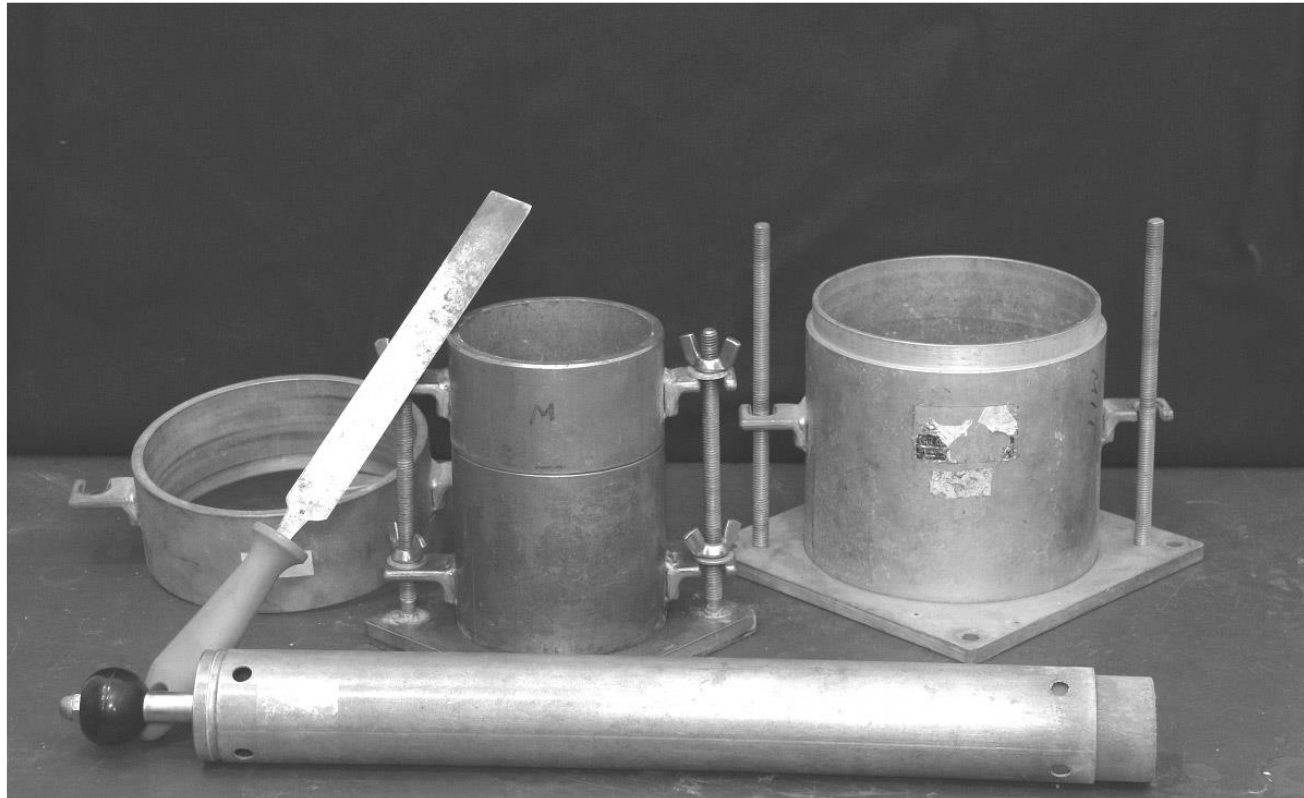


Clase de laboratorio 03: Compactación de suelos



Mecánica de Suelos y Geología

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

Índice



- Compactación Proctor estándar y modificado
- Propiedades de los suelos compactados
- Ensayo CBR
- Control densidad in situ
- Proyecto investigación LMS-FIUBA: Estudio de mezclas para barreras hidráulicas

Procedimiento de ensayo Proctor



- Se prepara suelo previamente tamizado con humedad uniforme
- Se coloca la primera capa y se apisona con golpes de caída de martillo estándar
- Se repite en las demás capas del molde
- Se engrasa ambas superficies
- Se mide peso unitario y humedad γ , ω
- Se calcula peso unitario seco γ_d
- Se repite el procedimiento hasta obtener por lo menos 5 pares de valores γ , ω
- Se determina la curva de compactación

Moldes y
martillo
estándar



Ensayo Proctor estándar (D698 ASTM o T99)



- **Método A** (20% o menos del material es ret. #4)
 - Molde 4", suelo pasante #4 (4.75mm)
 - 3 capas de 25 golpes, martillo 2.5kg, h=30cm
- **Método B** (>20% ret. #4 y el 20% o menos ret. 3/8")
 - Molde 4", suelo pasante 3/8" (9.5mm)
 - 3 capas de 25 golpes, martillo 2.5kg, h=30cm
- **Método C** (>20% ret. 3/8" y el 30% o menos ret. 3/4")
 - Molde 6", suelo pasante 3/4" (19mm)
 - 3 capas de 56 golpes, martillo 2.5kg, h=30cm

¿Qué método utilizar? R: Depende del suelo a ensayar



Ensayo Proctor modificado (D1557 ASTM ó T-180)

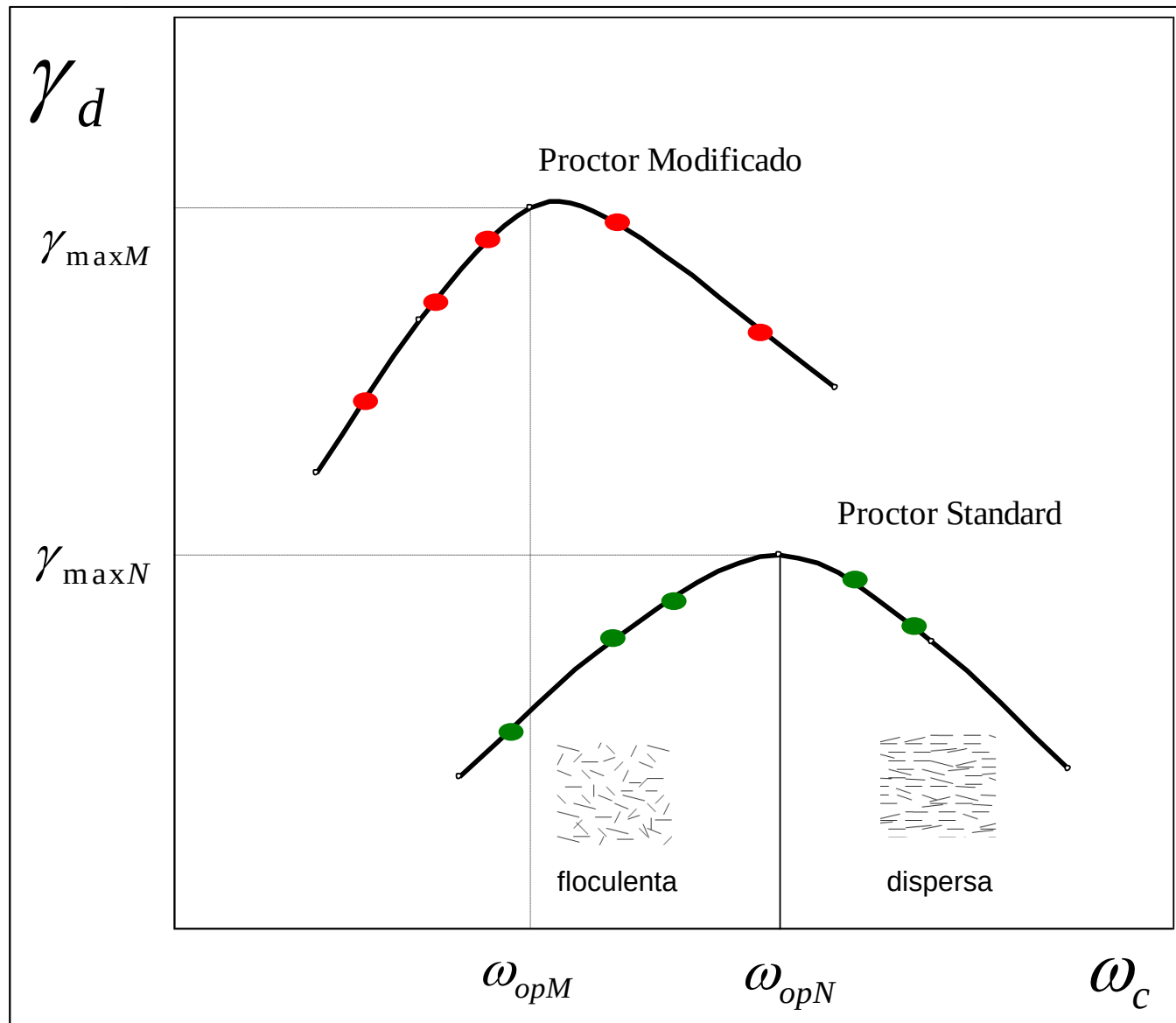
- **Método A** (20% o menos del material es ret. #4)
 - Molde 4", suelo pasante #4 (4.75mm)
 - 5 capas de 25 golpes, martillo 4.5kg, h=45cm
- **Método B** (>20% ret. #4 y el 20% o menos ret. 3/8")
 - Molde 4", suelo pasante 3/8" (9.5mm)
 - 5 capas de 25 golpes, martillo 4.5kg, h=45cm
- **Método C** (>20% ret. 3/8" y el 30% o menos ret. 3/4")
 - Molde 6", suelo pasante 3/4" (19mm)
 - 5 capas de 56 golpes, martillo 4.5kg, h=45cm

¿Qué método utilizar? R: Depende del suelo a ensayar

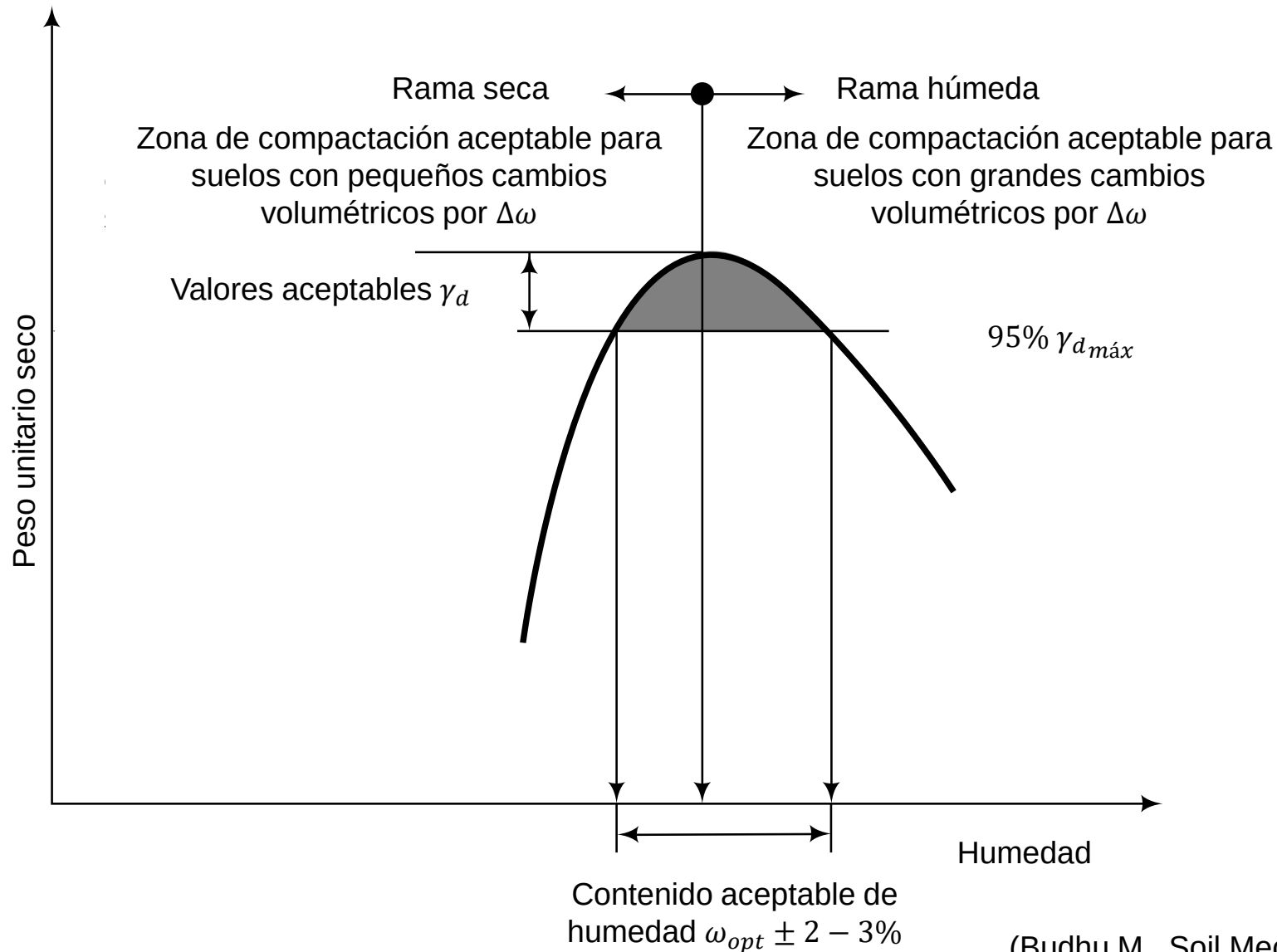
Curvas de compactación Proctor



R. Proctor



Ensayo Proctor: interpretación de curva



(Budhu M., Soil Mechanics & Foundations)

Valores típicos



Soil	$\gamma_{d\text{máx}}$ (Mg/m ³)	ω_{opt} (%)	Norma ASTM Proctor estándar
Maine Clay*	1.80	17.7	
Vicksburg Buckshot Clay**	1.56	22.8	D698
Annapolis Clay**	1.75	16.6	D698
Vicksburg Silt**	1.70	17.1	D698
Well-graded clean gravels, gravel-sand mixtures***	2.0 to 2.2	8 to 11	D698
Poorly graded clean gravels, gravel-sand mix***	1.8 to 2.0	11 to 14	D698
Silty gravels, poorly graded gravel-sand-silt***	1.9 to 2.2	8 to 12	D698
Clayey gravels, poorly graded gravel-sand-clay***	1.8 to 2.1	9 to 14	D698
Well-graded clean sands, gravelly sands***	1.8 to 2.1	9 to 16	D698
Poorly graded clean sands, sand-gravel mix***	1.6 to 1.9	12 to 21	D698
Silty sands, poorly graded sand-silt mix***	1.8 to 2.0	11 to 16	D698



*Unpublished laboratory data.

**After ASTM D698; values converted from pounds per cubic foot (pcf) to megagrams per cubic meter (Mg/m³).

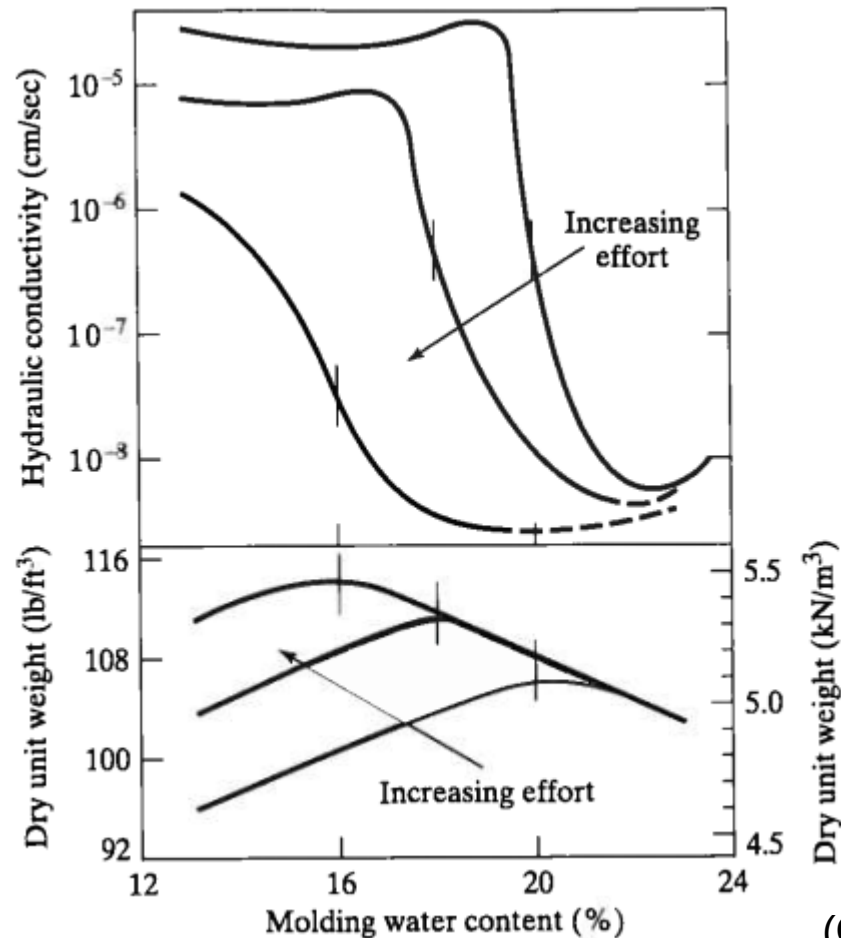
***After Naval Facilities Engineering Command (1986), *Design Manual: 7.02*; values converted from pcf to Mg/m³.

(Germaine J. – Geotechnical Laboratory)



Incidencia del nivel de compactación y humedad en la conductividad hidráulica

- Hasta 3 órdenes de magnitud en el valor de k

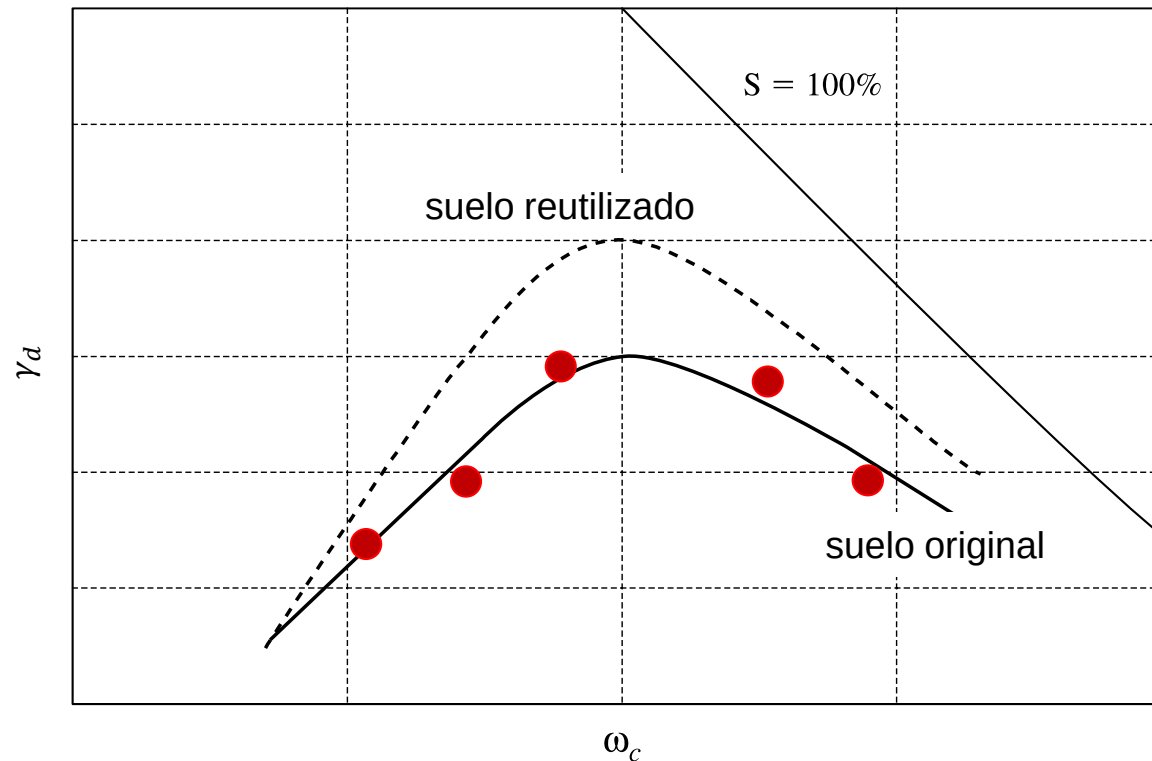


(Qian et al, 2002)

Incidencia de la reutilización del suelo en la curva de compactación



- Se debe efectuar cada punto experimental de la curva con suelo original. El material usado se descarta.

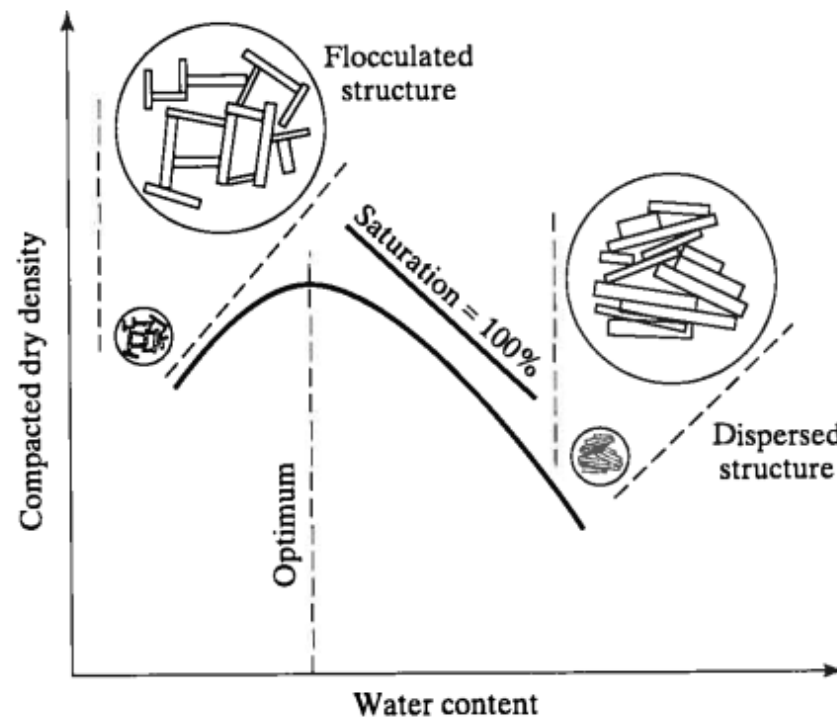


(Germaine J. – Geotechnical Laboratory)



Incidencia del nivel de compactación y humedad en la estructuración de suelos

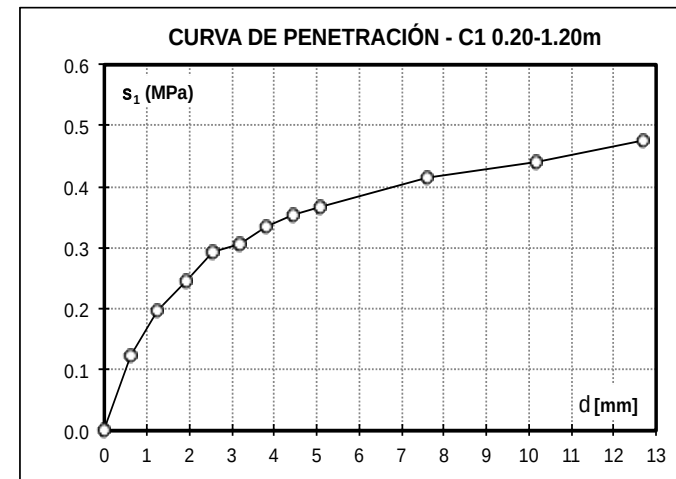
- A mayor ω , tendencia a formar estructura dispersa
- A mayor nivel de compactación y misma ω , tendencia a formar estructura dispersa, tanto en RS como en RH



(Qian et al, 2002)

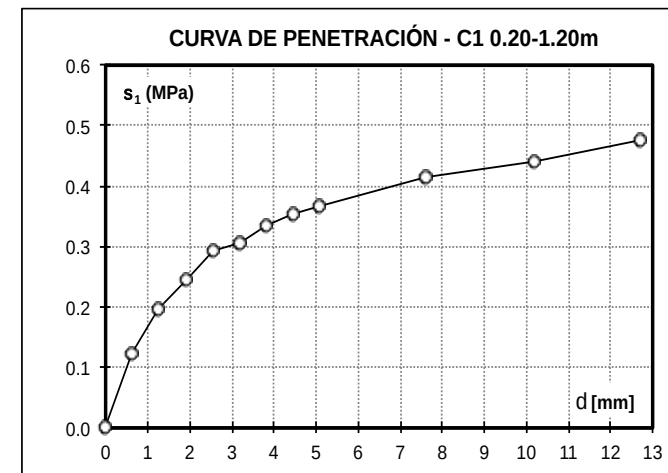
Prueba CBR laboratorio (California Bearing Ratio)

- Se conoce previamente la curva Proctor
- Se compacta el suelo en molde 6" con valores γ_d , ω predefinidos.
- Se inunda la muestra durante 96hs bajo carga y se mide la deformación constante sobre muestra compactada
- Se efectúa un ensayo de penetración $P - \delta$ con pistón $\phi = 50mm$ (foto).
- $CBR = \max \left[\frac{\sigma_{2.54mm}}{6.9MPa}, \frac{\sigma_{5.08mm}}{10.3MPa} \right] \cdot 100$
- Con el valor CBR se diseña una subbase, subrasante.



Prueba CBR campo (California Bearing Ratio)

- Se hace el ensayo con el suelo ya compactado en obra.
- Se posiciona el pistón de carga, el equipo de reacción y el marco de referencia para medir desplazamiento.
- Se efectúa un ensayo de penetración $P - \delta$ con pistón $\phi = 50mm$ (foto).
- $CBR = \max \left[\frac{\sigma_{2.54mm}}{6.9MPa}, \frac{\sigma_{5.08mm}}{10.3MPa} \right] \cdot 100$
- Con el valor CBR se evalúa la calidad de una subbase, subrasante.





Valores CBR recomendados para subrasantes

AASHTO Class	Description	ASTM/USCS class	Dry density, kg/m ³ (lb/ft ³)	CBR (percent)	k-value, MPa/m (psi/in)	AASHTO Class	Description	ASTM/USCS class	Dry density, kg/m ³ (lb/ft ³)	CBR (percent)	k-value, MPa/m (psi/in)
A-2 soils (granular material with high fines)						Fine-grained soils*					
A-2-4, gravelly	Silty gravel	GM	2,080–2,320 (130–145)	40–80	81–136 (300–500)	A-4	Silt	ML, OL	1,440–1,680 (90–105)	4–8	7–45 (25–165)*
A-2-5, gravelly	Silty sandy gravel						Silt/sand/ gravel mixture		1,600–2,000 (100–125)	5–15	11–60 (40–220)*
A-2-4, sandy	Silty sand	SM	1,920–2,160 (120–135)	20–40	81–108 (300–400)	A-5	Poorly graded silt	MH	1,280–1,600 (80–100)	4–8	7–51 (25–190)*
A-2-5, sandy	Silty gravelly sand					A-6	Plastic clay	CL	1,600–2,000 (100–125)	5–15	7–69 (25–255)*
A-2-6, gravelly	Clayey gravel	GC	1,920–2,240 (120–140)	20–40	54–122 (200–450)	A-7-5	Moderately plastic elastic clay	CL, OL	1,440–2,000 (90–125)	4–15	7–58 (25–215)*
A-2-7, gravelly	Clayey sandy gravel					A-7-6	Highly plastic elastic clay	CH, OH	1,280–1,760 (80–110)	3–5	11–60 (40–220)*
A-2-6, sandy	Clayey sand	SC	1,680–2,080 (105–130)	10–20	41–95 (150–350)						
A-2-7, sandy	Clayey gravelly sand										



k (MPa/m): ensayo de plato de carga

(Hall et al 1998, AASTHO1998)

Control densidad in situ: un ejemplo



Equipo cono de arena

Sitio de trabajo

ENSAYO	PESO SUELO HUMEDO (gr)	PESO ARENA INICIAL (gr)	PESO ARENA FINAL (gr)	ARENA AGUJERO + CONO (gr)	PESO ARENA EN CONO (gr)	PESO ARENA AGUJERO (gr)	VOL. ARENA AGUJERO (cm ³)	HUMEDAD (%)	PESO UNIT. HÚMEDO (kN/m ³)	PESO UNIT. SECO (kN/m ³)	GRADO DE COMPACTACIÓN
1 - T1	3464,46	4926	494	4432	1904	2528	1631	6,0%	20,8	19,7	93%
2 - T1	3154,46	4319	132	4187	1904	2283	1473	6,0%	21,0	19,8	94%
2 - T2	3183,46	4210	22	4188	1904	2284	1474	6,8%	21,2	19,8	94%
3 - T1	3957,46	5166	280	4886	1904	2982	1924	5,9%	20,2	19,1	90%
4 - T1	4845,46	10332	5024	5308	1904	3404	2196	5,9%	21,6	20,4	97%
5 - T1	3130,46	5166	778	4388	1904	2484	1603	5,0%	19,2	18,3	87%

¿Se hizo bien el trabajo de campo?

Mediciones en campo y laboratorio (USCS = GW – GM, $\gamma_{d_{m\acute{a}x}} = 21.1 \text{ kN/m}^3$)

Videos



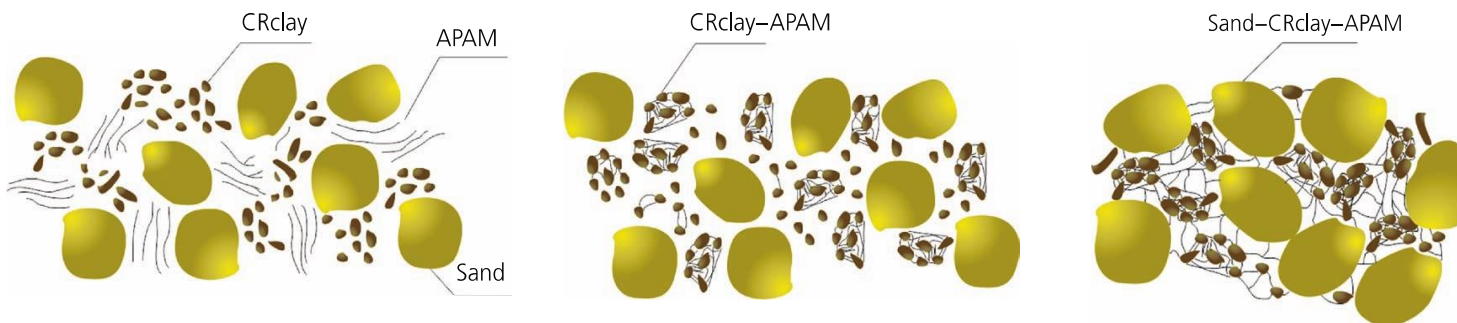
- Ensayo Proctor
 - <https://www.youtube.com/watch?v=tqHNK67IgG4>
- Ensayo CBR
 - https://www.youtube.com/watch?v=Naxkh_M4Oic
- Control densidad
 - <https://www.youtube.com/watch?v=IIF3m4OLFwc>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=ojH0W3xq3P0>

ADVERTENCIA: Los videos que aquí se presentan son a fines ilustrativos y tienen por único objetivo que el alumno/a visualice las etapas de cada ensayo. Por consiguiente, no deben ser interpretados como material de aprendizaje previamente calificado.



Estudio de mezclas: diseño de barrera hidráulica para relleno sanitario

- El LMS-FIUBA viene desarrollando Tesis de grado en esta área (Martí L. 2015, Casagrande C. 2018, Pileggi A. 2020)
- Objetivo: diseñar una mezcla óptima fino-grueso y adición de polímero (APAM) apta para uso en barrera hidráulica.
- Suelo fino: MH (LL=60, IP=20, #200=95%)
- Suelo grueso: SP (#200=4%, $C_u=2.5$, $C_c=1.3$)
- Requisitos fundamentales en barreras: UCS y k

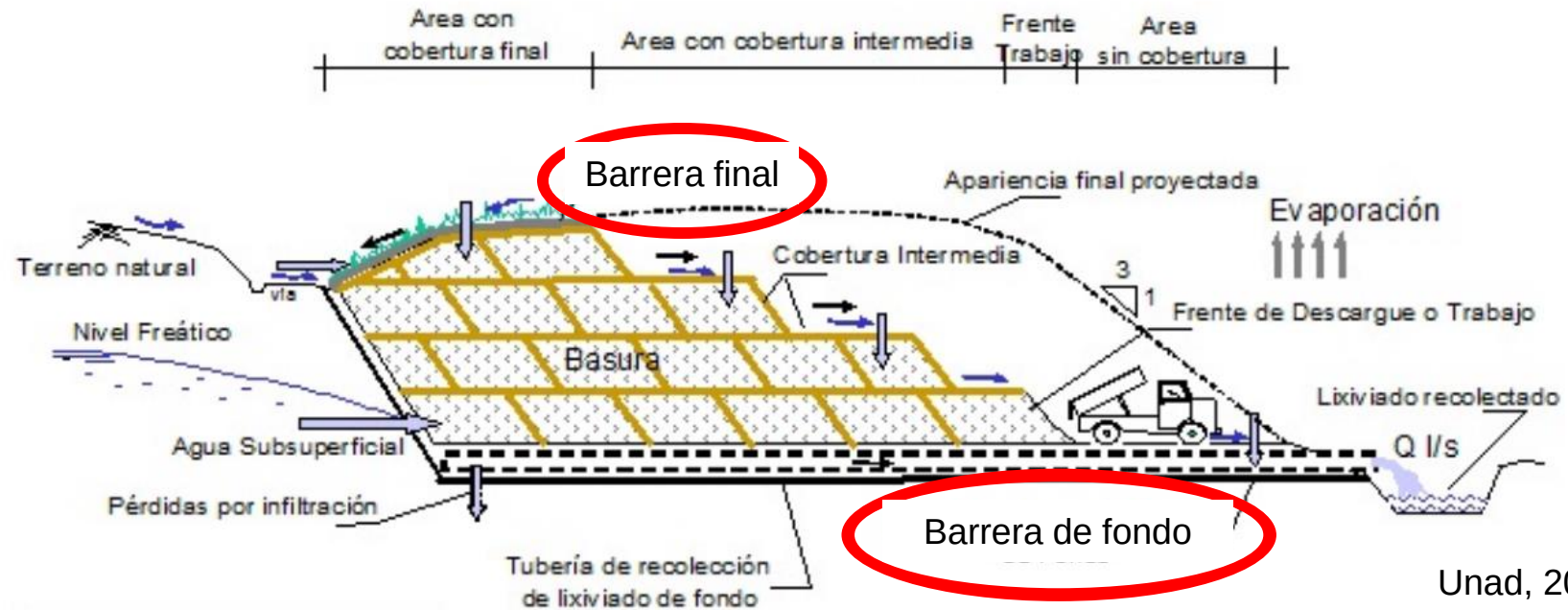


Estadios de interacción arena-arcilla-polímero (Piqué et al, 2019)

Polímero APAM



Estudio de mezclas: ¿qué es un relleno sanitario?



Unad, 2013

Cobertura final (final cover):

- $k < 10^{-5} \text{ cm/seg}$
- Resistencia a la erosión superficial
- Flexibilidad

Cobertura de fondo (base liner):

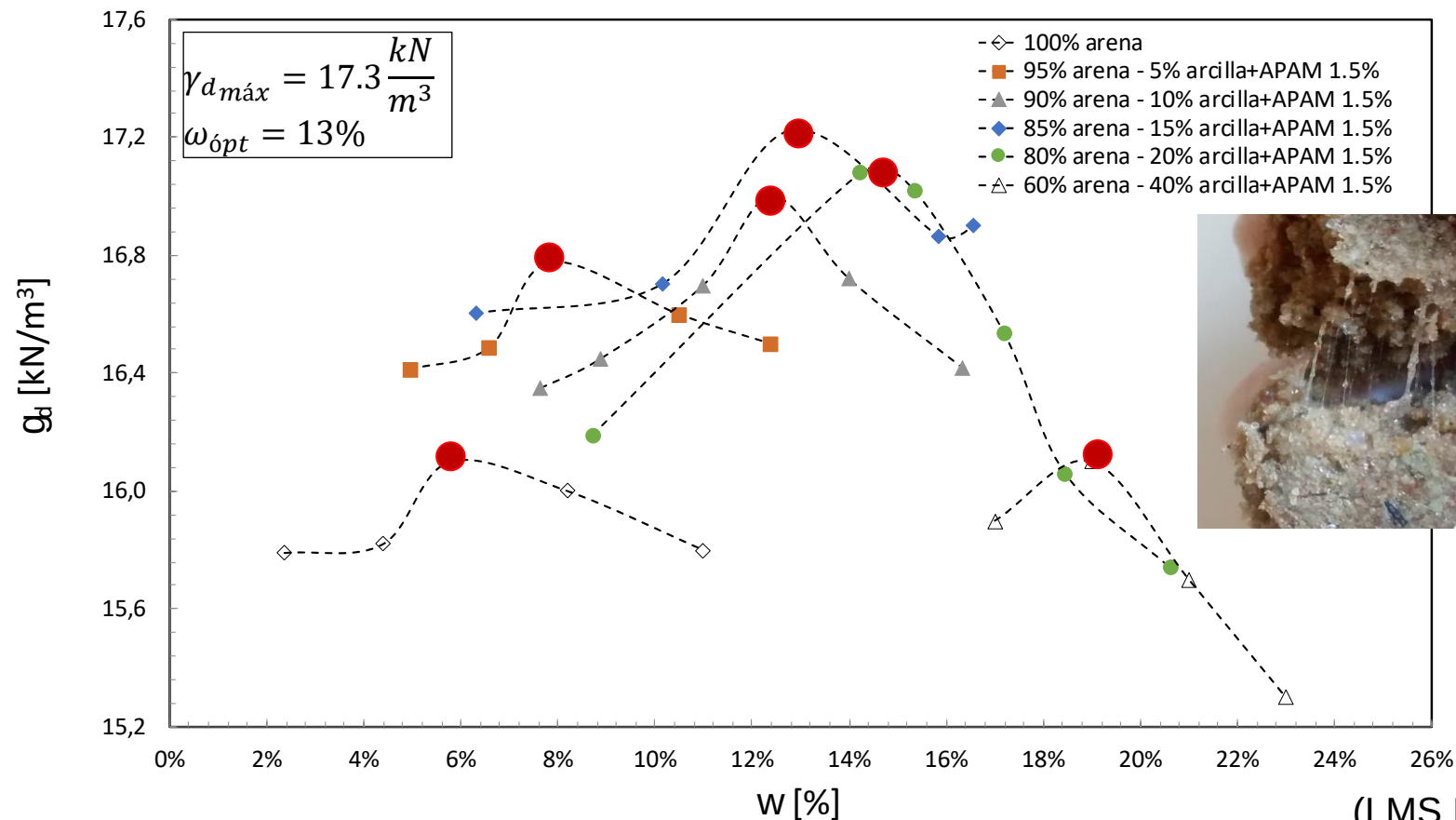
- $k < 10^{-7} \text{ cm/seg}$
- Capaz de recolectar el lixiviado
- Flexibilidad





Estudio de mezclas: maximización de peso unitario seco

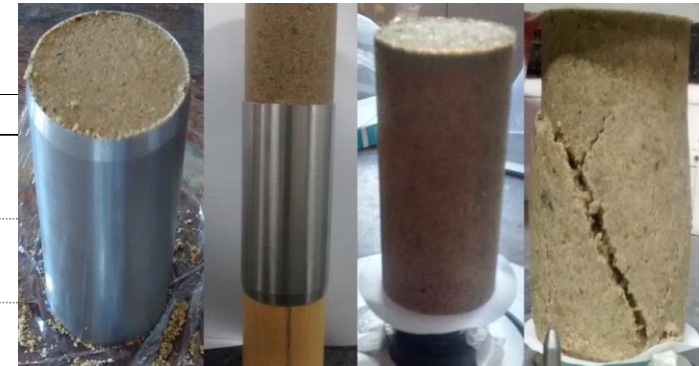
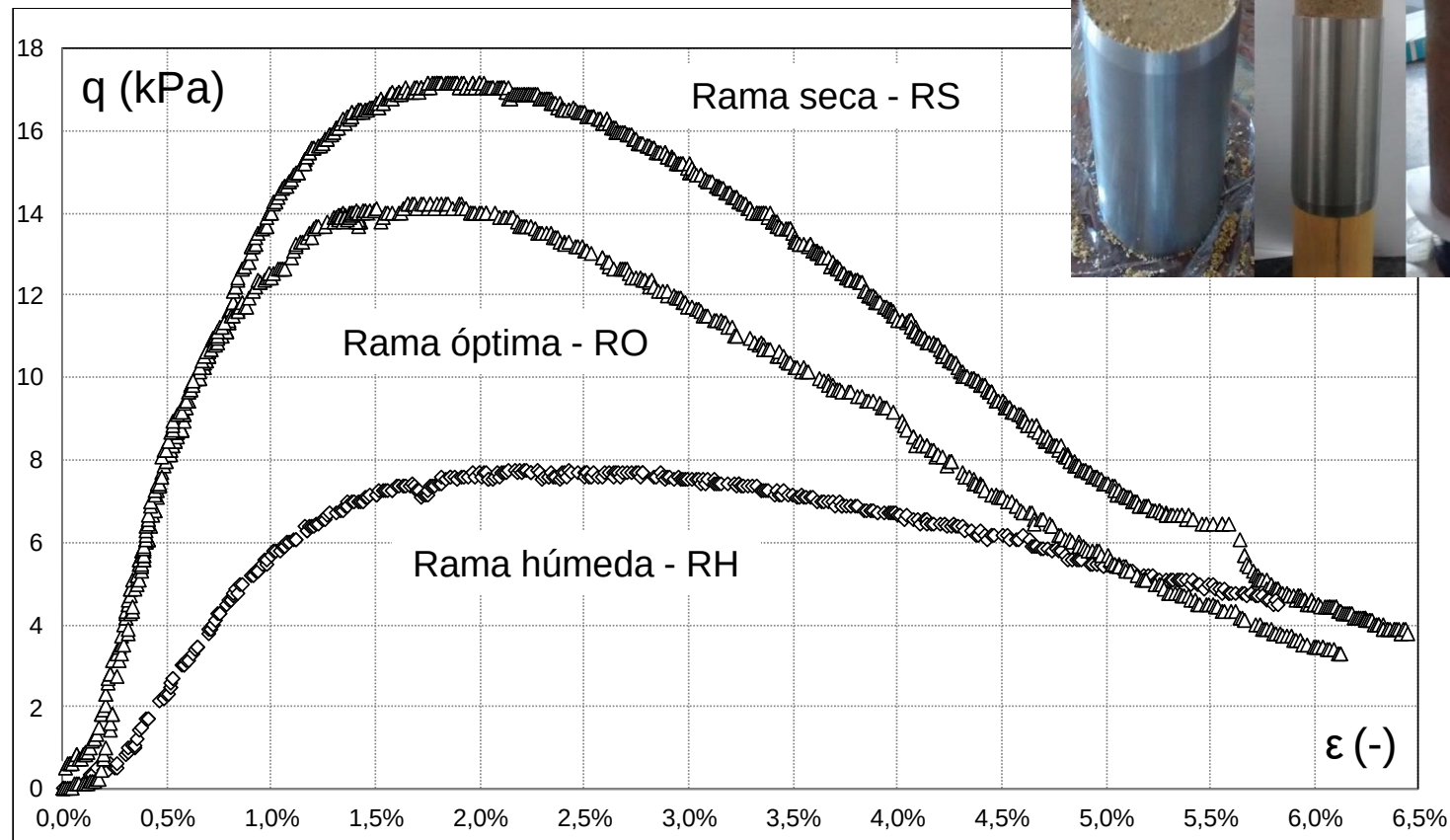
- Mezcla óptima 85%arena (S) + 15% [arcilla (C) + APAM]





Estudio de mezclas: variación de resistencia a compresión simple

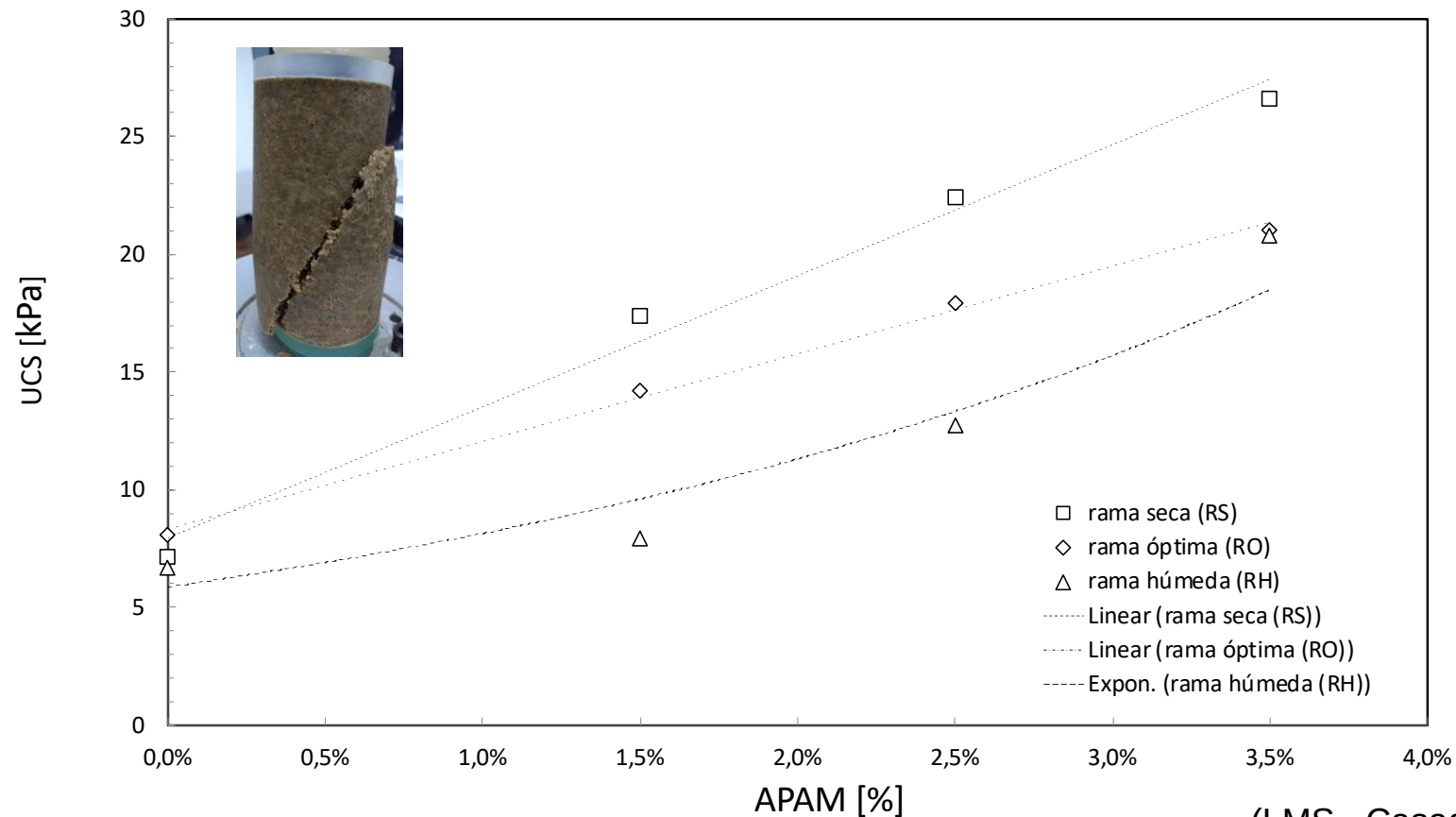
- Incidencia de la humedad en UCS





Estudio de mezclas: variación de resistencia a compresión simple

- Incidencia de la humedad y %APAM en UCS



(LMS - Casagrande C. 2018)

Bibliografía



- Normas ASTM – American Society of Testing Materials
 - D 698 (Proctor estándar)
 - D 1557 (Proctor modificado)
 - D 1883 (ensayo CBR en laboratorio)
 - D 4429 (ensayo CBR en campo)
- Jean-Pierre Bardet – Experimental Soil Mechanics
- Germaine – Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers