de contracción".

### 5.1. Instrumental

- Tamiz IRAM 425  $\mu\text{m}$  (N° 40).
- Pesa filtros de vidrio o aluminio de 40 mm de diámetro y 30 mm de altura aproximadamente
- Recipiente volumétrico de vidrio para medir la cantidad de volumen que ocupa el suelo
- Placa plástica con tres apoyos
- Mercurio.
- Balanza de 0.1gr. de sensibilidad
- Grasa lubricante
- Estufa para secado de muestras regulable, que asegure temperaturas de 105°C a 110°C
- Probeta graduada de 25ml y graduada cada 0,2 ml

### 5.2. Procedimiento de ensayo

Para determinar el límite de contracción (LC) se procede de la siguiente forma:

- Se humedece la muestra del suelo pasante del tamiz N° 40 hasta llegar saturarla completamente, aproximadamente 100gr.
- En suelos de alta plasticidad, la muestra de suelo debe dejarse humedeciendo por un lapso no menor a 24hs
- Pesar el pesafiltro vacío, con una exactitud de 0.1gr ( $W_3$ )
- Determinar la capacidad del molde en  $\text{cm}^3$ , llenándolo con mercurio, enrasando con la placa de tres puntas, se pesa nuevamente y se divide por la densidad del mercurio ( $\gamma_{\text{Hg}} = 13,55 \text{ gr/cm}^3$ )
- Se cubre el pesafiltro con aceite, esto se hace con el propósito de que el suelo no se pegue en las paredes de la capsula metálica y luego se pesa
- Se llena el pesafiltros con la muestra de suelo humedecida, en tres capas. Compactar cada capa dando golpes suaves sobre una superficie firme para eliminar las burbujas de aire. Luego de completar la última capa se enrasa utilizando una espátula metálica.
- Cuando se haya llenado el recipiente, se enrasa, se limpia y se pesa inmediatamente, se anota como peso del recipiente y del suelo húmedo ( $W_1$ ). Se dejará secar la masa de suelo en el aire, a temperatura ambiente, hasta que el color de la misma cambie de oscuro a claro. Luego ésta será secada en el horno a temperatura de  $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , hasta alcanzar peso constante; se pesará anotándose como peso del recipiente y del suelo seco ( $W_2$ )
- Para determinar el volumen de la muestra de suelo seca, se utiliza el desplazamiento del mercurio (ya que este metal líquido no afecta la integridad de la pastilla de suelo)
- Se coloca la pastilla de suelo en el recipiente enrasado de mercurio y se introduce con la ayuda de la placa de tres puntas. En un recipiente se recoge el mercurio desplazado por la pastilla de suelo



- El volumen de mercurio desplazado, se recoge en un recipiente y se coloca en la probeta graduada para determinar el volumen ( $V_o$ )

Observaciones: El mercurio es una sustancia tóxica, por lo tanto, se evitará el contacto con la piel. Almacenar el mercurio en contenedores sellados a prueba de roturas. Se realizarán los ensayos en ambientes bien ventilados para evitar la inhalación de vapor de mercurio. Se limpiarán los derrames rápidamente para evitar su evaporación en el ambiente. Se desecharán los materiales contaminados con mercurio, incluyendo la muestra de suelo seco ensayada.

### 5.3. Cálculo del límite de contracción

El contenido de agua del suelo en el momento en que éste fue colocado en el recipiente, expresado como un porcentaje del peso seco del suelo, se calculará de la siguiente ecuación (10) (11):

$$w(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_3} \times 100 \quad (10)$$

Siendo:

- $w$  el contenido de agua del suelo
- $W_1$  el Peso de la masa de suelo húmedo y el recipiente (gr)
- $W_2$  el peso de la masa de suelo seco y el recipiente (gr)
- $W_3$  el peso del recipiente (gr)

También puede ser calculado el contenido de agua así:

$$w(\%) = \frac{W - W_o}{W_o} \times 100 \quad (11)$$

Donde:

- $W$  es el peso húmedo de la muestra de suelo ( $W = W_1 - W_3$ )
- $W_o$  es el peso de la muestra seca ( $W_o = W_2 - W_3$ )

Se calculará el contenido de agua con una aproximación de 0.1 (en el porcentaje).

El límite de contracción de un suelo se define como el contenido mínimo de agua, por debajo del cual una reducción de la cantidad de agua no causará una disminución de volumen de la muestra de suelo, pero al cual un aumento en el contenido de agua causará un aumento en el volumen de la masa de suelo. El límite de contracción (LC) será calculado de los datos obtenidos en la determinación de la contracción volumétrica, de la siguiente ecuación (12):

$$LC = w - 100 \times (V - V_o) \times \frac{\gamma_a}{W_o} \quad (12)$$

Donde:

- LC es el límite de contracción (%)
- $w$  es el contenido de agua (%)
- $V$  es el volumen de la muestra de suelo húmedo ( $\text{cm}^3$ )
- $V_o$  es el volumen de la muestra de suelo secada al horno ( $\text{cm}^3$ )
- $W_o$  es el peso de la muestra seca ( $W_o = W_2 - W_3$ ) (gr)
- $\gamma_a$  es el peso unitario del agua ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

El límite de contracción se calculará con una aproximación de 0.01 en el porcentaje.

Valores de referencia

- Suelos con L.C. menor a 5%; suelos buenos.
- Suelos con L.C. entre 5% y 10%; suelos regulares.
- Suelos con L.C. entre 10% y 15%; suelos pobres.
- Suelos con L.C. mayor 15%; suelos muy pobres.

## 6. COMPACTACIÓN DE SUELOS (PROCTOR).

---

### 6.1. Objetivo

Este ensayo, basado en la norma VN – E5 – 93 describe el procedimiento a seguir para estudiar las variaciones del peso unitario de un suelo en función de los contenidos de humedad, cuando se lo somete a un determinado esfuerzo de compactación. Permite establecer la humedad óptima con la que se obtiene el mayor valor del peso unitario, llamado Densidad seca máxima.

### 6.2. Instrumental

- Moldes cilíndricos de acero para compactación con tratamiento superficial para que resulten inoxidable (Cincado, cadmiado, etc.) de las características y dimensiones indicadas en la Figura 14
- Pisones de compactación, de acero tratado superficialmente, con las características y dimensiones que se dan en la Figura 14
- Aparato mecánico de compactación que permita regular el peso, la altura de caída del pisón y el desplazamiento angular del molde o pisón (opcional)
- Balanza de precisión, de 1 Kg. de capacidad con sensibilidad de 0,01 gramo
- Balanza tipo Roberval de por lo menos 20 Kg. de capacidad, con sensibilidad de 5 gramos
- Dispositivo para extraer el material compactado del interior del molde (opcional)
- Cuchilla de acero o espátula rígida, cuya hoja tenga por lo menos 20 cm de longitud
- Pesa filtros de vidrio o aluminio de 40 mm. de diámetro y 30 mm. de altura
- Tamiz IRAM 19 mm. (3/4")
- Tamiz IRAM 4,75 mm. (N° 4)
- Dispositivo para pulverizar agua
- Bandeja de hierro galvanizado de 660 x 400 x 100 mm
- Bandeja de hierro galvanizado de 150 x 50 mm
- Espátula de acero, de forma rectangular, con las características indicadas en la Figura 14
- Elementos de uso corriente en laboratorio: estufas, probetas graduadas, cucharas, etc

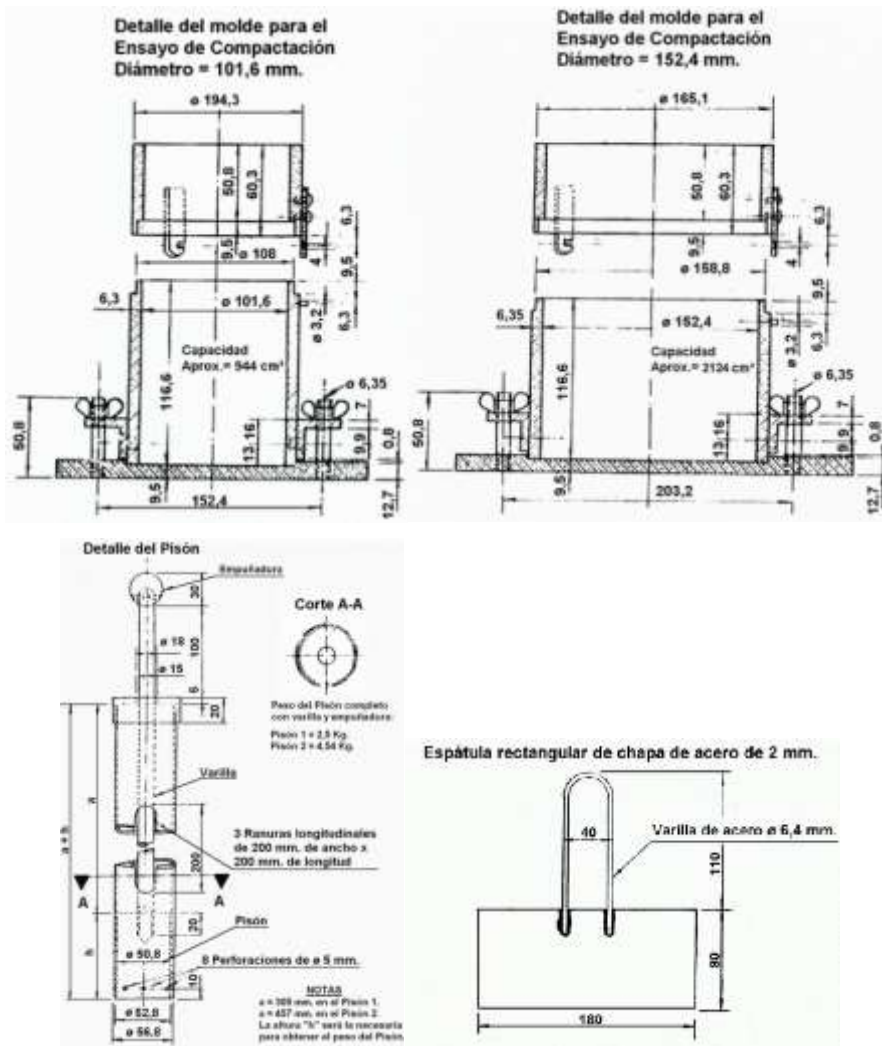


Figura 14: Detalle del molde y pisón para el ensayo de compactación (Fuente: DNV)

### 6.3. Procedimiento de ensayo

De acuerdo con las características del material a ensayar se presentan dos casos: el material fino y el material granular.

#### a) Material fino

Si se trata de suelo que pasa totalmente por el tamiz IRAM 4,8 mm. (Nº 4), se opera con todo el material librado por dicho tamiz. Si la cantidad de material que queda retenida en ese tamiz es pequeña, igual o menor de 5 %, puede incorporarse a la muestra realizándose el ensayo con el total del suelo.

Preparación de la muestra:

- Para cada punto de la curva Humedad-densidad se requieren aproximadamente 2500 gr de material seco. Si se trata de suelo no muy plástico y sin partículas quebradizas puede usarse la misma muestra para todo el ensayo
- Se prepara material suficiente para seis puntos. El ensayo normal requiere cinco puntos, tres en la rama ascendente y dos en la descendente de la curva Humedad-Densidad, pero eventualmente puede requerirse un sexto punto

- La porción de suelo destinada a un punto se distribuye uniformemente en el fondo de la bandeja de hierro galvanizado. Con la ayuda del dispositivo para pulverizar agua, se agrega el agua prevista para tal punto y con la espátula rectangular de acero se homogeniza bien
- Si el material a ensayar presenta dificultades para la homogeneización del agua incorporada, se preparan las seis porciones con contenidos de humedad crecientes, de dos en dos unidades aproximadamente. Se mezclan los más homogéneamente posible y se dejan en ambiente húmedo durante 24 horas

Compactación de la probeta

- Se opera con el molde de 101,6 mm. de diámetro. La energía de compactación quedará determinada por el tipo de pisón, cantidad de capas y número de golpes por capa. A continuación, Tabla 3, se dan las características de los distintos tipos de ensayos de compactación a realizar:

Ensayo	Molde (mm)	Peso pisón (Kg)	Altura de caída (cm)	Nº de capas	Nº de golpes
I	101.6	2.5	30.5	3	25
II	101.6	4.53	45.7	5	25
III	101.6	2.5	30.5	3	35

Tabla 3: Datos para ensayo de compactación de suelos finos

- Se verifican las constantes del molde: Peso del molde (Pm) (sin collar pero con base) y su volumen interior (V).
- Cuando se considere que la humedad está uniformemente distribuida se arma el molde y se lo apoya sobre una base firme. Con una cuchara de almacenero, o cualquier otro elemento adecuado, se coloca dentro del molde una cantidad de material suelto que alcance una altura un poco mayor del tercio o del quinto de la altura del molde con el collar de extensión, si se han de colocar tres o cinco capas respectivamente.
- Con el pisón especificado (2,5 Kg ó 4,53 Kg) se aplica el número de golpes previstos (25, 35, 56, etc.) uniformemente distribuidos sobre la superficie del suelo. Para esto debe cuidarse que la camisa guía del pisón apoye siempre sobre la cara interior del molde, se mantenga bien vertical y se la desplace después de cada golpe de manera tal, que al término del número de golpes a aplicar, se haya recorrido varias veces la superficie total del suelo.
- Se repite la operación indicada en el párrafo anterior las veces que sea necesaria para completar la cantidad de capas previstas, poniendo en tal caso, la cantidad de suelo necesaria para que, al terminar de compactar la última capa, el molde cilíndrico quede lleno y con un ligero exceso, 5 a 10 mm. En caso contrario, debe repetirse íntegramente el proceso de compactación.
- Se retira con cuidado el collar de extensión. Con una espátula metálica, se limpia el exceso de material. Se limpia exteriormente el molde con un pincel y se pesa (Ph).
- Se saca la probeta del molde, con el extractor de probetas, si se dispone de él, o mediante la cuchilla o espátula. Se toma una porción de suelo que sea promedio de todas las capas, se coloca en un pesafiltro y se pesa. Se seca en estufa a 100-105º C, hasta peso constante, para efectuar la determinación de humedad.
- Se repiten las operaciones indicadas en los párrafos anteriores, (c) a (g), con cada una de las porciones de muestra preparadas para los otros puntos. Si se opera con una sola porción, estas operaciones se repiten luego de haber desmenuzado cuidadosamente el material sobrante e incorporado un 2% de agua más, aproximadamente, para cada uno de los puntos a determinar.

- Se da por finalizado el ensayo cuando se tiene la certeza de tener dos puntos de descenso en la curva Humedad-Densidad.

**b) Material granular**

Corresponde a suelos que cumplan con las siguientes características granulométricas: Si la porción retenida por el tamiz IRAM 4,8 mm. (Nº 4), es apreciablemente mayor del 5 %, se opera como si se tratara de material granular. En este caso, se pasa la muestra representativa por el tamiz IRAM 19 mm. (3/4”), debiendo realizarse el ensayo únicamente con la fracción librada por este tamiz.

Preparación de la muestra:

- Para cada punto de la curva Humedad - Densidad, se requieren alrededor de 6000 gramos de material seco.
- Igual que en el caso de suelos finos, se requieren 5 puntos y se prevé la eventualidad de un 6º punto. Por lo tanto, se preparan 36 Kg. de material y por cuidadoso cuarteo se lo divide en seis porciones para otros tantos puntos

**Compactación de la probeta**

- Se opera con el molde de 152,4 mm de diámetro. Previa verificación de sus constantes, se lo coloca sobre una base firme y se realizan las operaciones indicadas en los párrafos (c) a (i) del título anterior (6.3.1.1), con la salvedad de que: Los huecos que quedan al ser arrancadas las piedras emergentes, al enrasar la cara superior de la probeta, deben ser rellenados con material fino y compactados con una espátula rígida. La humedad de cada punto se determina de acuerdo al párrafo (g), sobre una cantidad de material no menor de 1000 gramos y secándolo en bandeja. En la tabla 4, se dan las características de los distintos tipos de ensayo de compactación a realizar:

Ensayo	Molde (mm)	Peso pisón (Kg)	Altura de caída (cm)	Nº de capas	Nº de golpes
IV	152.4	2.5	30.5	3	56
V	152.4	4.53	45.7	5	56

Tabla 4: Datos para ensayo de compactación de suelos finos

**6.4. Cálculos y resultados**

Para cada contenido de humedad de la probeta, determinado en la forma indicada en los párrafos precedentes, se calculan:

- a. La densidad húmeda (Dh) del suelo compactado, aplicando la ecuación (13):

$$D_h = \frac{P_h - P_m}{V} \quad (13)$$

Donde:

- P<sub>h</sub> es el peso del molde con el material compactado húmedo
- P<sub>m</sub> es el peso del molde
- V es el volumen interior del molde

- b. La densidad seca ( $D_s$ ), que se obtiene mediante la ecuación (14):

$$D_s = \frac{D_h \times 100}{100 + H} \quad (14)$$

Siendo:

- $D_h$  la densidad húmeda
- $H$  la humedad, en %, del material compactado

### 6.5. Trazado de la curva humedad densidad

- En un sistema de ejes rectangulares se llevan en abscisas, los valores de la humedad porcentual, y en ordenadas los de la densidad seca.
- Los puntos así obtenidos se unen por un trazo continuo, obteniéndose de este modo una curva que va ascendiendo con respecto a la densidad, pasa por un máximo y luego desciende.
- El punto máximo de la curva así obtenida indica, en ordenadas, la densidad máxima ( $D_s$ ) que puede lograrse con la energía de compactación empleada y en abscisas la humedad óptima ( $H$ ) que se requiere para alcanzar aquella densidad.

### 6.6. Planillas y curvas

- a. La marcha del ensayo se lleva anotada en una planilla similar al modelo que se adjunta, Figura 15.
- b. El trazado de la curva Humedad-Densidad se realiza en el cuadrículado que se encuentra al pie de la planilla, adoptando las escalas que sean más convenientes en cada caso, Figura 16.

ENSAYO DE COMPACTACION.....Capas.....Golpes.....Pisón.....  
 N° de muestra.....Ruta.....  
 N° de análisis.....Tramo.....  
 N° de orden.....Progresiva.....

Punto N°	% Aproximado de Agua	Peso del Cilindro + Suelo Húmedo	Tara del Cilindro	Peso Suelo Húmedo	Volumen del Cilindro	PESO ESPECÍFICO APARENTE	
						Húmedo (a)	Seco <sup>(1)</sup>
Punto N°	Pesa Filtro N°	Pesa Filtro + Suelo Húmedo	Pesa Filtro + Suelo Seco	Tara del Pesa Filtro	Agua	Suelo Seco	% de Humedad (b)

$$^{(1)} = \frac{100 \times (a)}{100 + (b)}$$

Figura 15: Planilla para datos de ensayo de compactación

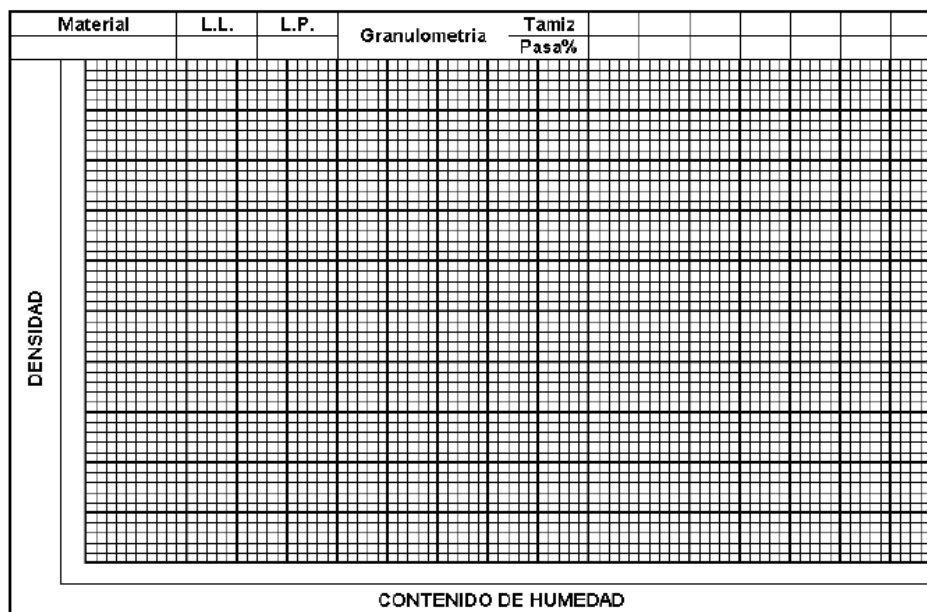


Figura 16: Área de trazado de la curva Humedad-Densidad

### 6.7. Incidencia del material grueso

Si el peso del material retenido por el tamiz IRAM 19 mm (3/4") es menor del 15% del peso total de la muestra, será necesario determinar la incidencia del material de tamaño mayor que este último tamiz, utilizando las ecuaciones que se indican a continuación:

- a. Humedad óptima corregida, ecuación (15).

$$H_c = \frac{(G \times H_a) + (F \times H)}{100} \quad (15)$$

Siendo:

- $H_c$  la humedad óptima corregida
- $G$  el porcentaje de material retenido por el tamiz IRAM 19 mm. (3/4")
- $H_a$  el porcentaje de humedad absorbida por el material, en condición de saturado y a superficie seca, retenido por el tamiz IRAM 19 mm. (3/4")
- $F$  el porcentaje de material que pasa por el tamiz IRAM 19 mm. (3/4")
- $H$  la humedad óptima resultante para el material que pasa por el tamiz IRAM 19 mm (3/4"), expresada en por ciento.

- b. Densidad máxima corregida, Se la obtiene reemplazando valores en la siguiente ecuación (16):

$$D_{mc} = \frac{100}{\frac{G}{d_g} + \frac{F}{d_s}} \quad (16)$$

Siendo:

- $D_{mc}$  la densidad máxima corregida
- $G$  el porcentaje de material retenido por el tamiz IRAM 19 mm. (3/4")
- $F$  el porcentaje de material que pasa el tamiz IRAM 19 mm. (3/4")
- $d_g$  el peso específico del material, en condición de saturado y a superficie seca, retenido en el tamiz IRAM 19 mm.(3/4")



- $D_s$  la densidad seca máxima obtenida en el ensayo de compactación ejecutado con el material librado por el tamiz IRAM 19 mm. (3/4")