

Compactación de suelos



Mecánica de Suelos y Geología
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires



Índice

- Propósito de la compactación
- Equipos de compactación
- Ensayo de Proctor
- Controles de compactación
- Suelo cemento



Propósito y aplicación de la compactación de suelos

Para qué se compacta un material granular ?

- Mayor resistencia del terreno $\rightarrow c' , \phi'$
- Mayor rigidez $\rightarrow E , G$
- Mayor estabilidad volumétrica $\rightarrow \Delta \epsilon_v$
- Menor conductividad hidráulica $\rightarrow k$

Aplicaciones (hay mucho mas) :

- Sub-bases de caminos, pistas, playas de acopio
- Terraplenes, pedraplenes ferroviarios
- Barreras hidráulicas en rellenos sanitarios
- Mejora del terreno (recambio)
- Presas de materiales



Consecuencias de una mala compactación y/o diseño geotécnico

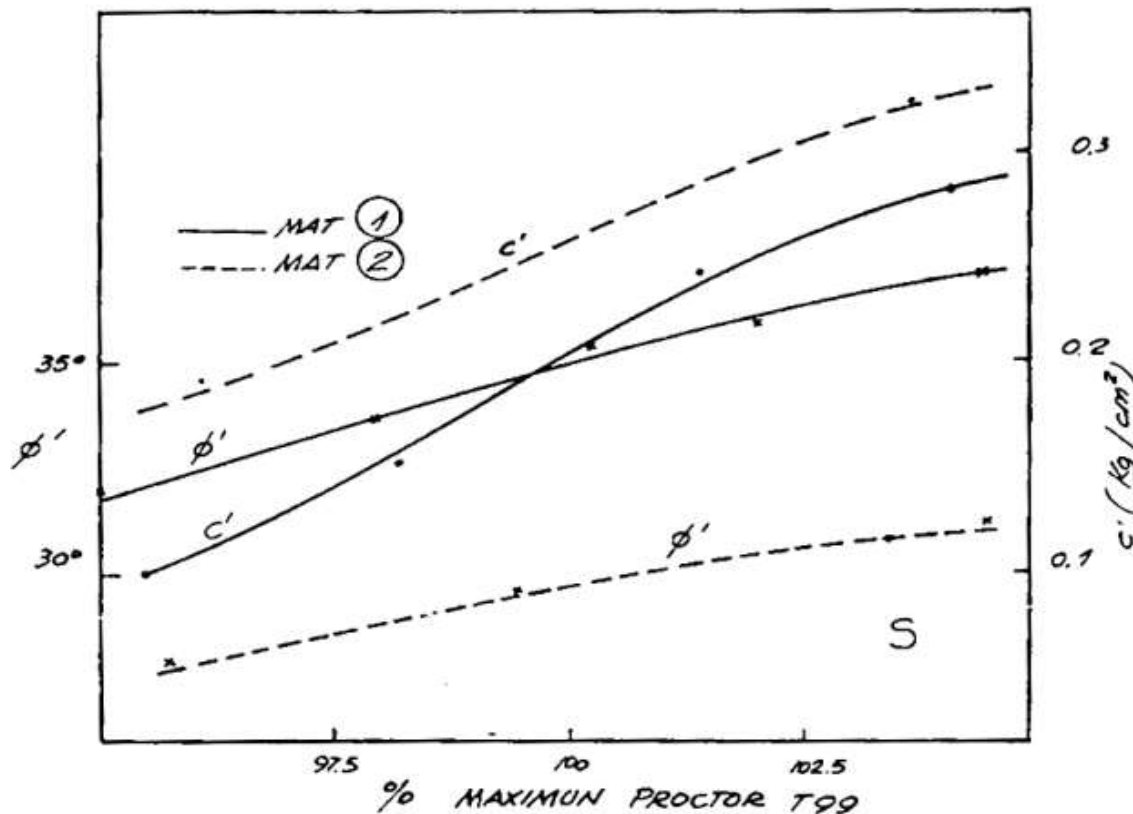
- Falla en dique de contención de crecidas durante Huracán Katrina (29-08-2005)



Consecuencias de una buena compactación



- Variación de c' y ϕ' en función del grado de compactación para un Loess y Loess modificado (ensayos triaxiales - Núñez 1986)



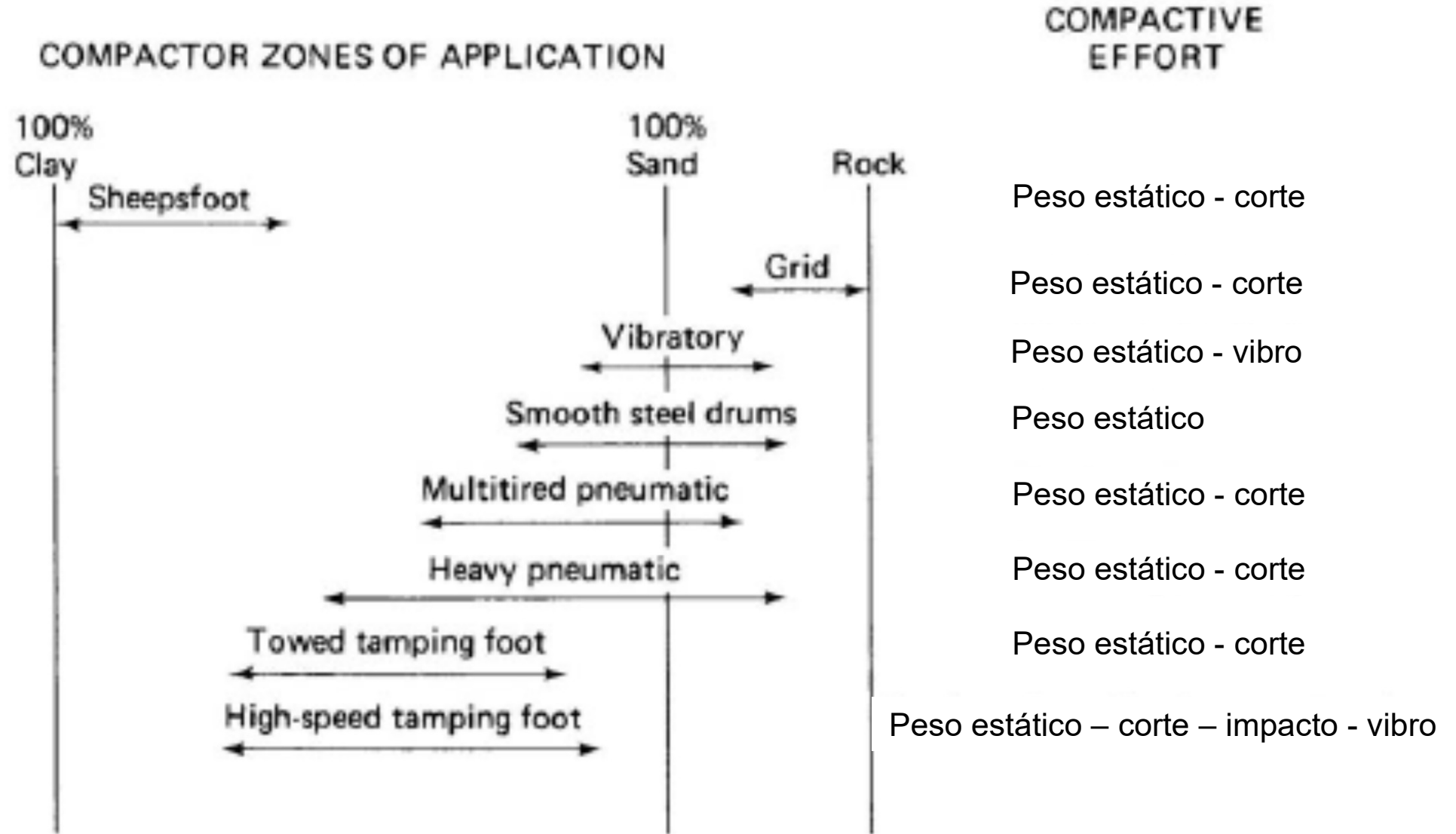
Muestra a fin de ensayo triaxial



Índice

- Propósito de la compactación de suelos
- **Equipos de compactación**
- Ensayo de Proctor
- Controles de compactación
- Suelo cemento

Equipo de compactación “óptimo” según el tipo de material





Equipo de compactación “óptimo” según el tipo de material



Grid (grilla)



Multitired pneumatic (neumático)



Tamping (rodillo dentado)



Smooth drum (rodillo liso)



Sheepsfoot (pata de cabra)

Equipos complementarios



Retropala



Camión volcador



Motoniveladora



Camión regador



Índice

- Propósito de la compactación de suelos
- Equipos de compactación
- **Ensayo de Proctor**
- Controles de compactación
- Suelo cemento

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 enrasa 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 y se obtiene $\gamma_{d\text{máx}}$, $\omega_{\text{ópt}}$

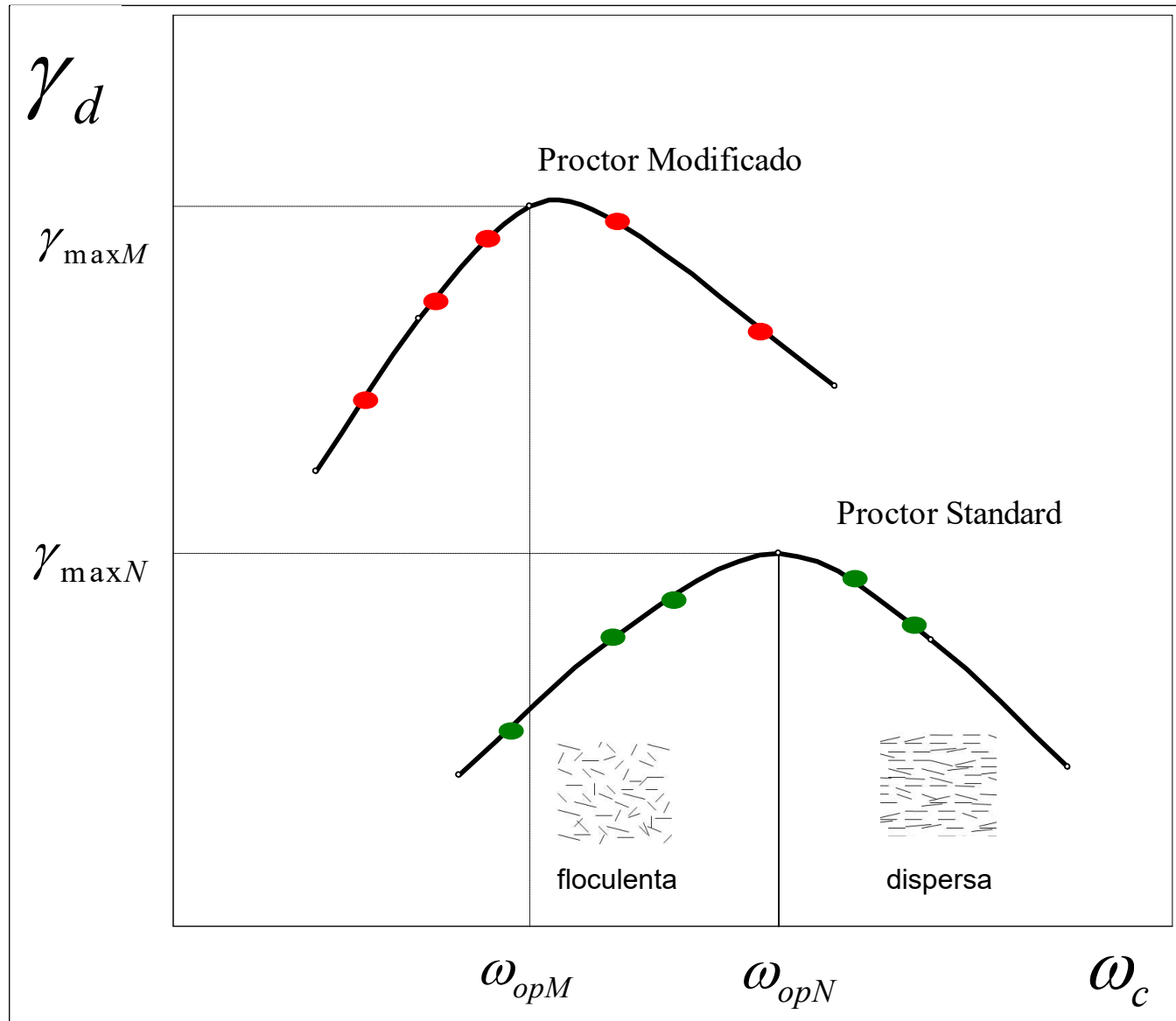
Moldes y martillo estándar



Curvas de compactación Proctor



R. Proctor



Curvas de compactación Proctor



- Proctor estándar - T99 (594 kJ/m³): ensayo original desarrollado por R. Proctor en la década del '30 en Los Angeles para control de presas
- Proctor modificado – T180 (2695 kJ/m³): desarrollado durante II Guerra Mundial por USACE para mejorar la capacidad de pavimentos estructurales para aterrizaje de aeronaves pesadas
- A mayor energía de compactación $\uparrow \gamma_{d\text{máx}}$, $\downarrow \omega_{\text{ópt}}$
- Rama seca: “a izquierda” de $\omega_{\text{ópt}}$, estructura floculenta
- Rama húmeda: “a derecha” de $\omega_{\text{ópt}}$, estructura dispersa

Diferentes propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo compactado “a izquierda” o “a derecha” para un mismo γ_d



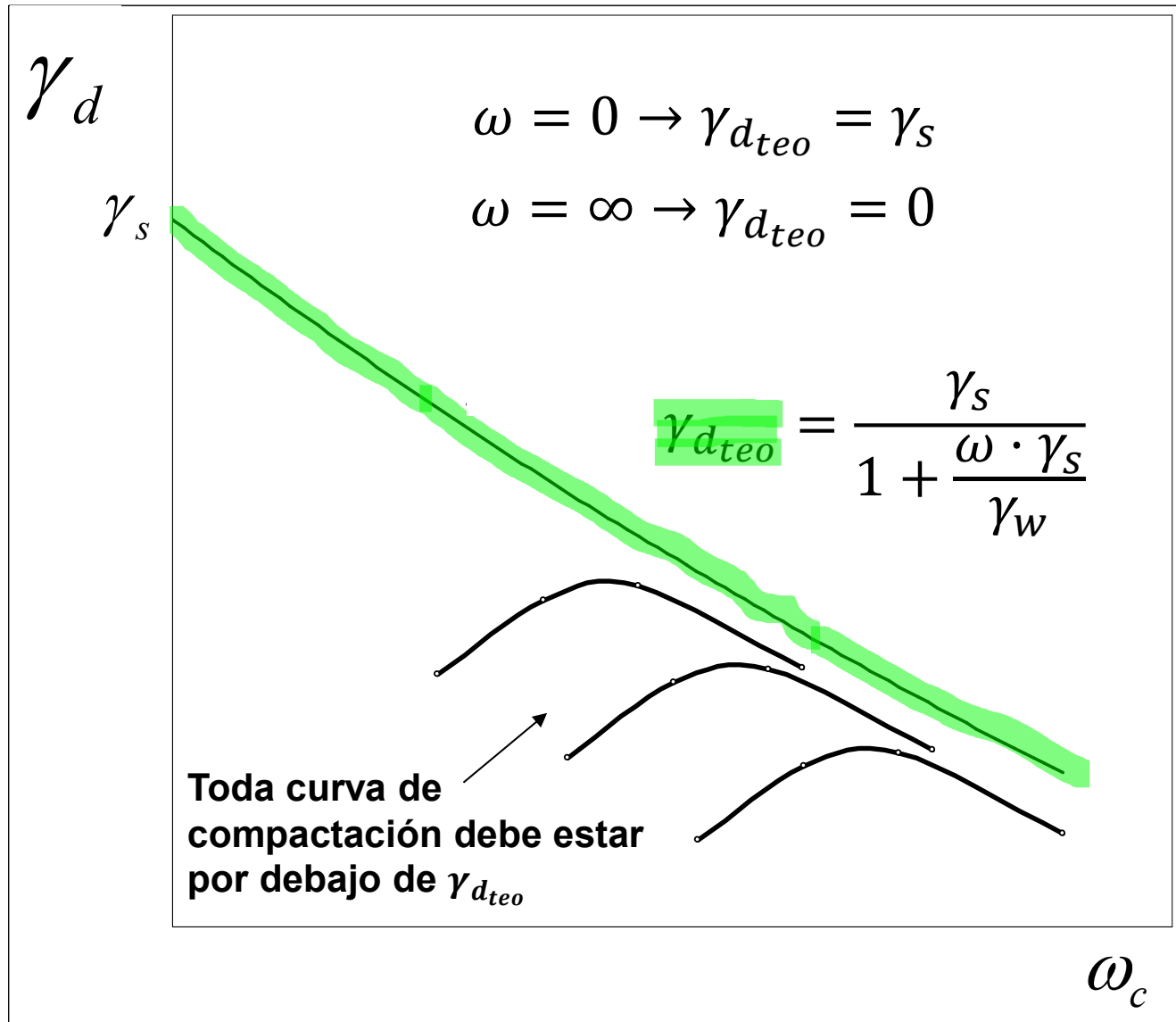
Peso unitario seco teórico ($\gamma_{d_{teo}}$)

- El proceso de compactación reduce vacíos $\downarrow V_V$
- El límite de las curvas de compactación se alcanza cuando se elimina todo el aire de la muestra ($V_V \rightarrow V_\omega$)
- Para eliminar todo el aire por compactación se requiere energía infinita. Es imposible.
- Se define este peso unitario como un “peso unitario seco por saturación teórica” $\rightarrow \gamma_{d_{teo}}$

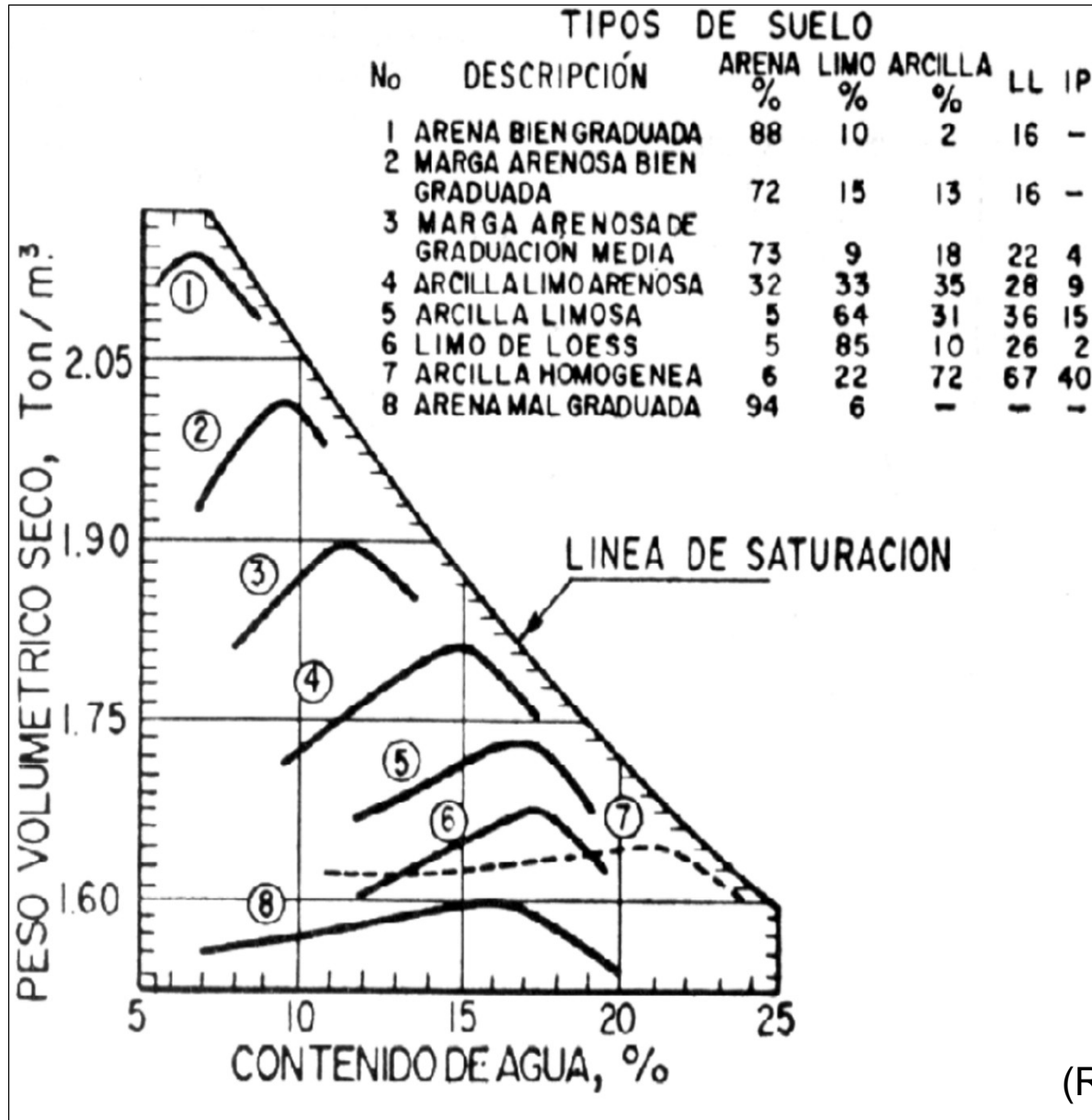
$$S_r = \frac{V_\omega}{V_V} = 1 \rightarrow e = \omega \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \rightarrow \gamma_{d_{teo}} = \frac{\gamma_s}{1 + e} = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{\omega \cdot \gamma_s}{\gamma_w}}$$



Curva límite teórica de compactación



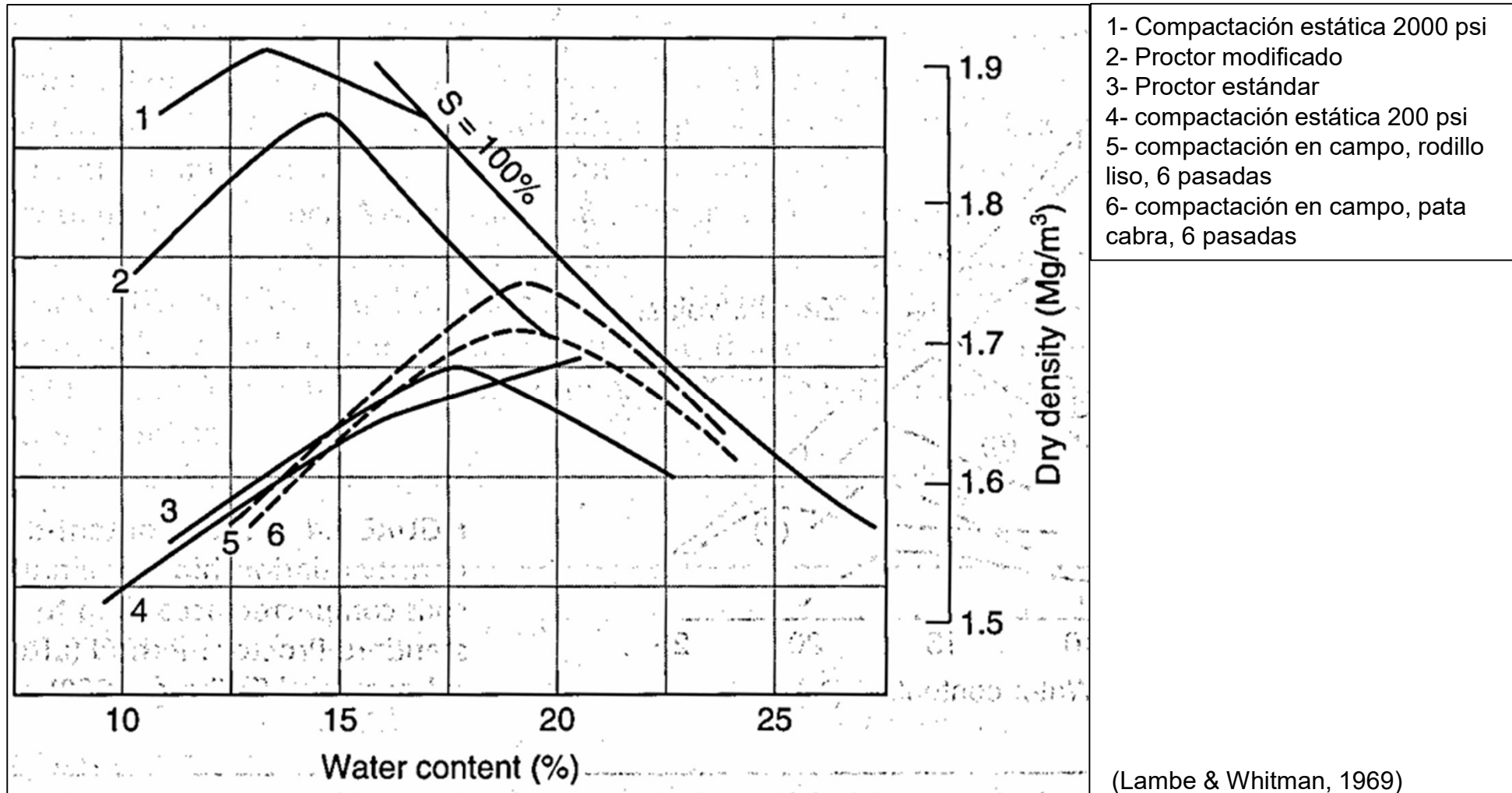
Curvas de compactación en diferentes suelos



(Rico & Del Castillo 1974)



Curvas de compactación para diferentes metodologías de trabajo (campo y lab)



(Lambe & Whitman, 1969)



Índice

- Propósito de la compactación de suelos
- Equipos de compactación
- Ensayo de Proctor
- **Controles de compactación**
- Suelo cemento



Controles de compactación: grado de compactación

- En terreno se controla el trabajo realizado mediante la ejecución de controles de compactación.
- Grado de compactación: $GC = \frac{\gamma_{d_{campo}}}{\gamma_{d_{m\acute{a}x-lab}}}$
- $\gamma_{d_{campo}}$ → mediciones in situ (controles compactación)
- $\gamma_{d_{m\acute{a}x-lab}}$ → ensayo Proctor (PS o PM) ya efectuado
- Aplicaciones viales típicas: $\gamma_{d_{campo}} > 0.95 \cdot \gamma_{d_{m\acute{a}x-PS}}$
- Caminos de alta demanda: $\gamma_{d_{campo}} > 0.95 \cdot \gamma_{d_{m\acute{a}x-P}}$
- Si tenemos un espesor de suelo a compactar mayor a 0.2-0.3m, los controles se deben efectuar por recremento de capas de ese espesor.

Controles directos de compactación: volumenómetro

- En suelos finos o $< \#4$
- Ensayo: i) se elije un punto del terreno a controlar, ii) se practica un agujero no menor a 300 cm^3 , iii) se recolecta el suelo del agujero en bolsa sin pérdida de humedad, iv) se posiciona el equipo y se mide el volumen por desplaz. de líquido

$$\bullet \gamma_{d_{campo}} = \frac{W_S}{V_T} = \frac{W_T / (1 + \omega)}{V_T}$$



Controles directos de compactación: cono de arena



- En suelos gruesos $\phi < 1^{1/2}$ "
- Ensayo: i) se elije un punto del terreno a controlar, ii) se practica un agujero no menor a 1400cm^3 , iii) se recolecta el suelo del agujero en bolsa sin pérdida de humedad, iv) se posiciona el equipo y se mide el volumen por desplaz. de arena

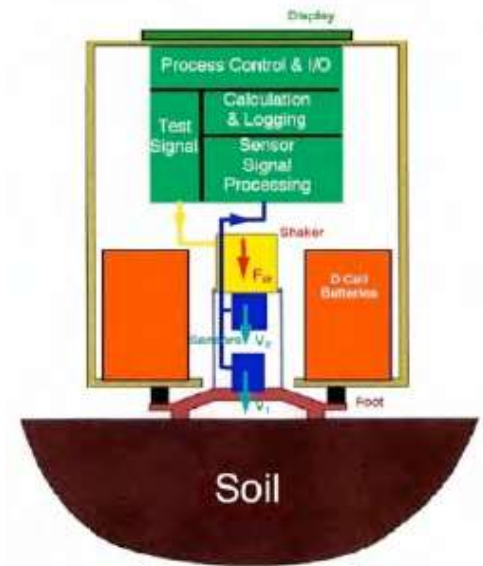
$$\bullet \gamma_{d\text{ campo}} = \frac{W_S}{V_T - V_{\text{cono}}} = \frac{W_T / (1 + \omega)}{V_T - V_{\text{cono}}}$$



Controles indirectos: medición de rigidez lineal superficial (K_{gr})

- En suelos granulares o con menos de 20% finos
- NO hay toma de muestra
- Ensayo: i) se elige un punto del terreno a controlar, ii) se enrasa la superficie y se posiciona el equipo, iii) se apreta un botón, se espera 70 segundos y se obtiene K_{gr}

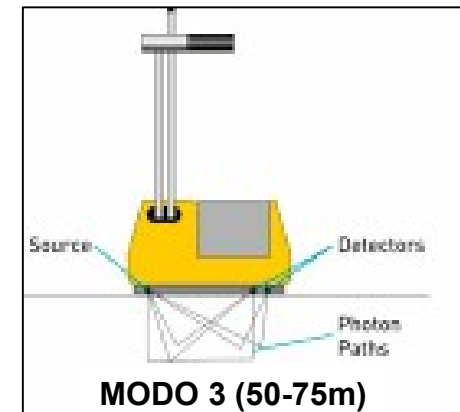
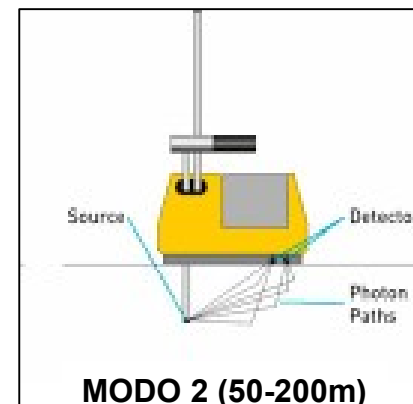
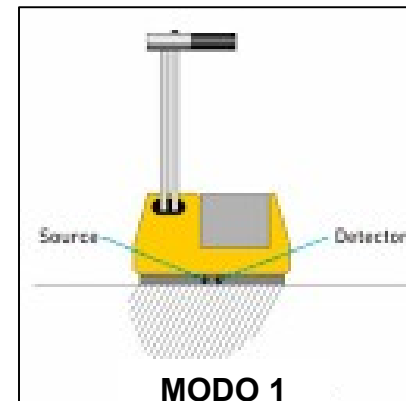
$$K_{gr} \sim \frac{1.77RE}{(1-\nu)^2} \rightarrow E \sim \frac{(1-\nu)^2 \cdot K_{gr}}{1.77R}$$



Controles indirectos: nucleodensímetro

- En suelos finos o gruesos
- NO hay toma de muestra
- Utiliza isótopos radiactivos
- **Previamente calibrado para obtener γ y ω .**
- Ensayo: i) se elige un punto del terreno a controlar, ii) se posiciona el equipo, iii) se mide en modo 1 (ω), iv) se mide en modo 2 ó 3 (γ)

$$\gamma_{d\text{ campo}} = \frac{\gamma}{1 + \omega}$$



Comparativa entre métodos

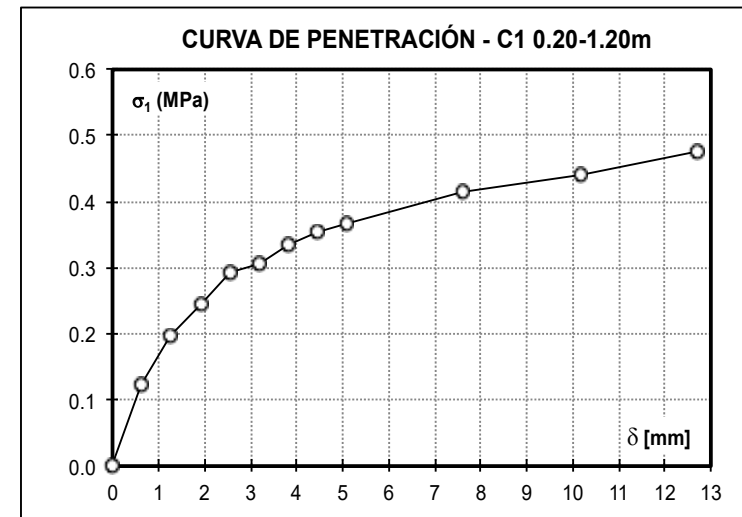


	cono arena	volumenómetro	nucleodensímetro
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> • Low cost • Accurate • Large sample 	<ul style="list-style-type: none"> • Low to moderate cost • Fewer computational steps compared to sand cone • Large sample 	<ul style="list-style-type: none"> • Quick • Direct measurement of unit weight and water content
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> • Slow; many steps required • Standard sand in hole has to be retrieved • Unit weight has to be computed • Difficult to control density of sand in hole • Possible void space under plate • Hole can reduce in size through soil movement • Hole can cave in (granular materials) 	<ul style="list-style-type: none"> • Slow • Extra care needed to prevent damage to balloon, especially in gravelly materials • Unit weight has to be computed • Difficult to obtain accurate hole size • Possible void space under plate • Hole can reduce in size through soil movement • Hole can cave in (granular materials) 	<ul style="list-style-type: none"> • High cost • Radiation certification required for operation • Water content error can be significant • Surface preparation needed • Radiation backscatter can be hazardous

Soil Mechanics & Foundation (Budhu M. 2010)

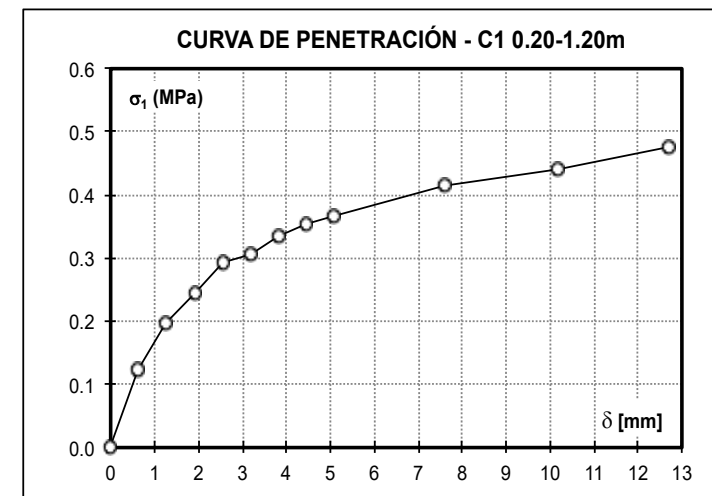
Prueba CBR laboratorio (California Bearing Ratio)

- 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)

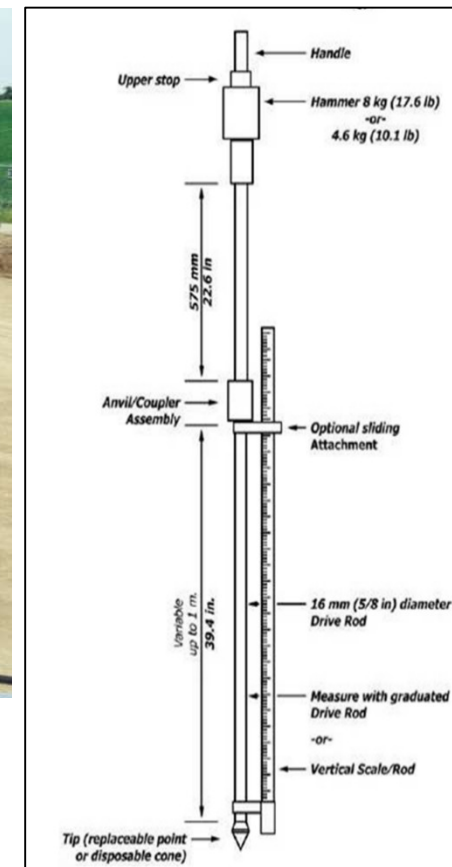
- Se hace el ensayo con el suelo ya compactado en obra.
- Se posiciona el pistón de carga, el equipo de reacción y el marco de referencia para medir desplazamiento.
- Se efectúa un ensayo de penetración $P - \delta$ con pistón $\phi = 50mm$ (foto).
- $CBR = \max \left[\frac{\sigma_{2.54mm}}{6.9MPa},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



Prueba DCP (Dynamic cone penetration)



- ensayo de penetración dinámica de cono con registro de resistencia a la penetración cada 25 mm de avance hasta atravesar el espesor de interés o “rechazo”
- Estimación de “resistencia” in situ
- Se calcula mm / nro. golpes
- Correlaciona con valor CBR (muy utilizado para la geotecnia vial)
- Expeditivo, permite medir en forma rápida en varios puntos



(ASTM D6951)



Índice

- Propósito de la compactación de suelos
- Equipos de compactación
- Ensayo de Proctor
- Controles de compactación
- Suelo cemento

Suelo cemento



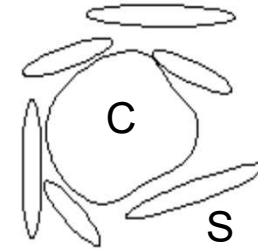
- Mezcla de suelo, cemento y agua, en proporciones adecuadas
- Estabilización físico-química en la que interviene la estabilización mecánica (compactación)
- Endurecimiento durante el curado
- El objeto es modificar algunas propiedades naturales del suelo
 - Resistencia y rigidez
 - Estabilidad volumétrica
 - Durabilidad
 - Permeabilidad



Etapas de la reacción del suelo-cemento



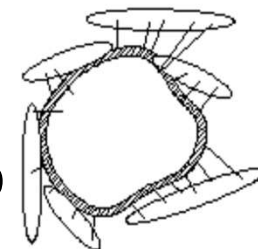
- Hidratación del cemento: formación gel de $C_3S_2H_3$ (estringuita) en la superficie de los granos de cemento e $Ca(OH)_2$, aumento del pH en el agua de poro
- Activación de componentes del suelo: sílice y alúmina de la arcilla reaccionan con iones $Ca(OH)_2$, reacciones puzzolánicas, baja el pH ambiente
- Endurecimiento: reacciones evolucionan con el tiempo. Aumento de la rigidez y resistencia del material por entrecruzamiento de cristales de cemento hidratado



Partículas de cemento y suelo mezclados con agua



Creación del gel sobre la partícula de cemento



Reacciones de frague y formación de la red de $C_3S_2H_3$

Suelo cemento



Según el % de cemento se define:

- Suelo modificado
 - % bajos de cemento ($< 2\%$)
 - Se usa generalmente para: bajar el IP, controlar cambios volumétricos, modificar granulometría
 - No se busca aumentar la resistencia
- Suelo estabilizado
 - Generalmente entre un 5 y 15% de cemento
 - Se obtiene un material endurecido con alta rigidez y resistencia mecánica, prácticamente insensible al agua y durable

Suelos que pueden emplearse



Todos los suelos excepto:

- con contenidos altos de materia orgánica
- con sales nocivas para el cemento

Condicionante de diseño de mezcla

- Granulometría
- Plasticidad
- Sales presentes

Suelos finos plásticos: Suelo-cal



Dosificación de cemento según tipo de suelo

Table 3.1 – Typical cement requirements for various soil types²¹

AASHTO soil classification	ASTM soil classification	Typical range of cement requirement, [*] percent by weight	Typical cement content for moisture-density test (ASTM D 558), percent by weight	Typical cement contents for durability tests (ASTM D 559 and D 506), percent by weight
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	3-5	5	3-5-7
A-1-b	GM, GP, SM, SP	5-8	6	4-6-8
A-2	GM, GC, SM, SC	5-9	7	5-7-9
A-3	SP	7-11	9	7-9-11
A-4	CL, ML	7-12	10	8-10-12
A-5	ML, MH, CH	8-13	10	8-10-12
A-6	CL, CH	9-15	12	10-12-14
A-7	MH, CH	10-16	13	11-13-15

^{*}Does not include organic or poorly reacting soils. Also, additional cement may be required for severe exposure conditions such as slope-protection.

Dosificación y compactación



- **γ_d y ω_{opt} varia según tipo de suelo, % de cemento y energía de compactación**
- Con una energía de compactación mayor se requiere menos cemento para obtener las resistencias especificadas
- Aumento de resistencia a compresión simple, factores:
 - Tipo de suelo
 - Cantidad y tipo de cemento
 - Densidad seca, humedad
 - Edad, curado

Resistencia al desgaste

- Ensayos de durabilidad: medir la pérdida en peso de probetas sometidas a 12 ciclos de desgaste abrasivo con cepillado de cerdas metálicas bajo condiciones climáticas desfavorables
 - Humedecimiento y secado
 - Congelamiento y deshielo
- Ensayos de compresión simple
- Se buscó mejorar el comportamiento del material con incorporación de CP

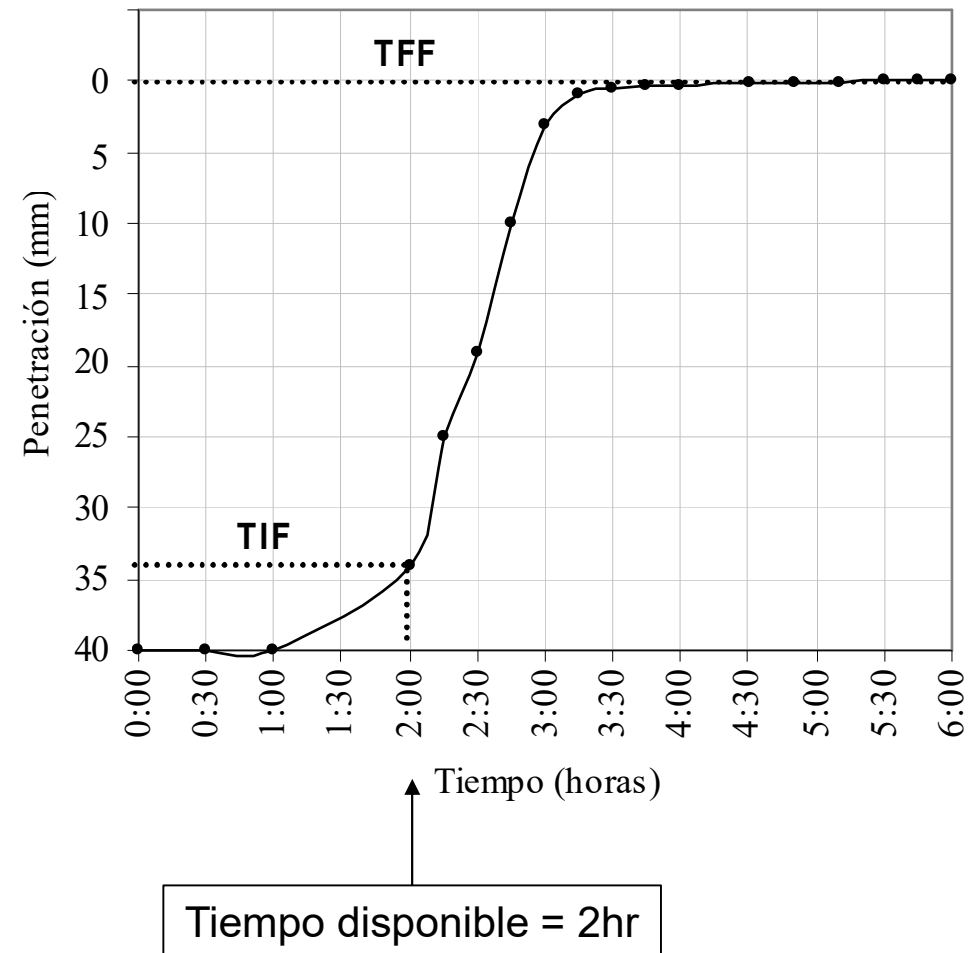


(Tesis Serigos 2009)

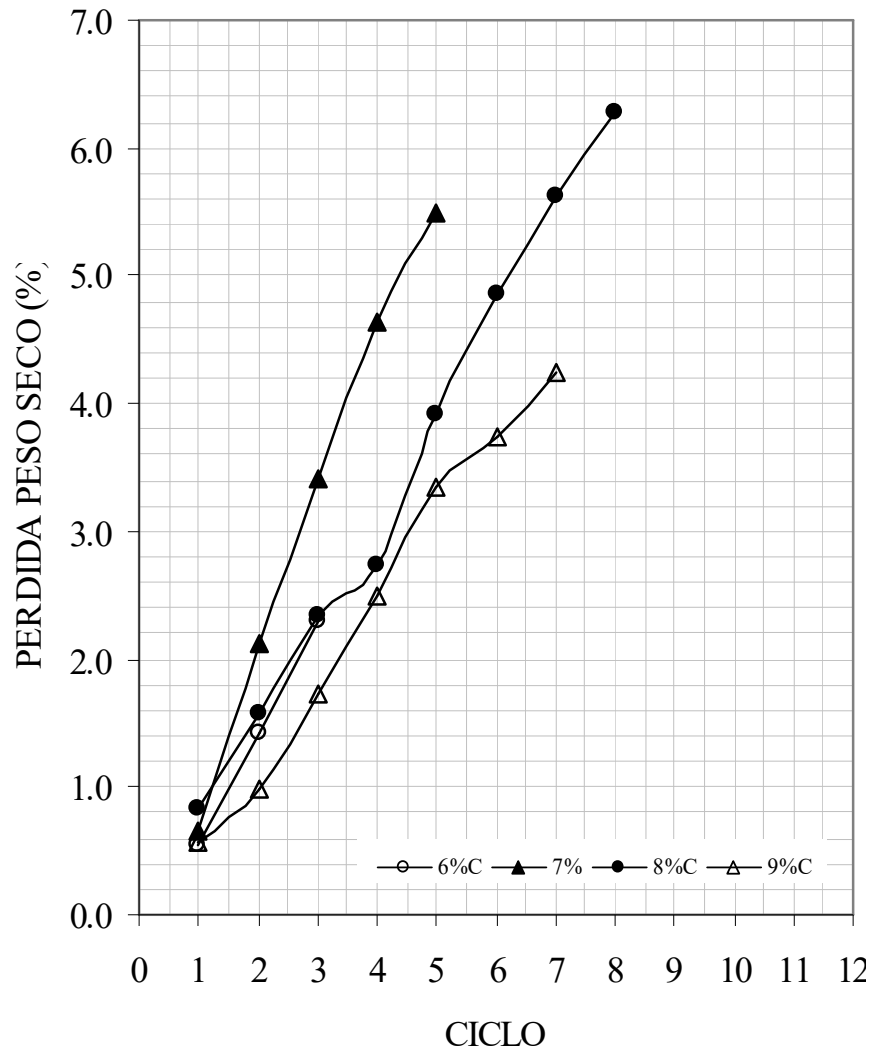
Proceso de fragüe



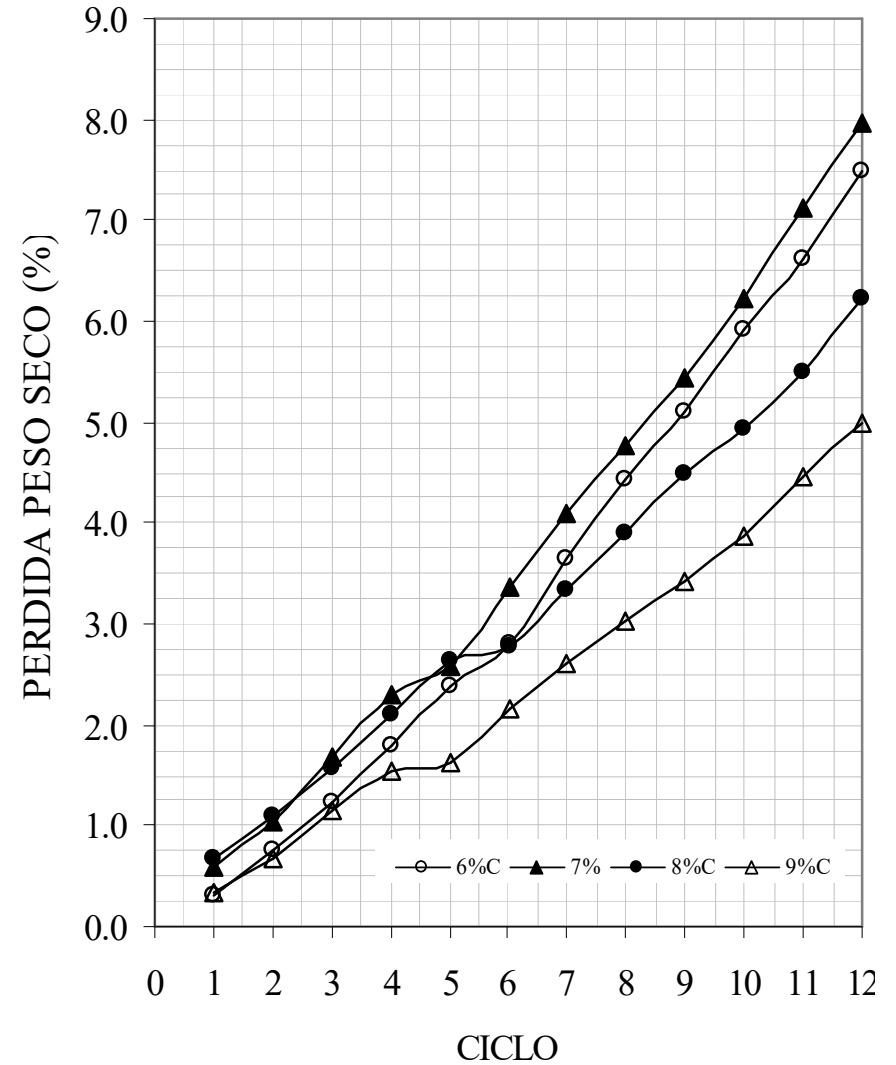
- Conocer el tiempo real disponible para armado de probetas
- TIF: tiempo inicial de fragüado
- TFF: tiempo final de fragüado



Ensayos de durabilidad



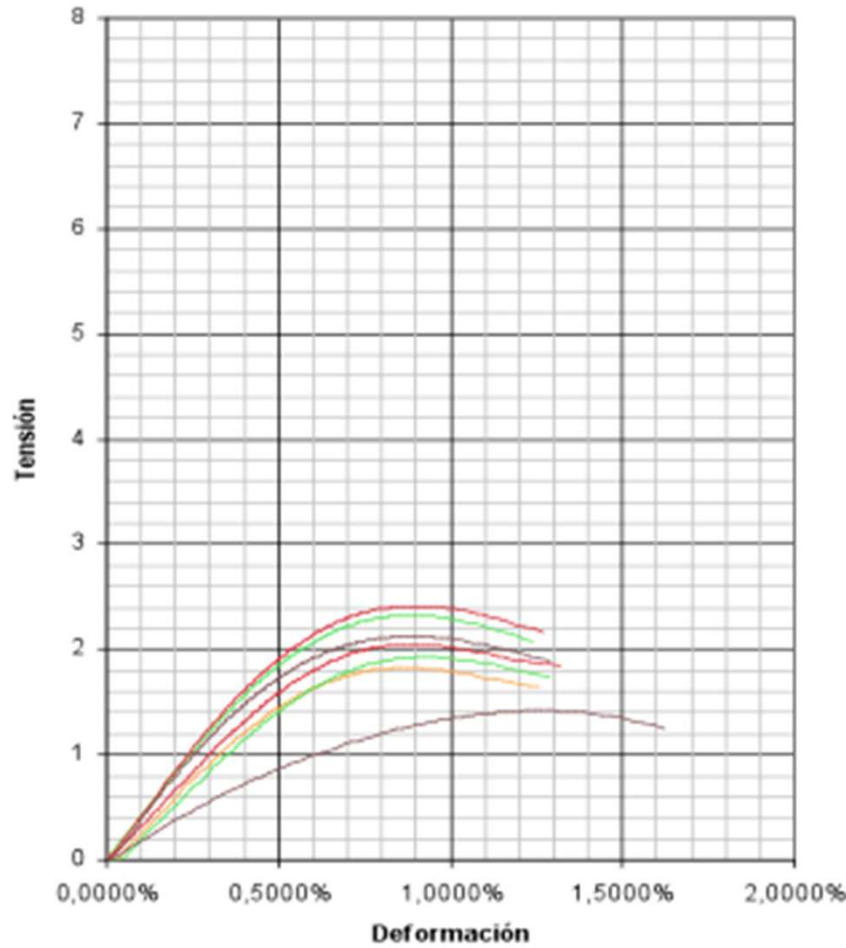
Humedec. y secado



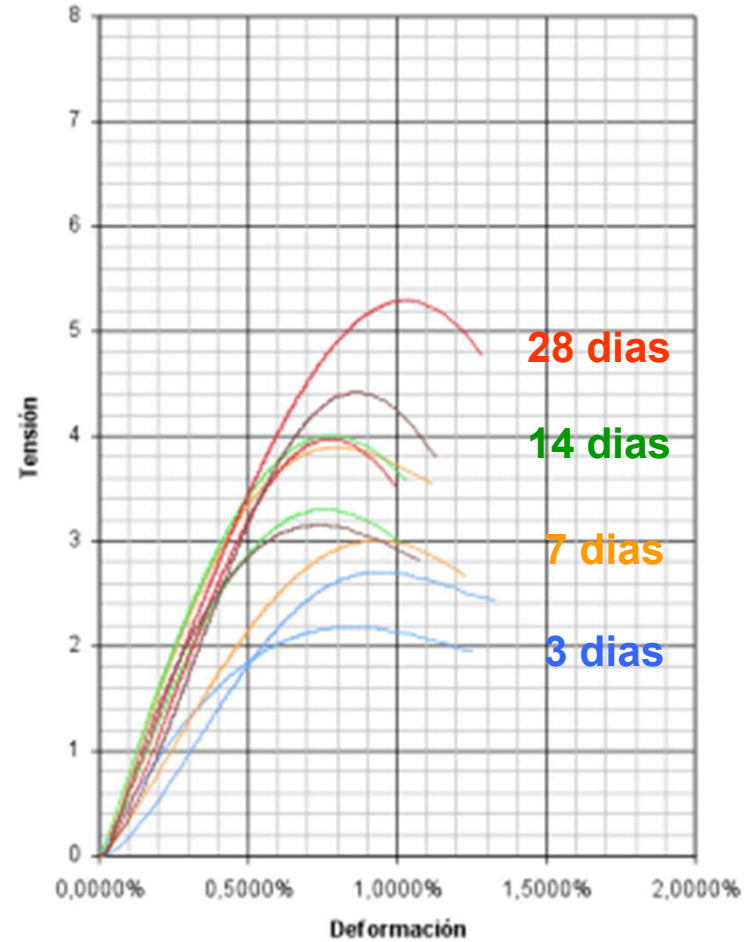
Congelam. y deshielo

(Tesis Serigós 2009)

Resistencia a compresión simple



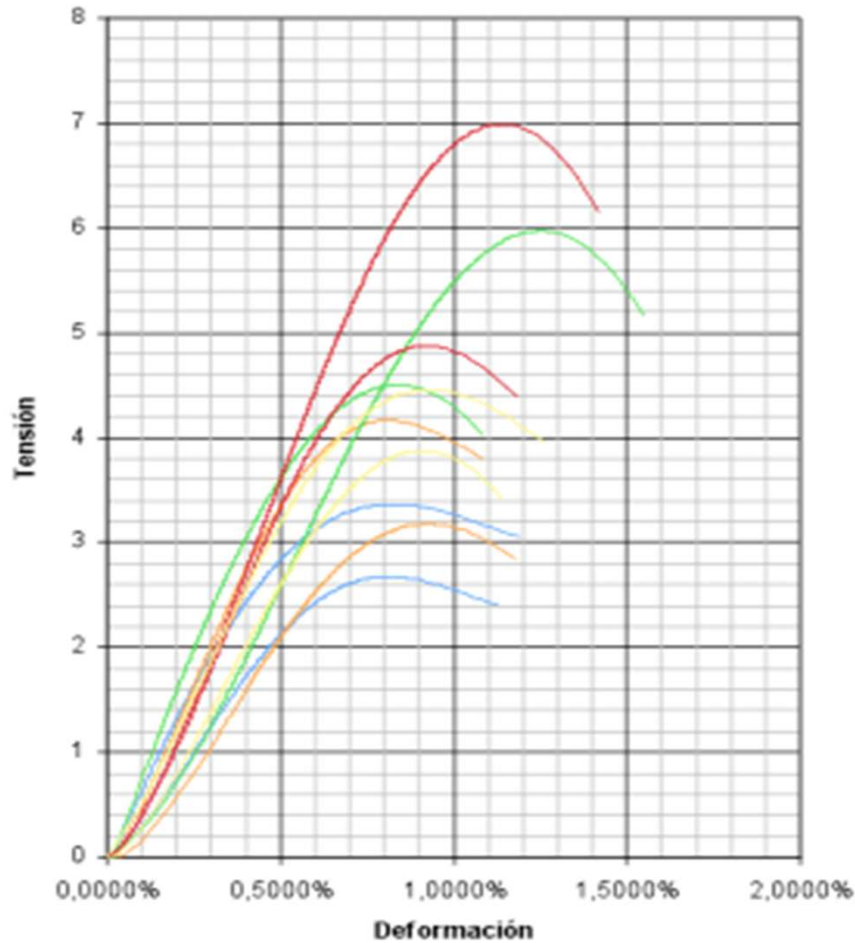
4% C. Portland



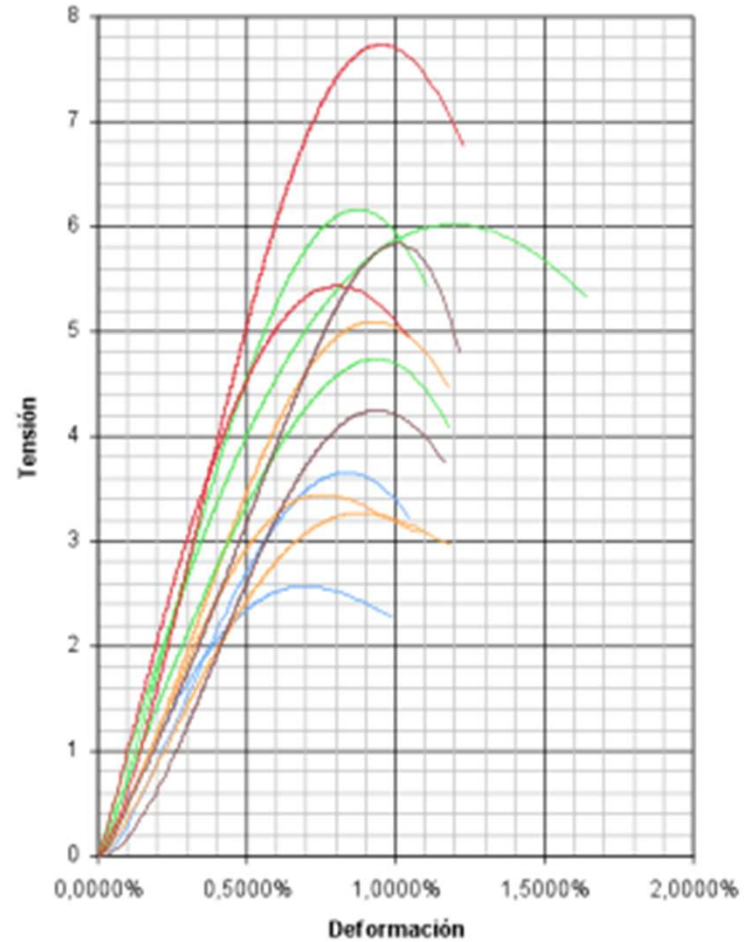
6% C. Portland

(Tesis Serigos 2009)

Resistencia a compresión simple



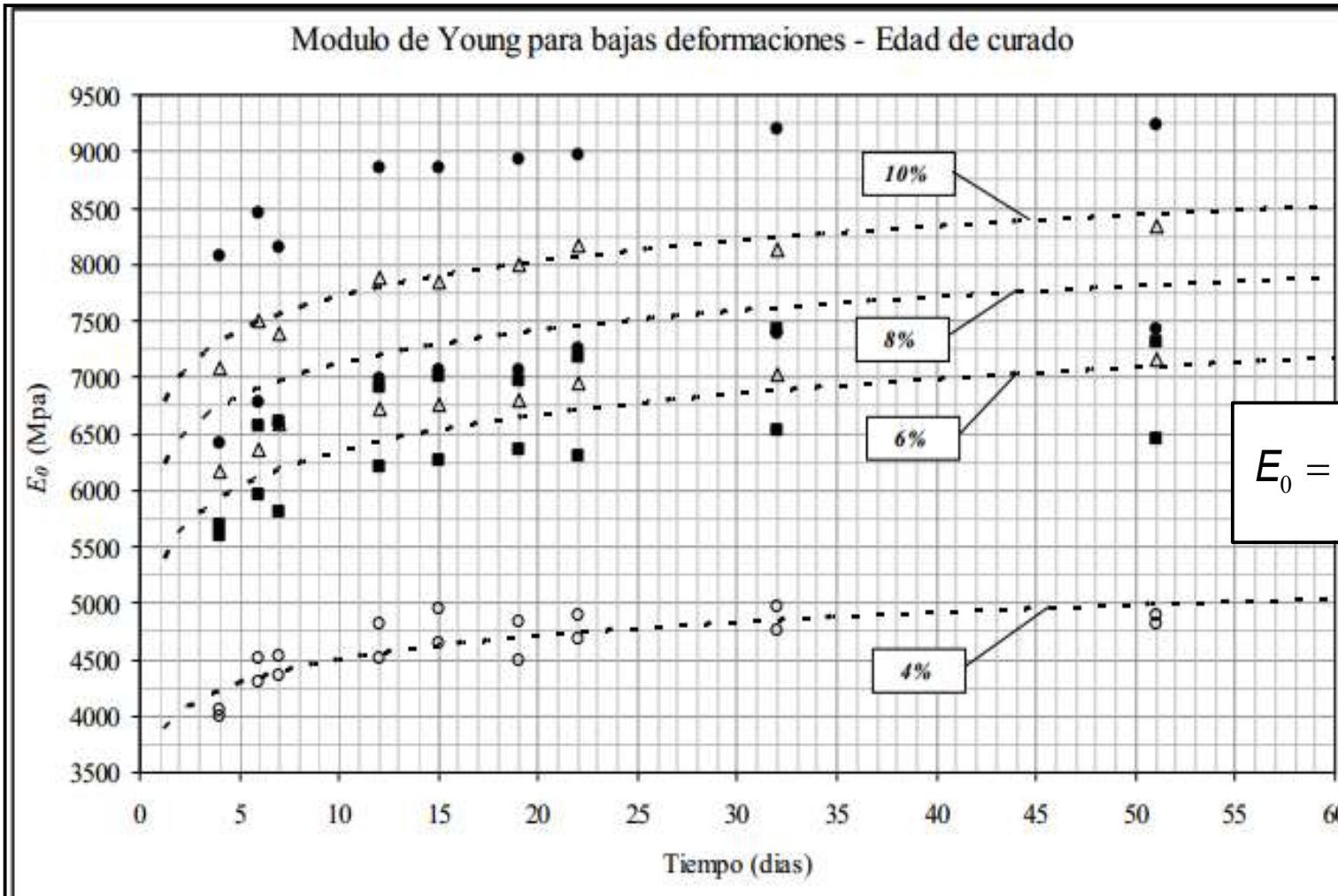
8% C. Portland



10% C. Portland

(Tesis Serigos 2009)

Rigidez a baja deformación mediante ultrasonido

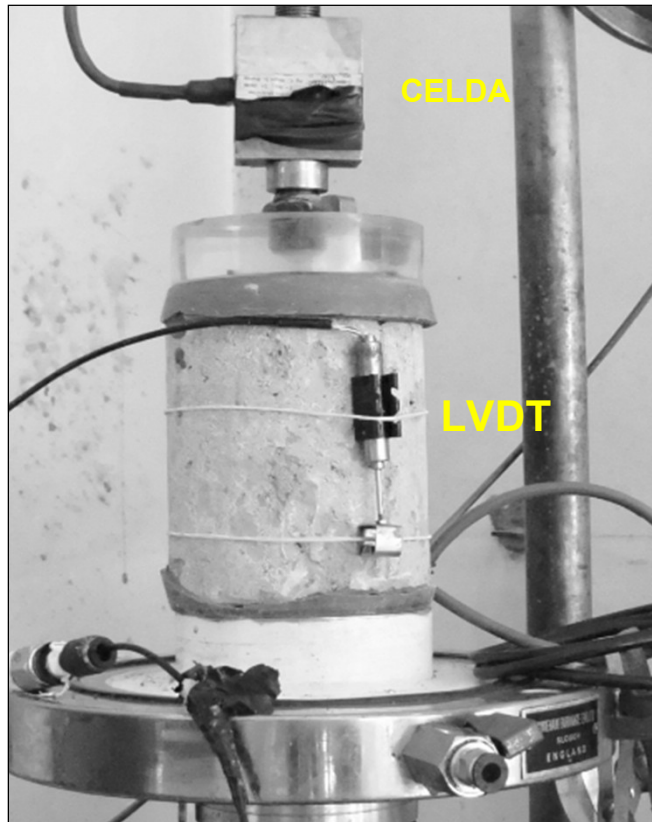


$$E_0 = v_p^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{(1 - \nu)}$$

Evolución de rigidez con el tiempo



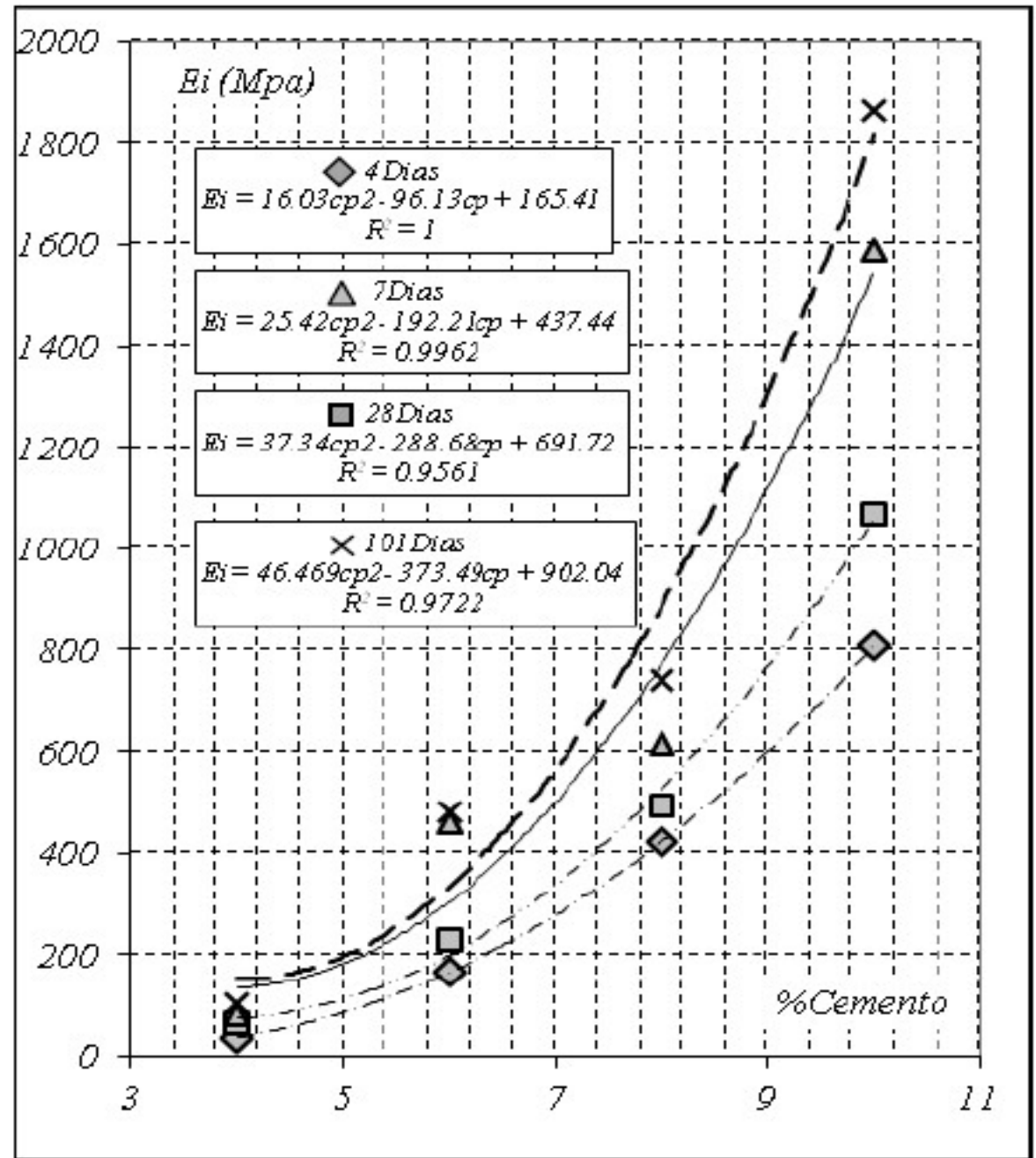
- Cuatro grupos de probetas
- Cuatro edades de curado



c_p	Nº	Tiempo de curado (días)			
[%]	[#]	4	7	28	101
4	1	X	61.7	85.4	112.3
	2	29.9	66.6	75.2	98.4
	3	43.9	65.9	86.3	97.4
	Prom	36.9	64.7	82.3	102.7
6	1	183.7	206.9	456.6	X
	2	177.2	215.3	439.9	468.6
	3	140.1	270.5	484.7	492.8
	Prom	167.0	230.9	460.4	480.7
8	1	449.2	490.9	612.5	786.0
	2	392.5	516.9	563.3	645.0
	3	X	477.0	670.9	793.4
	Prom	420.8	494.9	615.6	741.5
10	1	764.3	882.5	1122.0	999.4
	2	850.6	1203.6	1427.7	1991.2
	3	X	1117.3	2223.6	2598.4
	Prom	807.4	1067.8	1591.2	1863.8

(Tesis Laría 2012)

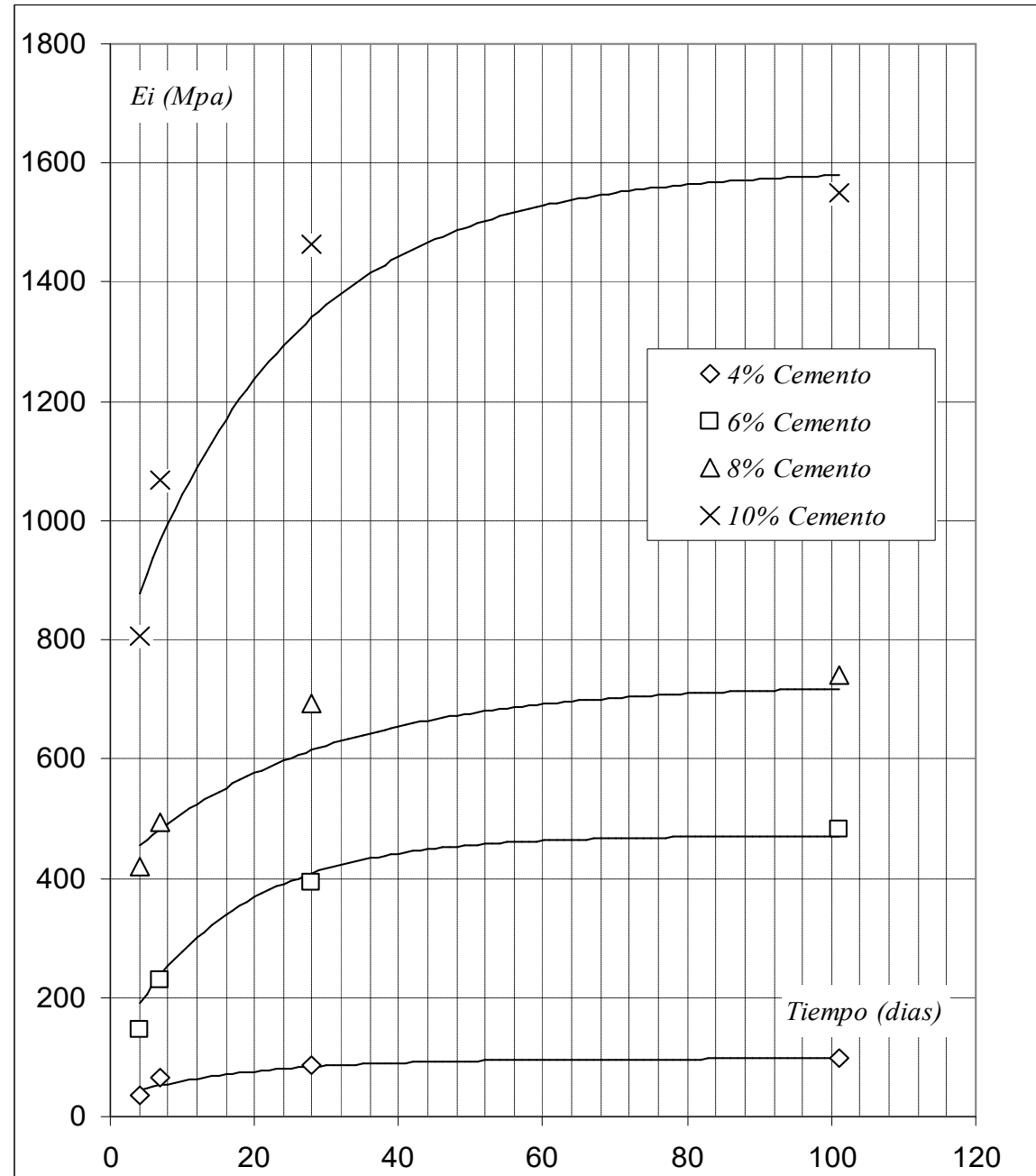
E_i vs contenido de cemento



E_i vs tiempo

Modelo cinético: la rigidez es proporcional a la concentración de agentes cementados

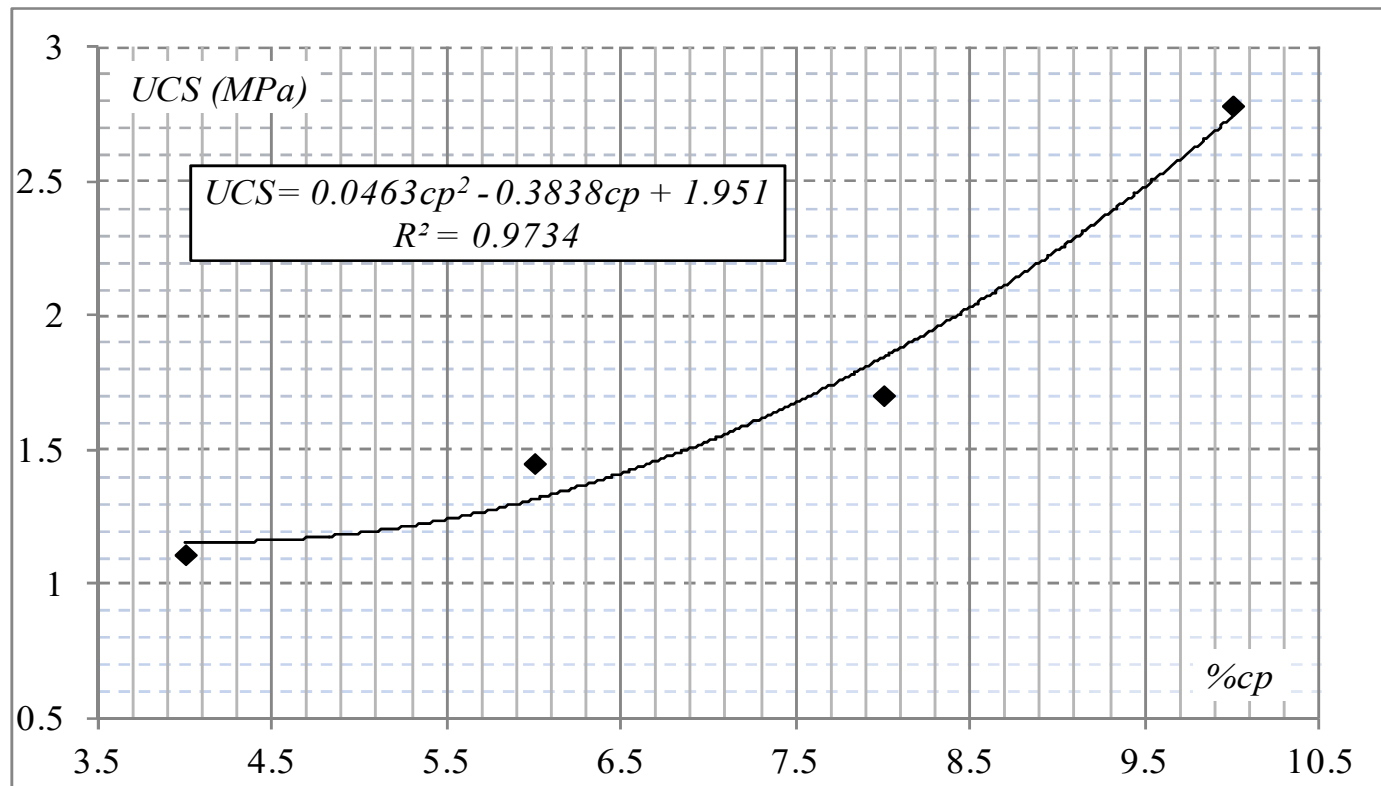
$$E_i[t] = (E_i^0 - E_i^\infty)e^{-\frac{t}{\tau}} + E_i^\infty$$





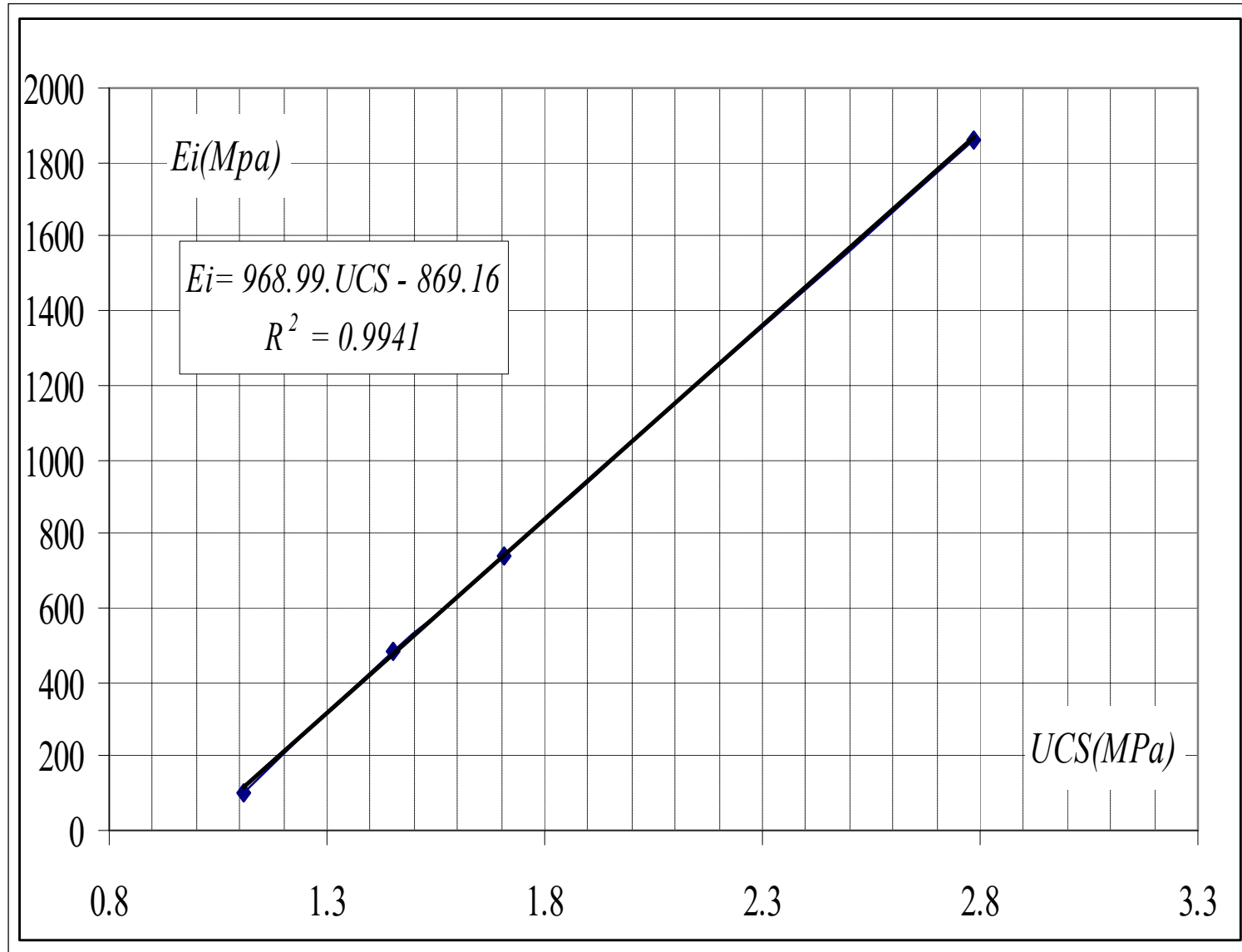
UCS vs contenido de cemento

La resistencia tiene una dependencia del contenido de cemento muy similar a la de la rigidez





UCS vs E_i



Resumen



- Comprender la importancia de la compactación de suelos.
- Conceptos de peso unitario seco máximo, humedad óptima.
- Verificar el trabajo de campo mediante controles de compactación en obra.
- Especificar los equipos adecuados para efectuar una compactación.
- Comprender la mejora del comportamiento que produce el agregado de cemento en el suelo.

Bibliografía



Básica

- Jiménez Salas y otros. Geotecnia y Cimientos. Ed. Rueda
- Holtz & Kovacs. An introduction to geotechnical engineering.

Complementaria

- Sagüés, P. (2008). Rigidez a baja deformación en el Pampeano Compactado. Tesis de grado, LMS, FIUBA.
- Serigós, P. (2009). Rigidez a baja deformación de mezclas de suelo de la Fm Pampeano y Cemento Portland. Tesis de grado, LMS, FIUBA.
- Laría, T. (2012). Rigidez a baja deformación de Suelo Cemento mediante técnicas directas de medición. Tesis de grado, LMS, FIUBA.