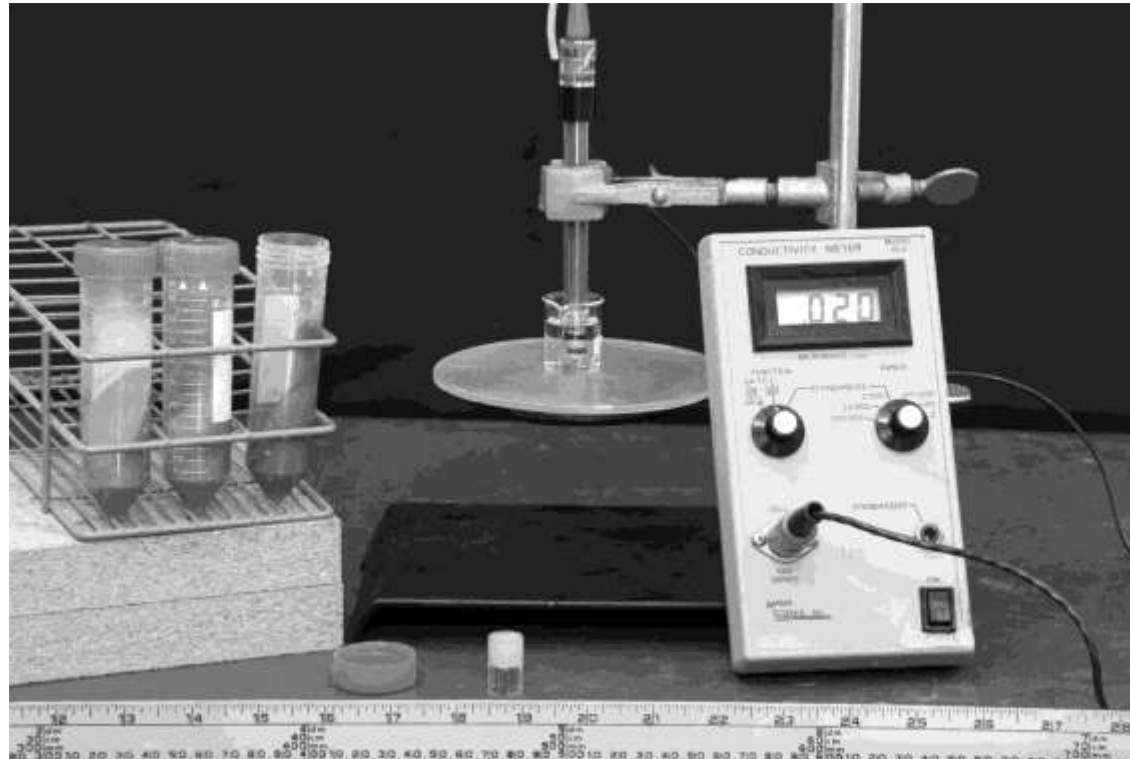


Clase de laboratorio 01: propiedades físicas



Mecánica de Suelos y Geología

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

Índice



- Ámbito de laboratorio
- Ensayos
 - Inspección tacto-visual
 - Gravedad específica
 - Humedad gravimétrica
 - Pesos unitarios
 - Densidad máxima y mínima
 - Análisis granulométrico
 - Hidrometría
 - Límites de Atterberg

Ámbito de laboratorio



- **¿Qué es un laboratorio?**
- Es un ámbito de trabajo capacitado para la recepción, análisis y almacenamiento de muestras de diferente naturaleza, con sectores de trabajo delimitados.
- Debe asegurarse de que las condiciones ambientales no invaliden los resultados ni comprometan la calidad requerida de las mediciones.
- Debe controlarse el acceso y el uso de las áreas que afectan a la calidad de los ensayos.
- Debe tener personal calificado.
- Debe contar con procedimientos de trabajo.

Ámbito de laboratorio



- **Instalaciones mínimas**
- Podemos subdividir los sectores del laboratorio en:
 - sectores secos
 - sectores húmedos
 - sectores con control higrotérmico
 - sectores sensibles a ruidos o vibraciones
 - sectores de almacenamiento
 - sectores de residuos
 - otros..

Ámbito de laboratorio



- **Equipamiento e instrumental**
- Acorde con el alcance del laboratorio.
- Deben ser utilizados por personal calificado.
- Verificar su correcto funcionamiento o calibración antes de uso.
- Establecer período de calibración, en función del uso.

INSPECCIÓN TÉCNICA DE LABORATORIOS				
Fecha de visita				
Empresa inspeccionada				
Dirección				
Evaluadores				
Representante empresa				
0 - INSTALACIONES DEL LABORATORIO				
Se visitó el laboratorio en la fecha indicada, corroborando la existencia del establecimiento.				
1 - DISPOSICIÓN DE AMBIENTES DE TRABAJO				
	SI	NO		
¿ Cuenta el laboratorio con matafuegos en los sectores de trabajo ?				
¿ Cuenta el laboratorio con adecuada iluminación ?				
¿ Cuenta el laboratorio con ambientes secos y húmedos separados ?				
¿ Cuenta el laboratorio con ambientes con temperatura controlada ?				
¿ Cuenta el laboratorio con líneas de presión, vacío y agua ?				
2 - TRAZABILIDAD				
	SI	NO		
¿ Identifica el ingreso del material por escrito ?				
¿ Cuenta el laboratorio con espacio destinado a recepción de muestras ?				
¿ Se conservan registros de las planillas de campo ?				
¿ Las muestras a ensayar se ubican en sectores con T ^o controlada ?				
¿ Se conservan los registros de los ensayos efectuados ?				
¿ Hay un procedimiento para el control de calidad de resultados ?				
¿ Se almacenan algunas muestras como registro del trabajo efectuado ?				
3 - EQUIPAMIENTO PARA ENSAYOS DE RUTINA				
¿ Entregó inventario de equipos e insumos ?				
	DIARIA	ANUAL	EXTERNA	NO
Hornos				
Balanzas				
Flexímetros				
Aros				
Cascador				
Tamices				
Pesas				
Manómetros				
Termómetros				

Ensayos



- Los ensayos de caracterización física de un material son indispensables en cualquier proyecto de investigación, como así también los ensayos de caracterización hidráulica, mecánica, química, etc.
- A continuación se presentan los ensayos de laboratorio rutinarios para caracterización física de suelos con fines geotécnicos (existen otros).
- Conocer la metodología de ejecución de los ensayos nos permite conocer que cantidad de material necesito, como debe venir la muestra del campo al laboratorio, cuanto demora el trabajo en laboratorio y que dispersión de resultados se obtiene en la medición.



Inspección tacto-visual

- Definición: descripción cualitativa de la muestra de suelo con propósitos ingenieriles.
- Ensayo: i) tomar una muestra de suelo, ii) observarla a la vista o con lupa o con microscopio, tocarla, sentir la textura, mojar con agua, tratar de romper un bloque, etc..

TABLE 1 Criteria for Describing Angularity of Coarse-Grained Particles (see Fig. 3)

Description	Criteria
Angular	Particles have sharp edges and relatively plane sides with unpolished surfaces
Subangular	Particles are similar to angular description but have rounded edges
Subrounded	Particles have nearly plane sides but have well-rounded corners and edges
Rounded	Particles have smoothly curved sides and no edges

TABLE 5 Criteria for Describing Consistency

Description	Criteria
Very soft	Thumb will penetrate soil more than 1 in. (25 mm)
Soft	Thumb will penetrate soil about 1 in. (25 mm)
Firm	Thumb will indent soil about 1/4 in. (6 mm)
Hard	Thumb will not indent soil but readily indented with thumbnail
Very hard	Thumbnail will not indent soil

TABLE 6 Criteria for Describing Cementation

Description	Criteria
Weak	Crumbles or breaks with handling or little finger pressure
Moderate	Crumbles or breaks with considerable finger pressure
Strong	Will not crumble or break with finger pressure

TABLE 11 Criteria for Describing Plasticity

Description	Criteria
Nonplastic	A 1/8-in. (3-mm) thread cannot be rolled at any water content
Low	The thread can barely be rolled and the lump cannot be formed when drier than the plastic limit
Medium	The thread is easy to roll and not much time is required to reach the plastic limit. The thread cannot be rerolled after reaching the plastic limit. The lump crumbles when drier than the plastic limit
High	It takes considerable time rolling and kneading to reach the plastic limit. The thread can be rerolled several times after reaching the plastic limit. The lump can be formed without crumbling when drier than the plastic limit



Inspección tacto-visual

- Ejemplo 1: Gravas angulares con presencia de arenas y finos no plásticos, con presencia de mineral de yeso.
- Ejemplo 2: Arcilla plástica uniforme, blanda, con presencia de restos de conchillas marinas en forma errática.
- Ejemplo 3: Limo no plástico, parcialmente cementado.





Gravedad específica

- Definición: relación entre el peso específico de las partículas sólidas (γ_s) y el peso específico del agua (γ_w).

- Expresión:
$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s/V_s}{\gamma_w}$$

- Ensayo:
$$\gamma_s = \frac{W_s}{(W_{p,w} + W_s) - W_{p,w}}$$

- Se corrige por temperatura
$$G_s = G_{sT} \frac{\gamma_{wT}}{\gamma_{w20^\circ}}$$

- Tamaño de muestra 30 – 100gr.



Balanza +/- 0.01gr

Gravedad específica



- Valores típicos G_s (rango de variación pequeño), requiere mucha precisión el ensayo.
- Es una propiedad intrínseca del material, no cambia.
- Se limita el ensayo a suelo pasante #4 (otra técnica para suelos gruesos)

Soils in general*	2.65 to 2.85	K-Feldspars**	2.54 to 2.57
Average for clays	2.72	Montmorillonite***	2.35 to 2.7
Average for sands	2.67	Illite***	2.6 to 3.0
Organic clay	~2.0	Kaolinite***	2.6 to 2.68
Peat****	1.0 or less	Biotite**	2.8 to 3.2
Quartz**	2.65	Haematite****	5.2

*Lambe, 1951.

**Lambe and Whitman, 1969.

***Mitchell, 1993.

****Head, 1980.

Humedad gravimétrica



- Definición: relación entre el peso de agua (W_w) y el peso seco de las partículas sólidas (W_s).
- Expresión: $w = \frac{W_w}{W_s}$
- Ensayo: $w = \frac{W_{T+S+w} - W_{T+S}}{W_{T+S} - W_T}$
- Secado en horno 110 +/- 5°C.
- El tiempo de secado puede variar según tipo de muestra (arenas limpias 4hs, suelos finos >16hr).



Horno de secado y recipientes (pesafiltros)



Humedad gravimétrica

- NO HAY valores típicos de w , amplio rango de variación.
- La precisión buscada y tipo de material definen la cantidad de suelo a ensayar (grs o kilos).



Maximum particle size (100 % passing)	Standard Sieve Size	Recommended minimum mass of moist test specimen for water content reported to 0.1 %	Recommended minimum mass of moist test specimen for water content reported to 1 %
2 mm or less	No. 10	20 g	20 g ^A
4.75 mm	No. 4	100 g	20 g ^A
9.5 mm	3/8-in.	500 g	50 g
19.0 mm	3/4-in.	2.5 kg	250 g
37.5 mm	1 1/2 in.	10 kg	1 kg
75.0 mm	3-in.	50 kg	5 kg

(ASTM D2216 – moisture content)



Humedad gravimétrica

- Si seco a mayor temperatura, sale más agua pero no estoy midiendo w bajo norma.
- Agua adsorbida ($>400^{\circ}\text{C}$), agua intermedia ($150-200^{\circ}\text{C}$) y agua poral (110°C).

- Hydroxyl or bound water. This water forms a part of the octahedral layer and cannot be removed by heating at temperatures below 400°C for most clay minerals.
- Interlayer water. This is double-layer water which occurs between clay mineral surfaces in some clays. It is gradually removed by heating up to $150-200^{\circ}\text{C}$.
- Pore water. This water occurs in the open spaces between grains and also constitutes the more tightly bound double-layer water on grain surfaces. This water is essentially removed by drying at room temperatures and completely removed by heating at approximately 100°C .



Esto define la
humedad
natural

(FHWA. Expansive soils in highway subgrades)



Peso unitario húmedo

- Definición: relación entre el peso húmedo de la muestra de suelo (W_T) y su volumen total (V_T).
- Expresión: $\gamma = \frac{W_T}{V_T}$
- Ensayo: $\gamma = \frac{W_{T+S+w} - W_T}{V_T}$
- W_{T+S+w} , $W_T \rightarrow$ horno y balanza
- $V_T \rightarrow$ calibre
- Si la muestra viene alterada o disturbada, no puedo medir γ .
- NO es una propiedad intrínseca del material, cambia.



Muestra de arcilla plástica (CH) del Postpampeano extraída con sacatestigo de reducida alteración



Peso unitario húmedo

- Amplio rango de variación.
- NO es una propiedad intrínseca del material.
- $\gamma_{sat} > \gamma$, siempre
- Valores típicos (Zárate-Campana, margen derecha Río Paraná):

$$- \gamma_{CH_Pospamp} = 15 - 17 \frac{kN}{m^3}$$

$$- \gamma_{ML_Pamp} = 18 - 20 \frac{kN}{m^3}$$

$$- \gamma_{SP_Puelche} = 20 - 22 \frac{kN}{m^3}$$

Soil Type	1 Unit Weight Saturated, γ_{sat}/γ_w	
	Min.	Max.

EPRI Manual (Hough 1969)

Peso unitario seco



- Definición: relación entre el peso seco de la muestra de suelo (W_S) y su volumen total (V_T).
- Expresión: $\gamma_d = \frac{W_S}{V_T}$
- Ensayo: $\gamma_d = \frac{W_{T+S} - W_T}{V_T}$
- $W_{T+S}, W_T \rightarrow$ horno y balanza
- $V_T \rightarrow$ calibre
- Si previamente medí γ y $\omega \rightarrow \gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega}$ (es la práctica habitual en una rutina de laboratorio)
- NO es una propiedad intrínseca del material, cambia.
- $\gamma_{sat} > \gamma > \gamma_d$, siempre

Densidad relativa

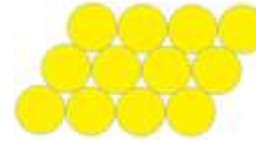


- Definición: estado de densidad actual (e_0) de un suelo relativo a su estado mas suelto ($e_{m\acute{a}x}$) y mas denso ($e_{m\acute{i}n}$).
- Expresi3n:
$$D_r = \frac{e_{m\acute{a}x} - e_0}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}}$$
- Ensayo: se requieren 3 determinaciones
- $e_0 = \frac{V_V}{V_S} = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \rightarrow$ relaci3n de vacíos actual
- $e_{m\acute{a}x} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{d_{m\acute{i}n}}} - 1 \rightarrow$ relaci3n de vacíos m\acute{a}xima
- $e_{m\acute{i}n} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{d_{m\acute{a}x}}} - 1 \rightarrow$ relaci3n de vacíos m\acute{i}nima
- NO es una propiedad intr\acute{i}nseca del material, cambia.
- Mas representativo para caracterizar suelos gruesos.



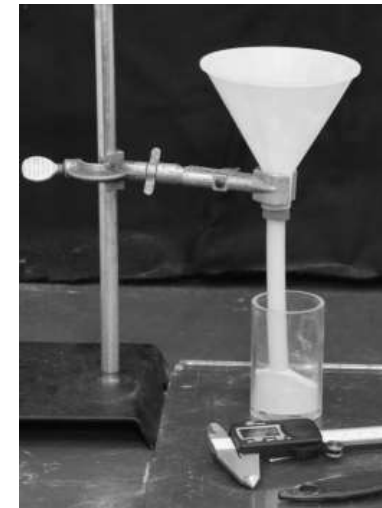
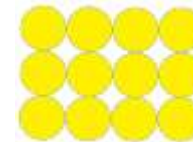
Densidad relativa

- $e_0 \rightarrow$ medición en campo
- $e_{m\acute{a}x}$, $e_{m\acute{i}n} \rightarrow$ medición en lab
- $\gamma_{d_{m\acute{a}x}} = \frac{W_S}{V_{T_{m\acute{i}n}}}$ \rightarrow mesa vibratoria
- $\gamma_{d_{m\acute{i}n}} = \frac{W_S}{V_{T_{m\acute{a}x}}}$ \rightarrow vertido controlado



Determinación $e_{m\acute{i}n}$ (mesa vibratoria)

Relative Density	D_r (%)
very loose	0 to 15
loose	15 to 35
medium	35 to 65
dense	65 to 85
very dense	85 to 100



Determinación $e_{m\acute{a}x}$ (vertido controlado)

Densidad relativa



- Depende del tamaño y forma de los granos
- Difícil densificar suelos en campo a $D_r > 85\%$

Soil Type	e_{\max}	ρ_{\min} (g/cm ³)	e_{\min}	ρ_{\max} (g/cm ³)
Processed Manchester Fine Sand*	0.909	1.408	0.580	1.701
2010 Industrial Quartz**	0.955	1.355	0.640	1.616
Ticino Sand***	0.930	1.380	0.570	1.700

*After Andersen, 1991; values determined using D4253 and D4254.

**After Sinfield, 1997; e_{\min}/ρ_{\max} determined using vibrating table and surcharge, methods for determining e_{\max}/ρ_{\min} unknown.

***As appearing in Larson, 1992 (from Franco, 1989); methods unknown.

(Germaine J. 2009)

$$(\gamma_s = 2.68 \text{ gr/cm}^3)$$



Análisis granulométrico

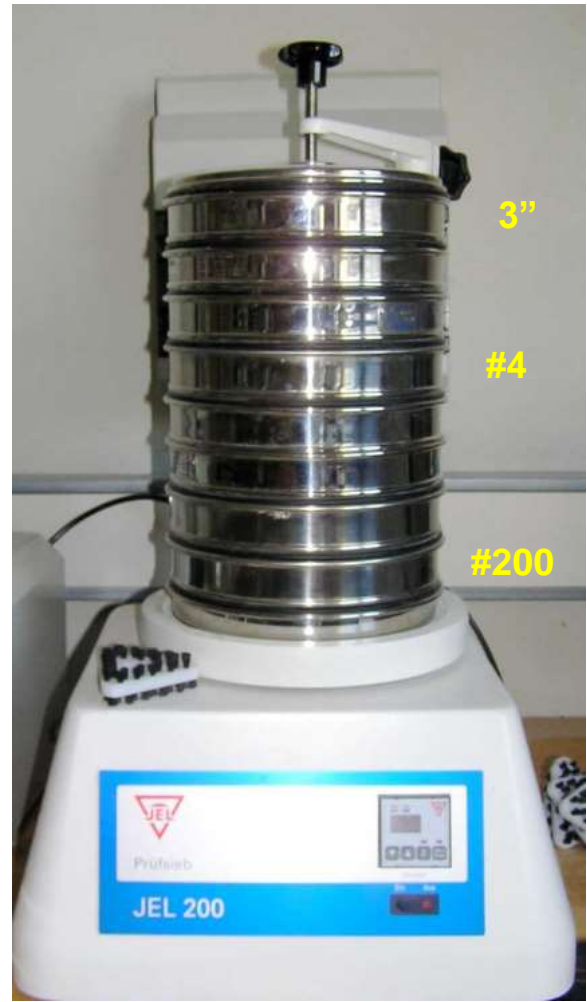
- Definición: Distribución de tamaño partículas en la muestra de suelo.
- Necesario para conocer USCS.
- Ensayo: i) conocer W_s de la muestra ensayada, ii) aplicar solución de dispersante y reposo 24hs, iii) efectuar tamizado.
- Cantidad mínima de tamices: 6 a 8

3-in. (75-mm)	No. 10 (2.00-mm)
2-in. (50-mm)	No. 20 (850- μ m)
1½-in. (37.5-mm)	No. 40 (425- μ m)
1-in. (25.0-mm)	No. 60 (250- μ m)
¾-in. (19.0-mm)	No. 140 (106- μ m)
⅜-in. (9.5-mm)	No. 200 (75- μ m)
No. 4 (4.75-mm)	

(ASTM D422 – sieve analysis – serie de tamices)



Dispersante (hexametafosfato de sodio)

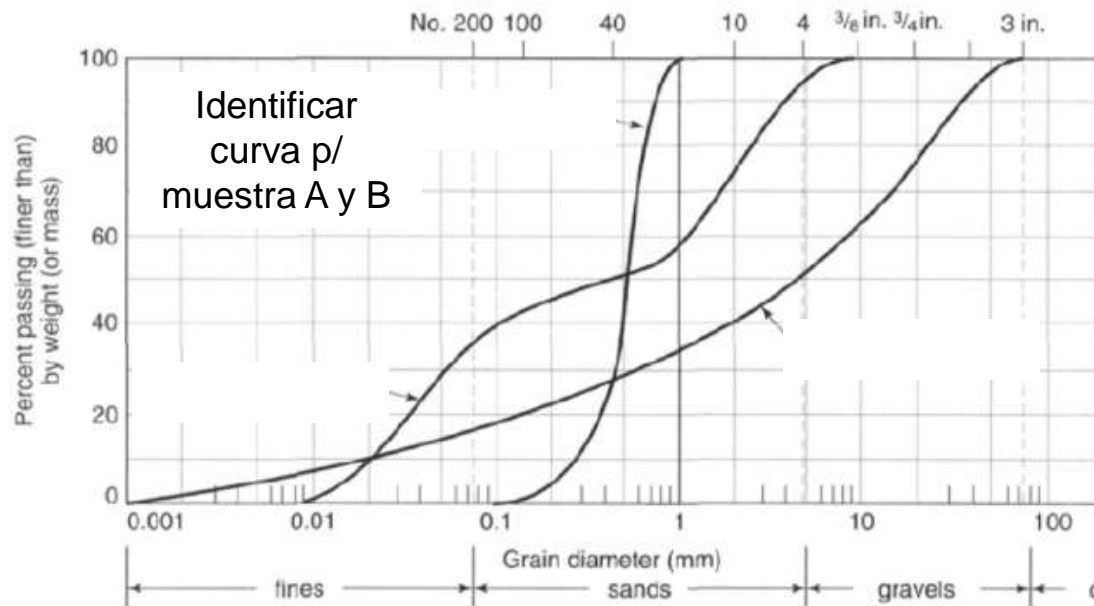


Agitador mecánico



Análisis granulométrico

- La cantidad de muestra a ensayar depende del tamaño máximo de partícula.
- Permite graduar tamaños de hasta $75\mu m = 0.075mm$
- Graduación de tamaños $> 75\mu m \rightarrow$ hidrometría



Muestra A



Muestra B



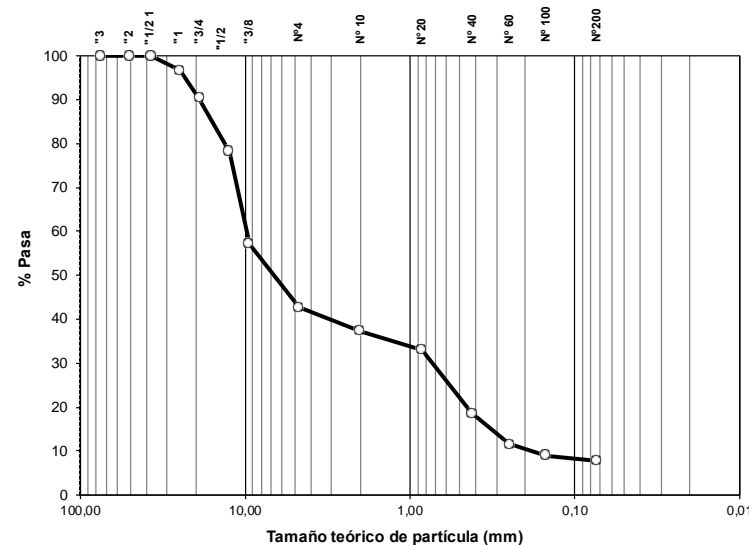
Análisis granulométrico



1º Retenido por cada tamiz (previo secado a horno)

CRIBAS & TAMICES		RET.	RET. AC.	PASANTE	
nro	(mm)	(gr)	(gr)	(gr)	(%)
3"	75,00	0	0	3244	100
2"	50,00	0	0	3244	100
1 1/2"	37,50	0	0	3244	100
1"	25,00	107	107	3137	97
3/4"	19,00	203	310	2934	90
1/2"	12,50	395	705	2539	78
3/8"	9,50	684	1389	1855	57
Nº4	4,75	471	1860	1384	43
Nº10	2,00	171	2032	1212	37
Nº20	0,85	140	2171	1073	33
Nº40	0,42	470	2642	602	19
Nº60	0,25	228	2869	375	12
Nº100	0,15	83	2952	292	9
Nº200	0,074	39	2991	253	8

2º Planilla típica de laboratorio (posterior al secado a horno)



D ₆₀	D ₃₀	D ₁₀	C _u	C _c
9,90	0,76	0,19	52,3	0,3
CLASIFICACIÓN USCS			GP-GM	
Tamaño de muestra: 3244 gr				
Preparac: Pasada por mortero				
Agente dispersante durante 24 hs				
Gravas (G) :	57,3%	LL	13	
Arenas (S) :	34,8%	LP	S/D	
Finos (C+M):	7,8%			

3º Confección curva granulométrica y clasificación USCS



Hidrometría

- Definición: Distribución de tamaño partículas menores a $75\mu m$.
- NO es necesario para conocer USCS.
- Cantidad de suelo: 50 a 100gr
- Ensayo: i) conocer W_s de la muestra ensayada, ii) aplicar solución de dispersante y reposo 24hs, iii) agitación mecánica previa, iii) lecturas con hidrómetro 1min, 2min .. 24hr , iv) lavado #200.
- Cuantificación de %C (*arcilla*) y %M (*limo*)



Equipo de ensayo



Hidrómetro

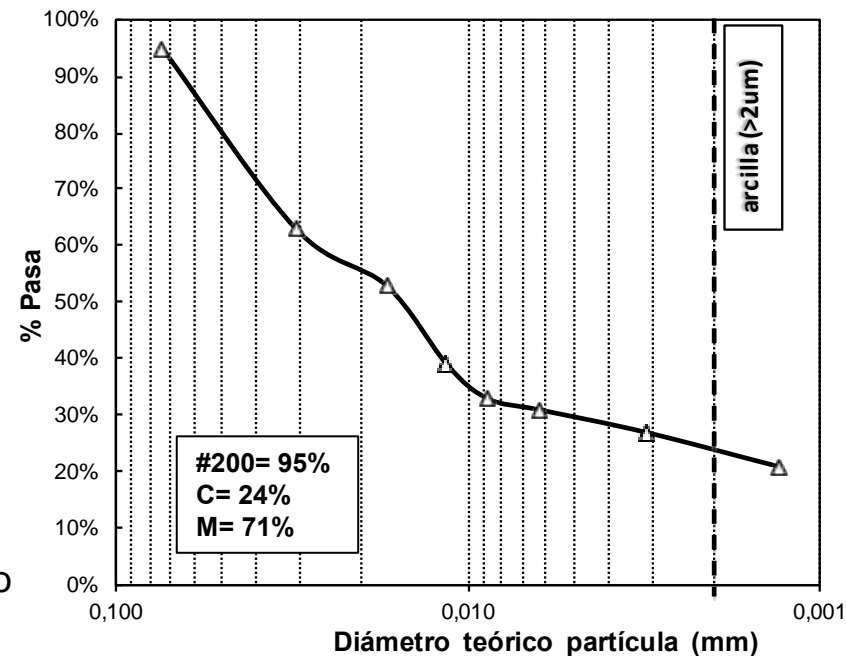
Hidrometría



Planilla de laboratorio

t	R	R'	L	D (mm)	P (%)
2 min	36	31,8	11,2	0,031	63%
5 min	31	26,8	12	0,017	53%
15 min	24	19,8	13,2	0,011	39%
30 min	21	16,8	13,7	0,009	33%
60 min	20	15,8	13,8	0,006	31%
250 min	18	13,8	14,2	0,003	27%
1440 min	15	10,8	14,7	0,001	21%

- A medida que las partículas sedimentan, el fluido pierde densidad y el hidrómetro cambia su lectura (R)
- $R' = R + C_m \pm C_t - C_d$
- $P = \frac{R' \cdot a}{W_s} \rightarrow \% \text{ pasante}$
- $D = \sqrt{\frac{18\mu}{(G_s - 1)\rho_w} \cdot \frac{L}{t}} \rightarrow \text{diámetro teórico asociado (Stokes)}$



Límites de Atterberg



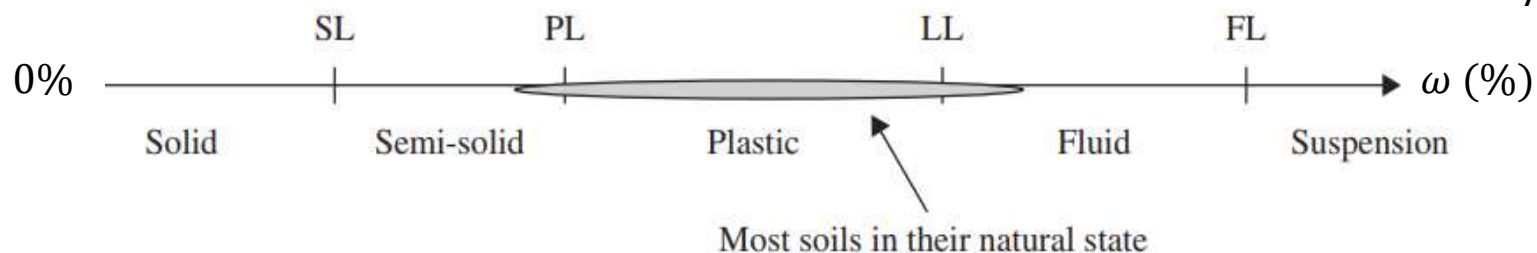
- A. Atterberg (1911) estableció 6 estados de consistencia con propósitos agronómicos.
- A. Casagrande (1932) estandarizó la obtención de 4 estados de consistencia:
 - *SL*: límite de contracción (LC)
 - *PL*: límite plástico (LP)
 - *LL*: límite líquido (LL)
 - *FL*: límite de fluidez (LF)



A. Atterberg



A. Casagrande





Límite líquido

- Definición: Contenido de agua para el cual la hendidura en el suelo cierra 13 mm al aplicar $N = 25$ golpes.
- Cantidad de suelo: 50 a 100gr
- Ensayo: i) tamizar el suelo por #40, ii) hidratar con agua destilada y reposar, iii) colocar el suelo en horizontal sobre la copa, iv) marcar la hendidura con ranurador estándar, v) determinar N y tomar muestra para contenido de humedad (ω) en zona de hendidura.
- ¿ Y si no me da $N = 25$?

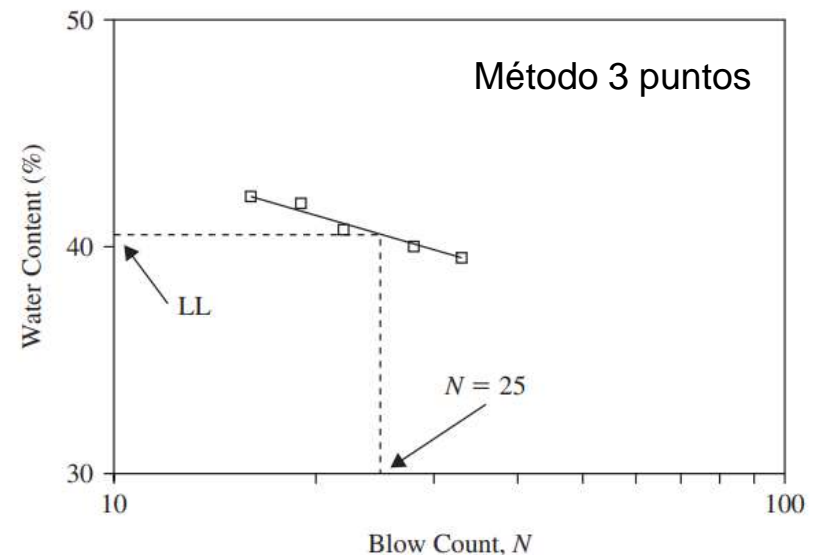




Límite líquido

- Método 3 puntos: i) se realizan no menos de 3 ensayos y se miden los valores ω y $15 < N < 35$ obtenidos, ii) se construye la curva de fluidez, iii) se determina LL .
- Método de 1 punto: i) se realiza un solo ensayo y se miden los valores ω y $20 < N < 30$ obtenidos, ii) se determina

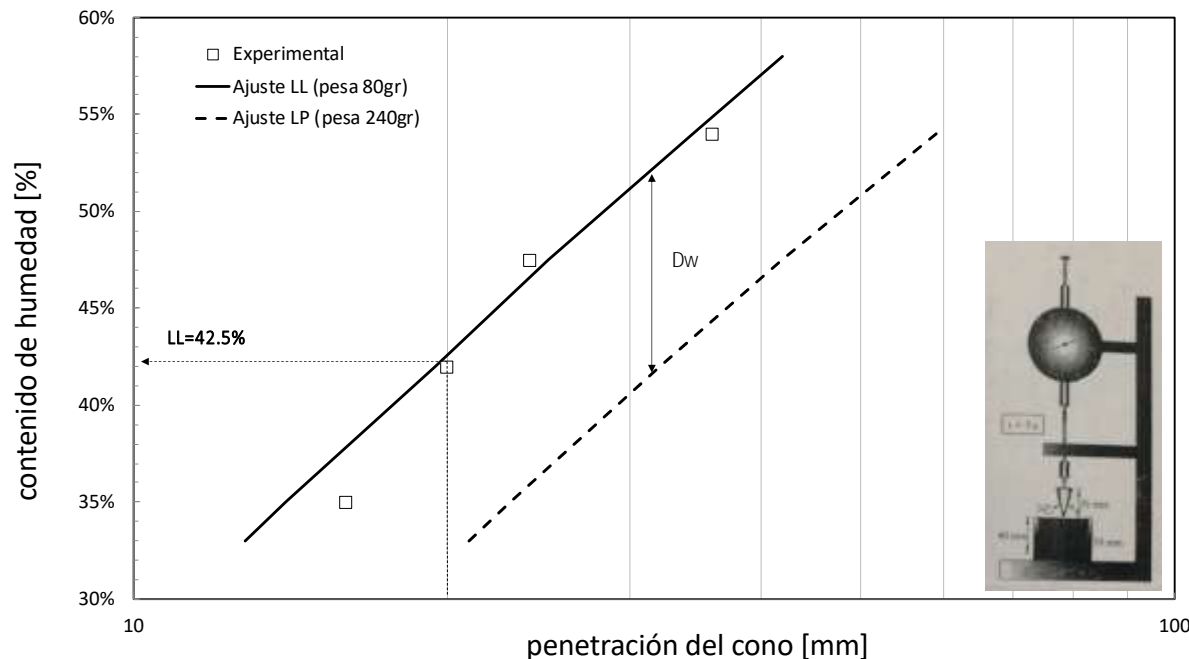
$$LL \sim \omega \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121}$$





Límite líquido y plástico con método Fall Cone (BS 1377)

- Cono de 30° con peso 80 y 240gr.
- Apoyar el cono, dejar caer por 5 segundos.
- LL → cono penetra 20mm en el suelo.
- LP → $\sim LL - 4.2 - \Delta\omega$





Límite plástico

- Definición: Contenido de agua para el cual se producen agrietamientos al enrollar el suelo en cilindros de 3.2mm
- Cantidad de suelo: aprox. 50gr
- Ensayo: i) tamizar el suelo por #40, ii) hidratar con agua destilada y reposar, iii) fabricar un bollo pequeño de suelo con las manos, iv) rolar el bollo con la palma de la mano hasta ver agrietar los cilindros, v) determinar contenido de humedad (ω) con un mínimo 6gr.
- $LP = \frac{LP_1 + LP_2 + LP_3}{3}$ se promedia



Límite líquido y plástico

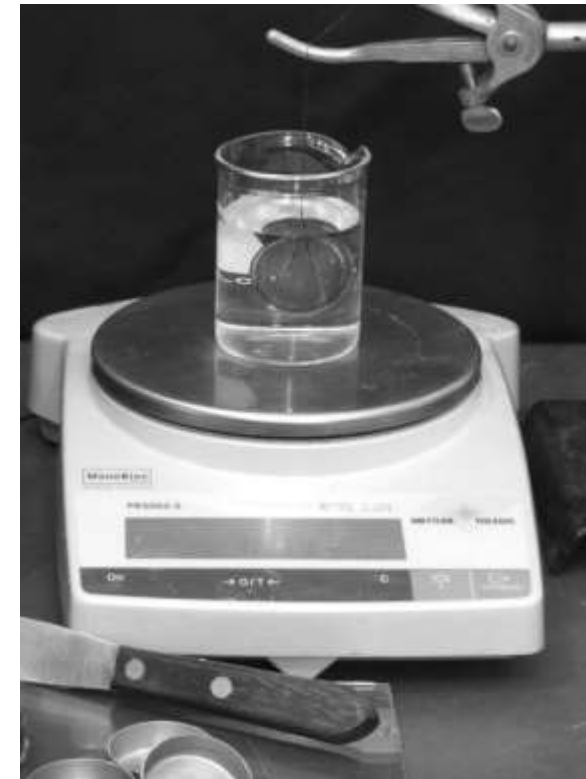


- Video ensayos: <https://www.youtube.com/watch?v=EcXJ961qjGA>
- SON una propiedad intrínseca del material, no cambian si no cambia el fluído hidratante del ensayo.
- En suelos limosos con predominio de minerales no plásticos, a veces NO se puede hacer el ensayo de LP o LL y LP. Se informa “sin determinar (SD)”.
- Valores típicos (Zárate-Campana, margen derecha Río Paraná):
 - Postpampeano (CH): $LL = 50 - 80$, $LP = 25 - 35$
 - Postpampeano (ML): $LL = 25 - 35$, $LP = 20 - 25$
 - Pampeano (ML,CL): $LL = 30 - 50$, $LP = 20 - 35$
 - Puelche (SP, SP-SM): $LL = SD$, $LP = SD$

Límite de contracción



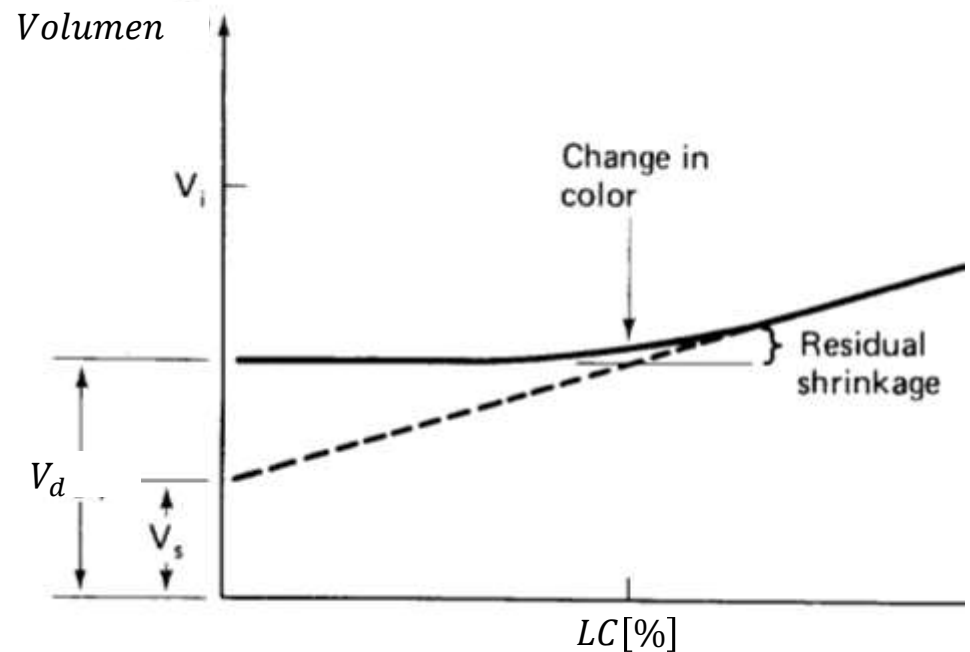
- Definición: Contenido de agua para el cual la muestra sigue perdiendo agua sin reducción de volumen.
- Ensayo: i) se coloca el suelo “bien pasado de agua” en un recipiente de volumen conocido, ii) se seca el suelo al aire, sin que se generen grietas, luego se lo seca al horno, iii) se cubre la muestra de suelo con una capa de cera para que no absorba agua y se lo sumerge para determinar el volumen del suelo seco.





Límite de contracción

- El límite de contracción: $LC = \omega - \left[\frac{(V - V_d) \cdot \gamma \omega}{W_s} \right]$
- ω : humedad natural al inicio
- V : volumen recipiente
- V_d : volumen suelo seco
- W_s : peso del suelo seco



Bibliografía



- Normas ASTM – American Society of Testing Materials
 - D 422 (granulometría, hidrometría)
 - D 2216 (humedad gravimétrica)
 - D 2487 (USCS)
 - D 2488 (inspección tacto-visual)
 - D 4253 (densidad máxima)
 - D 4254 (densidad mínima)
 - D 4318 (Atterberg, LL y LP)
 - D 4943 (Atterberg, LC)
- Jean-Pierre Bardet – Experimental Soil Mechanics
- Germaine – Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers