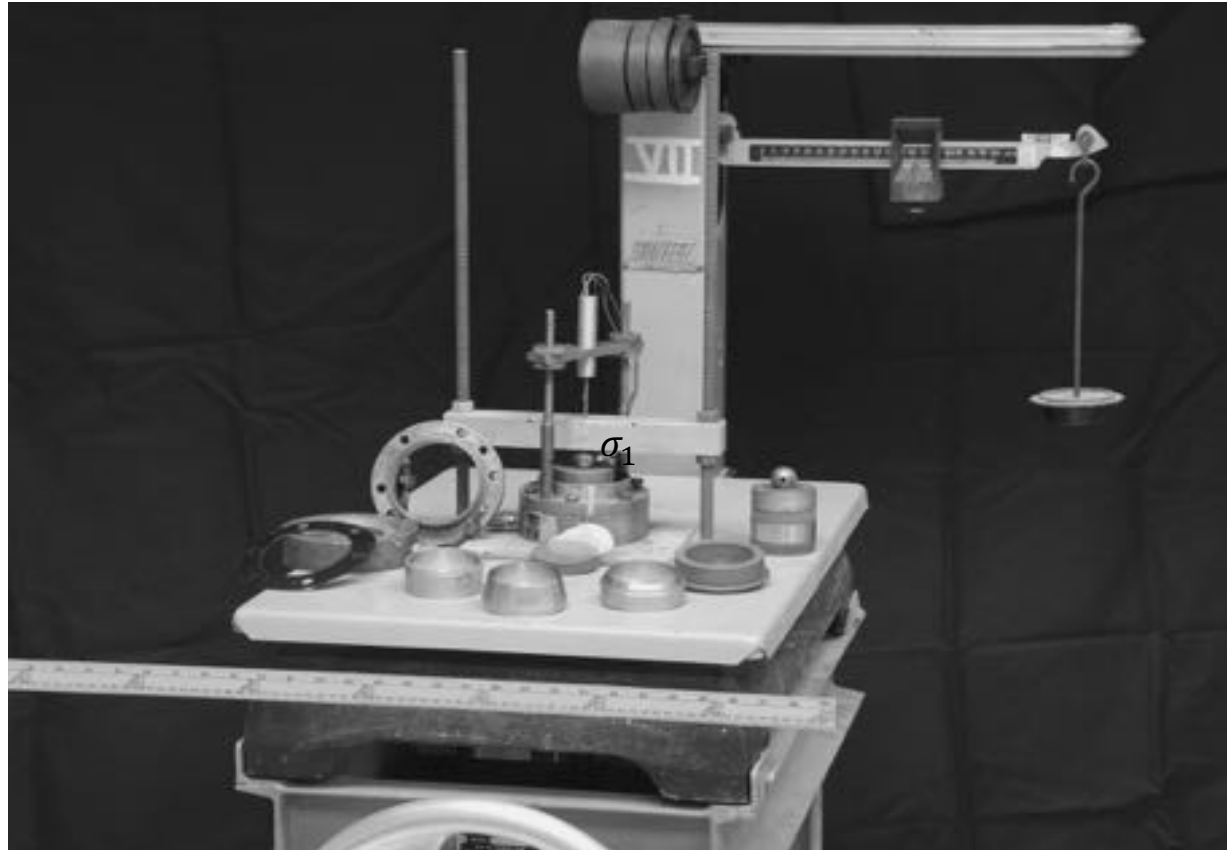


Clase de laboratorio 04: Compresión edométrica



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

Índice



- Equipo de consolidación
- Calidad de muestra
- Ejemplo de ensayo
- Ensayos en suelos normalmente cons. ($OCR \sim 1.0$)
- Ensayos en suelos leve-mediana. precons. ($OCR > 1.0$)
- Ensayos en suelos fuertemente precons. ($OCR \gg 1.0$)
- Determinación de carga de preconsolidación σ'_p
- Asentamientos excesivos en Aeropuerto de Kansai (Japón)

Equipo de consolidación



- Brazo de palanca o pórtico
- Anillo edométrico, cabezal
- Piedras porosas
- Papeles filtro
- Pesas
- Flexímetro



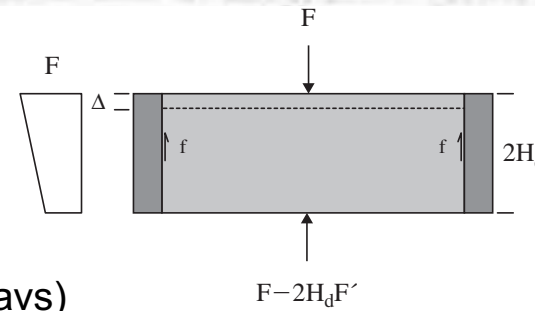
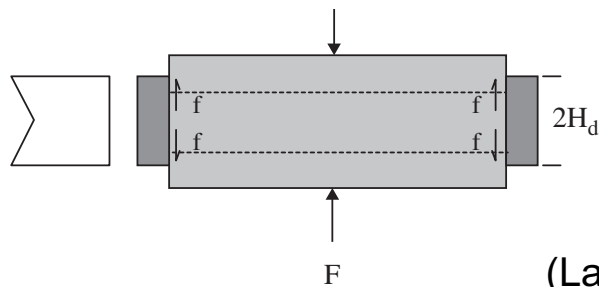
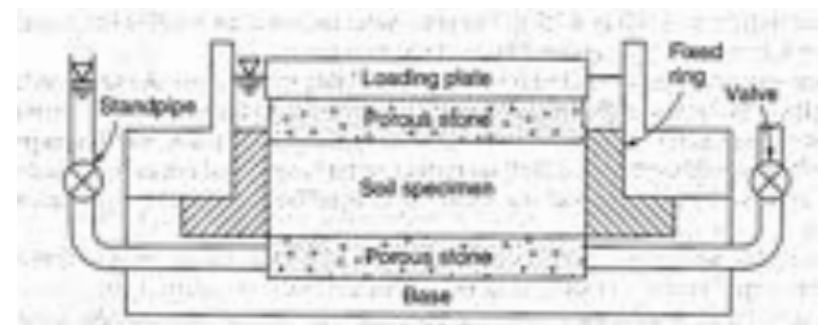
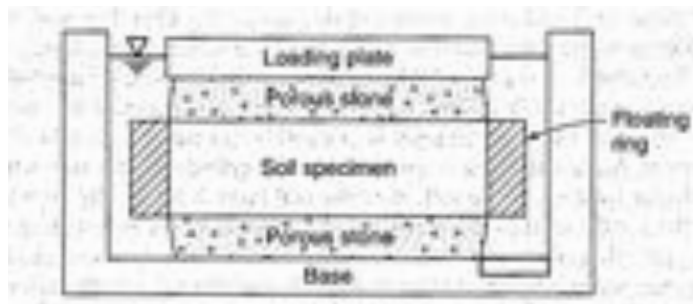


El edómetro

- Las condiciones edométricas implican:

$$\epsilon_V = \epsilon_1 = \frac{\Delta h_1}{h_0} \quad \epsilon_2 = \epsilon_3 = 0 \quad \sigma_1, \sigma_2 \text{ y } \sigma_3 \neq 0$$

- Anillo flotante: menor fricción suelo-anillo
- Anillo rígido: posibilidad de poder determinar k



(Lambe 1951 - Holtz & Kocavs)

El edómetro



Anillo flotante



Anillo rígido

Videos



- Ensayo consolidación
 - <https://www.youtube.com/watch?v=5kuw6-axQlw>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=-I9c697jj3E>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=oK1G7r13GRU>
- Extracción de muestra
 - <https://www.youtube.com/watch?v=6HWi6iZKciU>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=4hCXQbkbEal>

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.

Calidad de la muestra de suelos



- La extracción de una muestra de suelo siempre produce una alteración de su estructura ($\Delta e_0 \rightarrow \Delta \gamma_{d_0}$)
- Reducir el grado de perturbación mediante el uso de sacatestigos aptos para obtención de muestras **clase 1**

Calidad	Propiedades que pueden ser determinadas de manera confiable
Clase 1	Clasificación, humedad natural, pesos unitarios, parámetros de resistencia, rigidez y consolidación
Clase 2	Clasificación, humedad natural y pesos unitarios
Clase 3	Clasificación y humedad natural
Clase 4	Clasificación
Clase 5	Ninguna. Únicamente para determinar la secuencia estratigráfica

Calidad de muestra: sacatestigos de Pistón Fijo y tubos shelby



- Tubos de pared delgada
- Apto en suelos blandos
- Reducida alteración



Muestra extraída con Pistón Fijo

Sacatestigo de Pistón Fijo

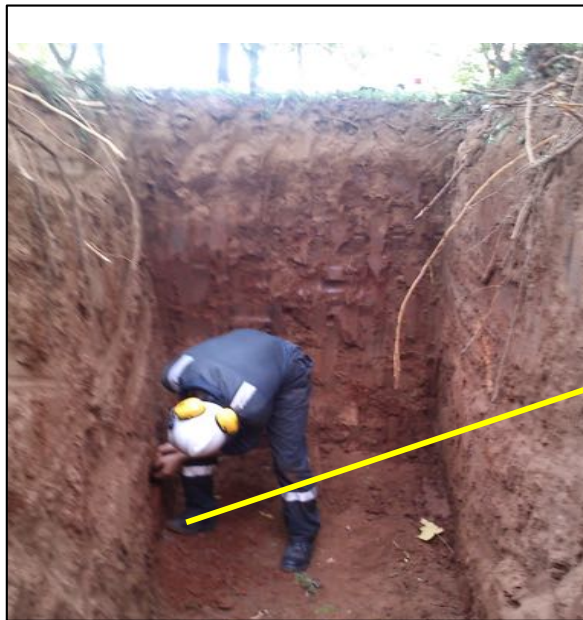


Tubo Shelby ($\phi=70\text{mm}$)

Calidad de muestra: sacatestigo de Pistón Fijo, tubos shelby y damas



- Tubos Shelby: presión mecánica
- Pistón Fijo: presión neumática
- Damas: extracción superficial en forma manual, prácticamente “inalterada”

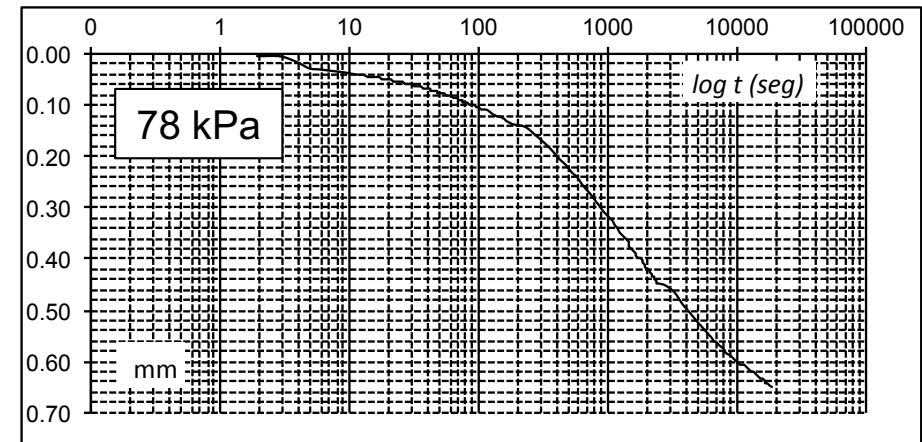
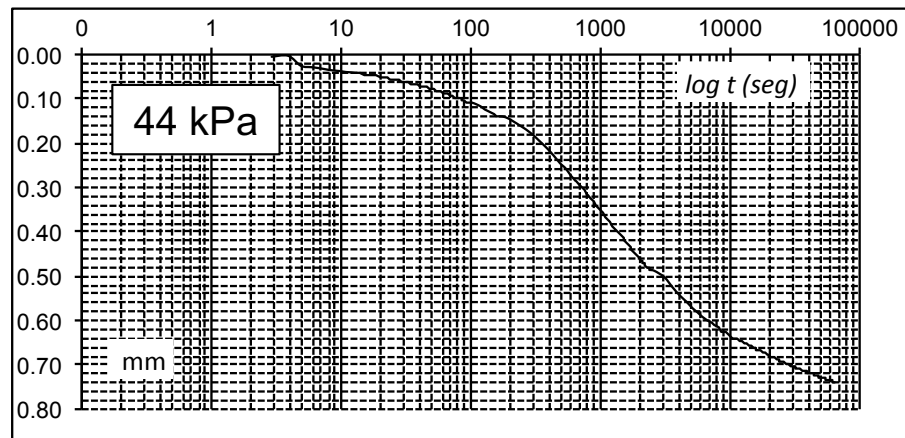
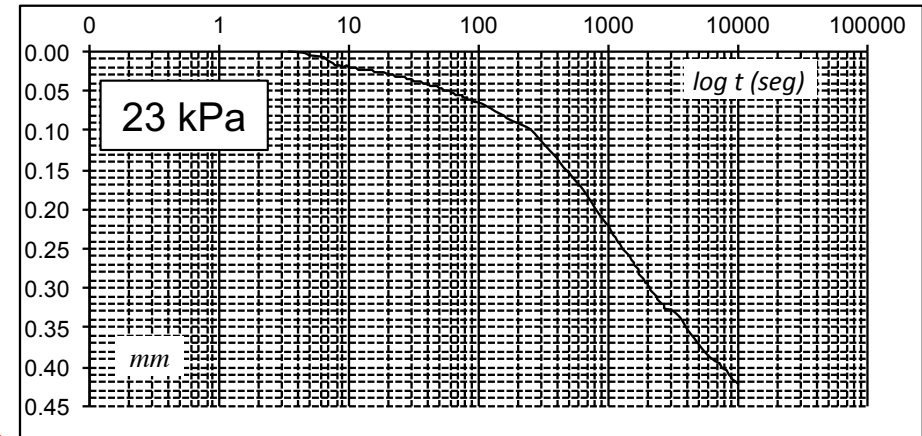
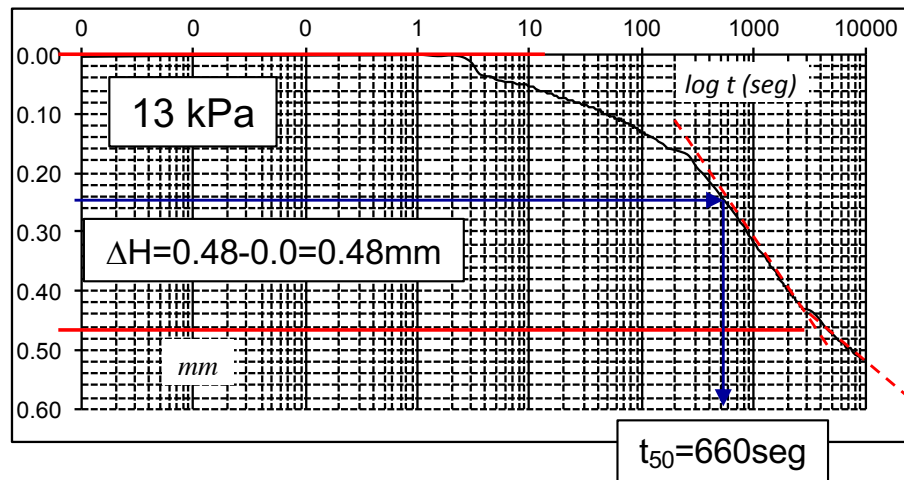


Calicata a cielo abierto para extracción de dama



Un resultado de ensayo

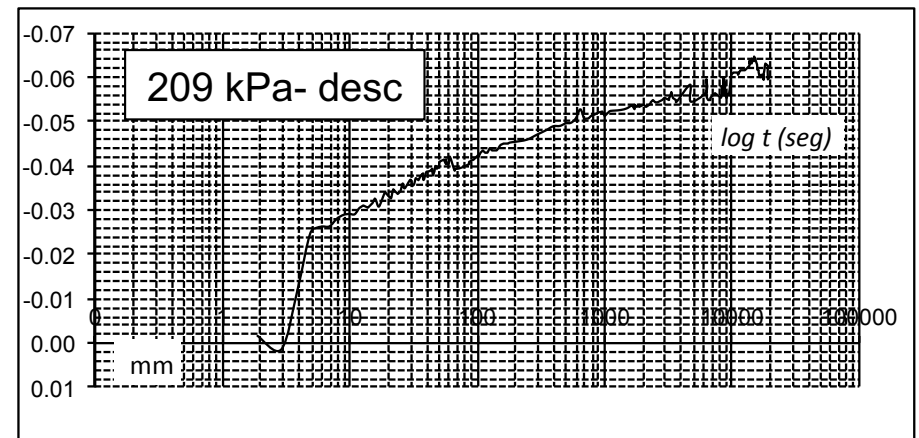
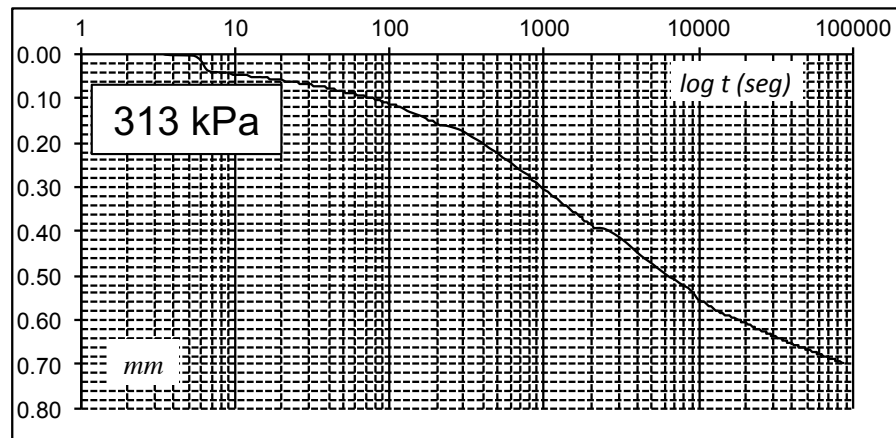
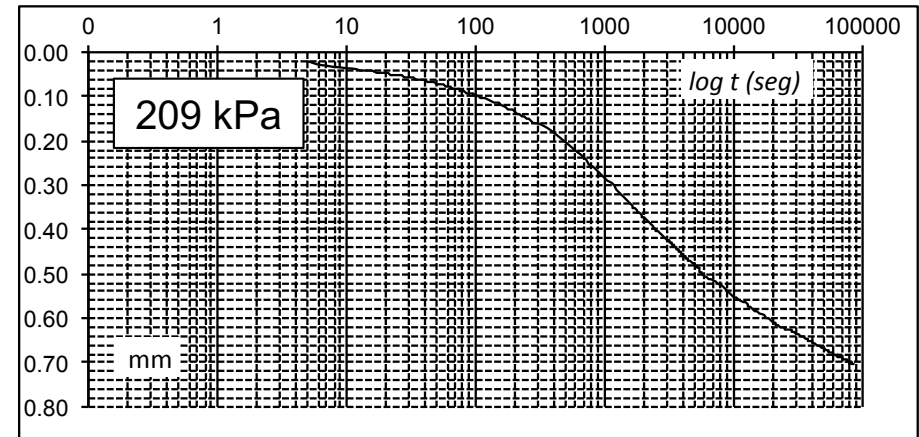
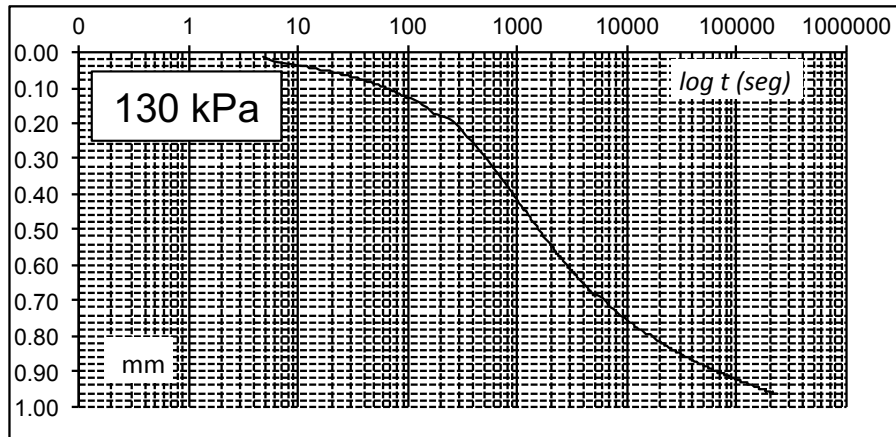
- 7 escalones de carga y 3 de descarga (LIR= 0.5-0.8)





Un resultado de ensayo

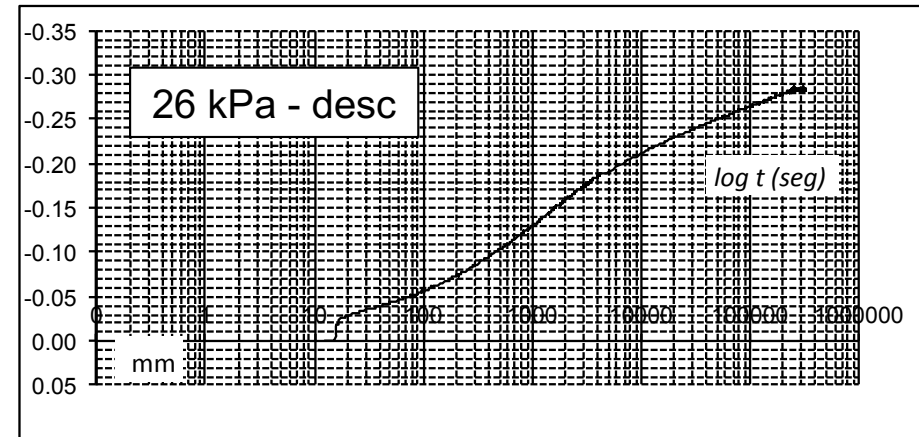
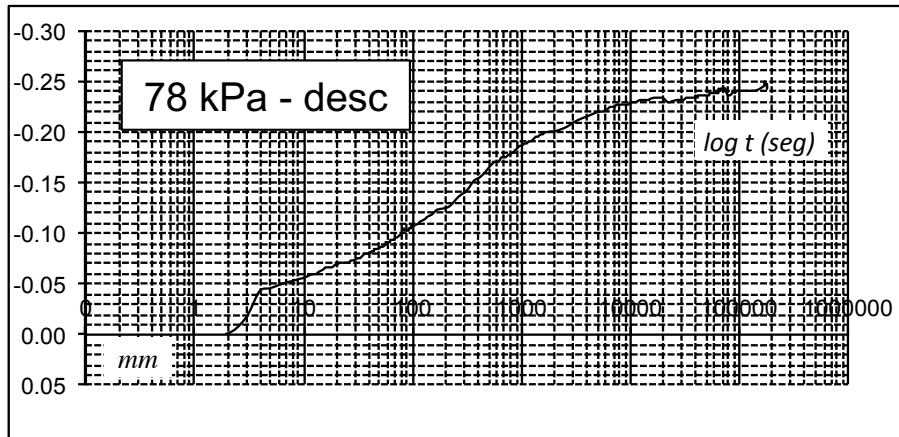
- 7 escalones de carga y 3 de descarga (LIR= 0.5-0.8)



Un resultado de ensayo



- 7 escalones de carga y 3 de descarga (LIR= 0.5-0.8)



- Planilla de resultados

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL		S2	Universidad de Buenos Aires - Facultad de Ingeniería	
		6m	Lab. Materiales & Estructuras - Área Mec. De Suelos	
Fecha: 14/11/2013 al 25/11/2013		Condiciones higrótérmicas: T= 27° +/- 2° ; HR= 75 - 85%		
Operador: -		Normas de trabajo: ASTM D1587, D2216, D2435, D2487		
Material ensayado: USCS: CH	G _s : 2.71	#200: 100	LP: 35	LL: 88
PREPARACION MUESTRA Y PROCEDIMIENTO				
Extracción de muestra por avance de pistón.		Tipo de edómetro: anillo flotante		
Tallado perimetral y en altura con herramientas de corte manuales.		Medición de deformación: transductor LVDT, precisión +/-0.006mm		



Un resultado de ensayo

RESULTADOS DE CADA ESCALÓN DE CARGA											
σ' (kPa)	ΔH (mm)	ΔH_{ac} (mm)	H ($H_o - \Delta H_{ac}$)	Δe ($\Delta H_{ac}/H_s$)	e ($e_o - \Delta e$)	$H/2$ (mm)	$\sim t_{50}$ (seg)	C_v (cm ² /seg)	a_v (kPa ⁻¹)	m_v (kPa ⁻¹)	k (cm/seg)
2	0.27	0.27	16.23	0.05	1.79	Precarga (seating pressure)					
13	0.48	0.75	15.75	0.13	1.71	7.87	660	1.85E-04	7.79E-03	2.88E-03	5.22E-08
23	0.41	1.16	15.34	0.20	1.64	7.67	850	1.36E-04	6.76E-03	2.56E-03	3.43E-08
44	0.61	1.78	14.72	0.31	1.53	7.36	750	1.42E-04	5.06E-03	2.00E-03	2.79E-08
78	0.63	2.41	14.09	0.41	1.42	7.04	950	1.03E-04	3.21E-03	1.33E-03	1.34E-08
130	0.80	3.21	13.29	0.55	1.28	6.64	1100	7.90E-05	2.64E-03	1.15E-03	8.95E-09
209	0.69	3.90	12.60	0.67	1.17	6.30	1050	7.45E-05	1.51E-03	6.95E-04	5.08E-09
313	0.68	4.58	11.92	0.79	1.05	5.96	1000	7.00E-05	1.12E-03	5.49E-04	3.77E-09
209	-0.048	4.53	11.97	0.78	1.06	5.98	-	-	-	-	-
78	-0.23	4.30	12.20	0.74	1.10	6.10	-	-	-	-	-
26	-0.27	4.03	12.46	0.69	1.14	6.23	-	-	-	-	-

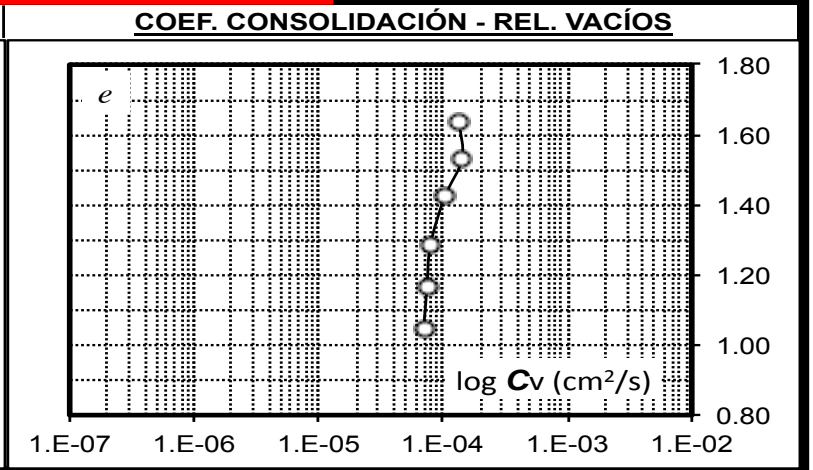
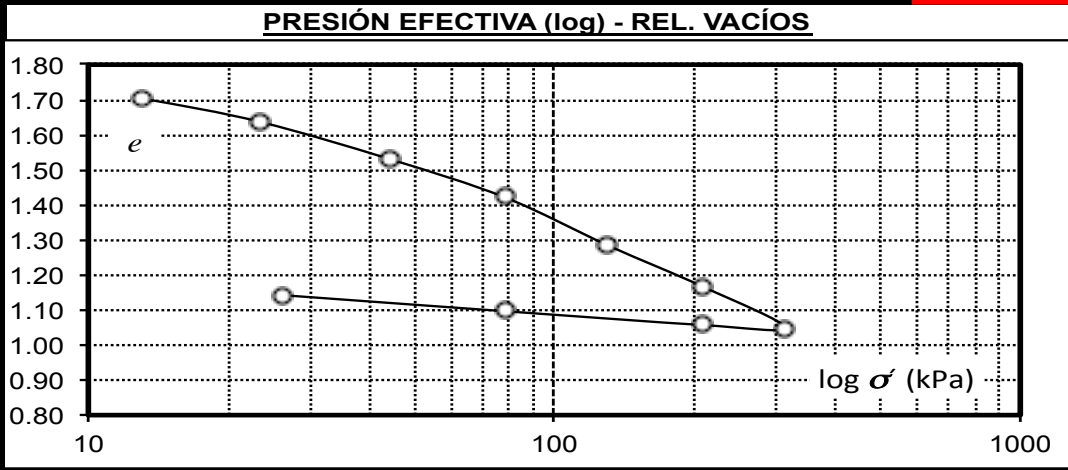
NOTA: Se alcanzó la consolidación primaria en todos los escalones de carga.

DATOS MUESTRA ENSAYADA						PARÁMETROS		
INICIALES			FINALES					
e_o	1.84	-	e_f	1.17	-	C_c	0.62	
ω_o	67.84	%	ω_f	43.10	%	C_r	0.087	
γ_{do}	9.20	kN/m ³	γ_{df}	12.05	kN/m ³	C_v	8.2E-05	cm ² /seg
Sr_o	100.21	%	Sr_f	100.23	%	k	5.9E-09	cm/seg
						p_c	-	kPa

$$C_v = \frac{T_{50} \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^2}{t_{50}}$$

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p'}$$

$$k = C_v \cdot \gamma_w \cdot m_v \quad m_v = \frac{a_v}{1+e}$$



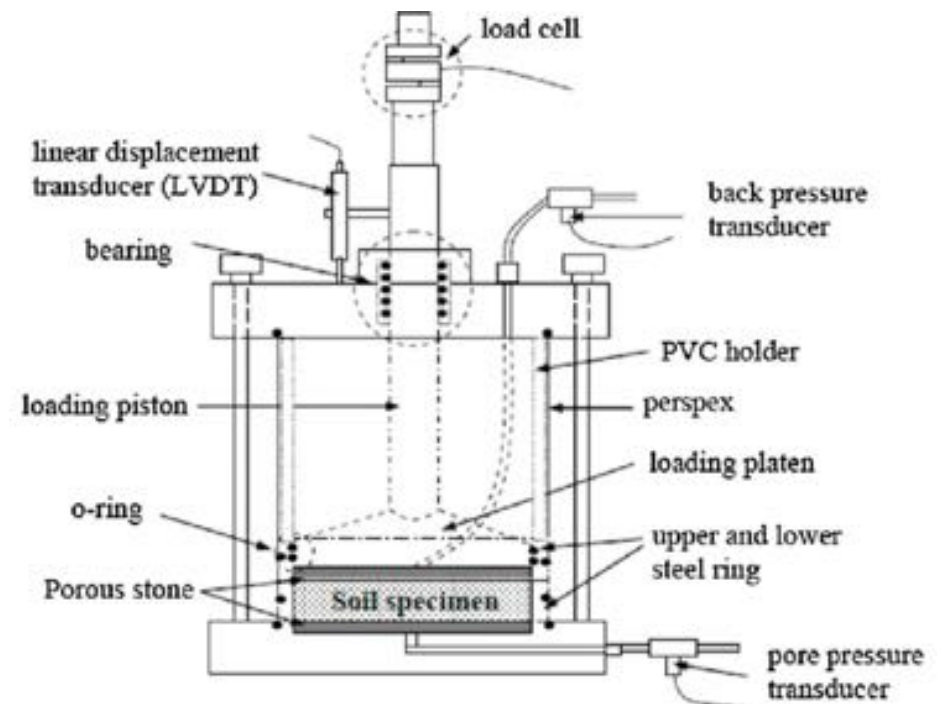
¿La muestra está normalmente consolidada o preconsolidada?

Ensayo de consolidación (CRS)

Incremento constante de deformación



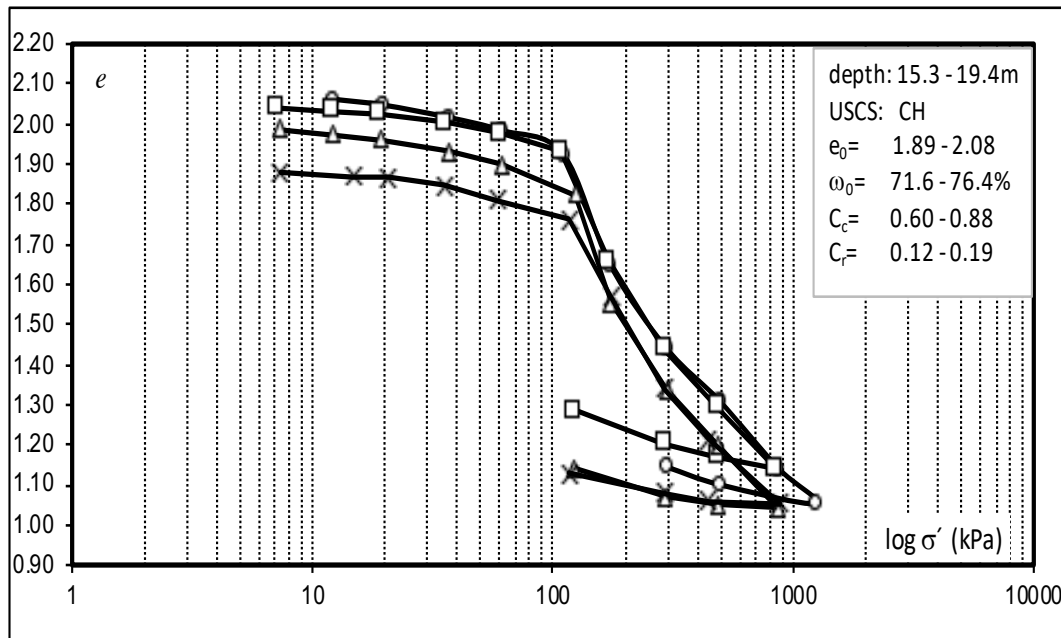
- Mide la carga aplicada para un incremento constante de deformación. (ASTM D 4186)
- Permite **saturar la muestra y medir las presiones de poro** medida que se realiza el ensayo.
- Al conocer las presiones de poro, podemos determinar la tensión efectiva
- Lleva menos tiempo
- Es más costoso



Curvas de consolidación para suelos normalmente consolidados



- Campana, Bs As
- suelos del Pospampeano (arcillas plásticas), origen fluvial
- $OCR \sim 1.0$



(Codevilla & Sfriso, 2019)

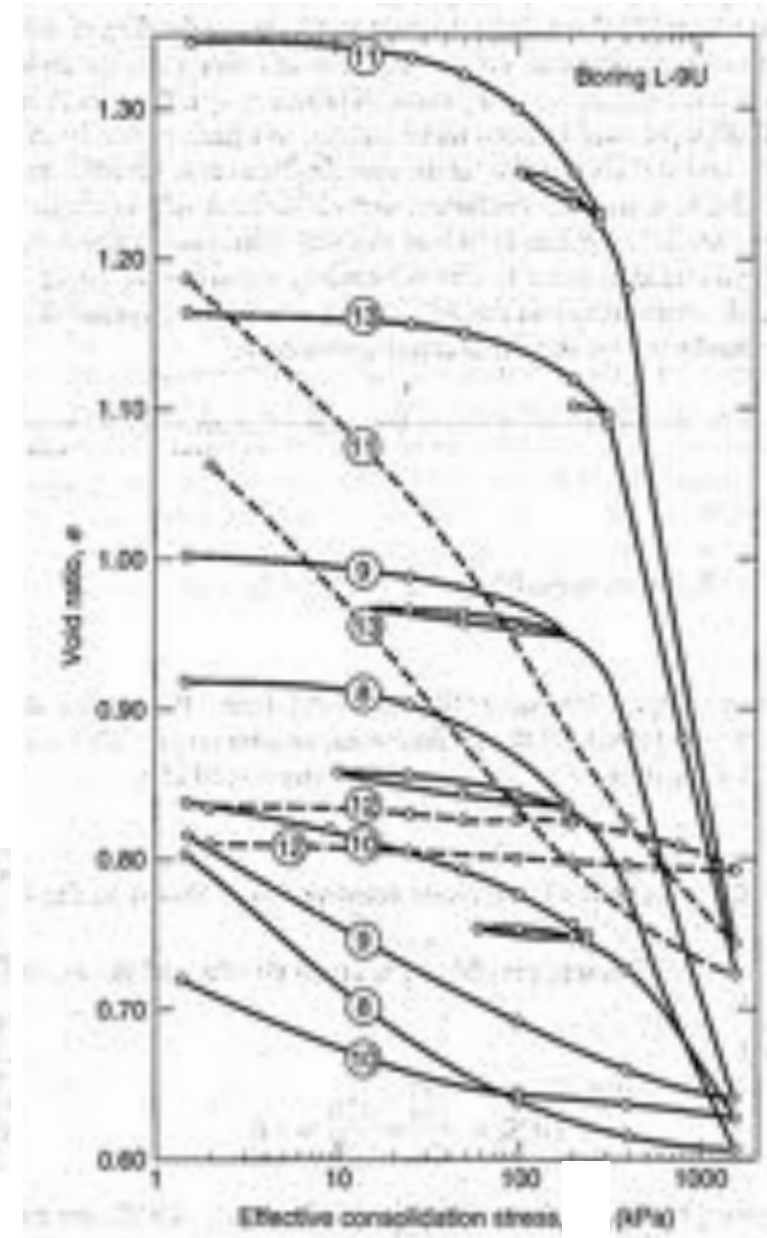


Curvas de consolidación para suelos leve-median. preconsolidados

- valle inferior río Mississippi, USA
- $1.0 < OCR < 1.5$
- preconsolidación por ciclos de humedecimiento y secado durante deposición ($\Delta u \rightarrow \Delta \sigma'$)
- observar muestra 12

Test No.	Elev. (m)	Classification	Atterberg limits			w_p (%)	e_0	σ'_{pc} (kPa)	σ'_p (kPa)	C_c
			LL	PL	PI					
8	-8.8	CL-clay, soft	41	24	17	34.0	0.94	160	200	0.34
9	-9.8	CL-clay, firm	50	23	27	36.4	1.00	170	250	0.44
10	-17.1	ML-sandy silt	31	25	6	29.8	0.83	230	360	0.16
11	-20.1	CH-clay, soft	81	25	56	50.6	1.35	280	350	0.64
12	-23.2	SP-sand	Nonplastic			27.8	0.83	320	-	-
13	-26.2	CH-clay with strata	71	28	43	43.3	1.17	340	290	0.52

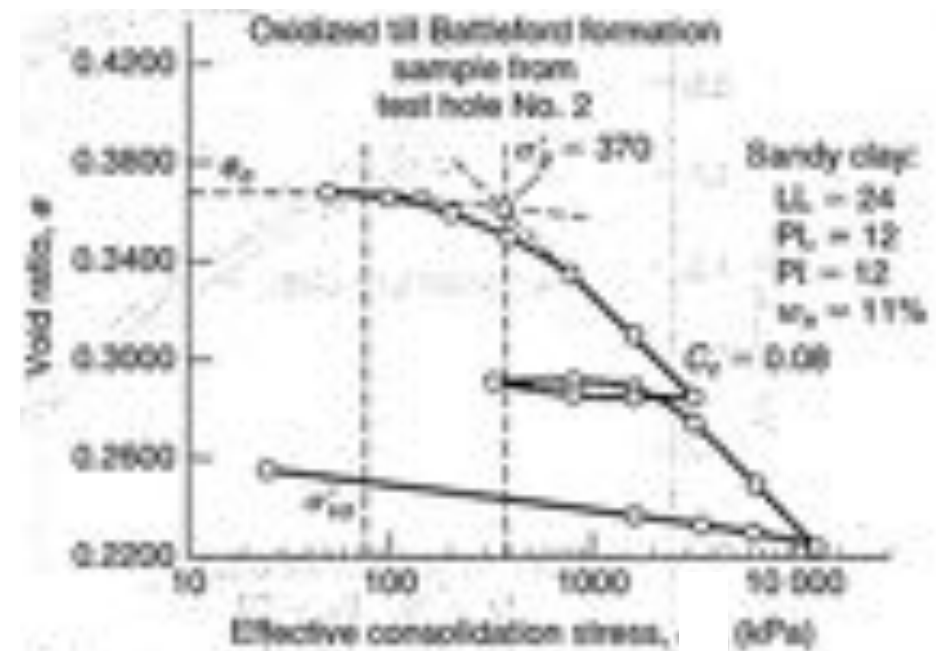
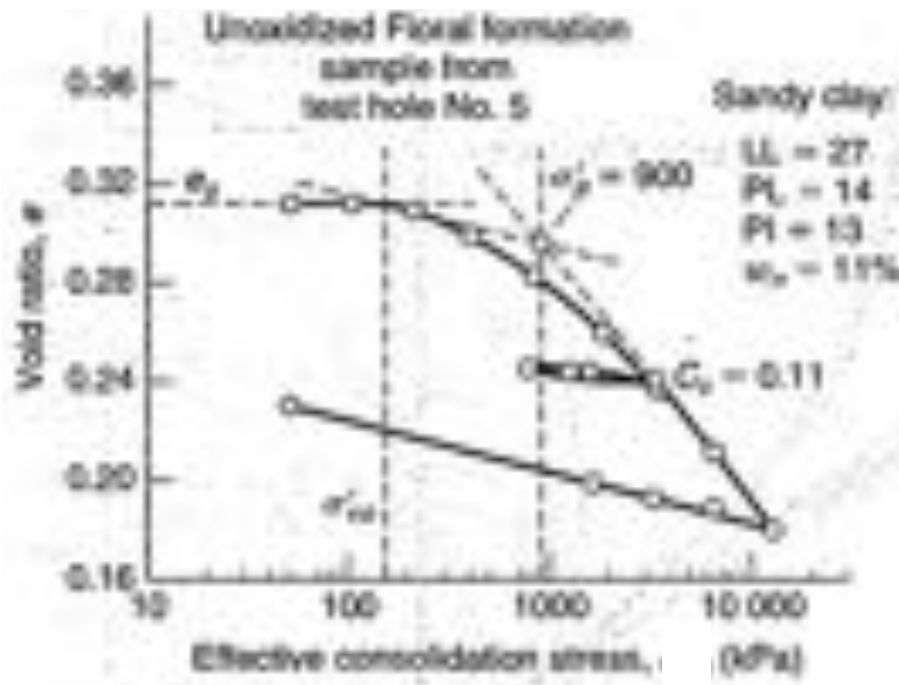
(after Kaufman & Sherman, 1964)





Curvas de consolidación para suelos fuertemente preconsolidados

- suelos de origen glacial (tills), Canadá
- $OCR > 4.0 - 5.0$
- observar valores e_0 (muy bajos)



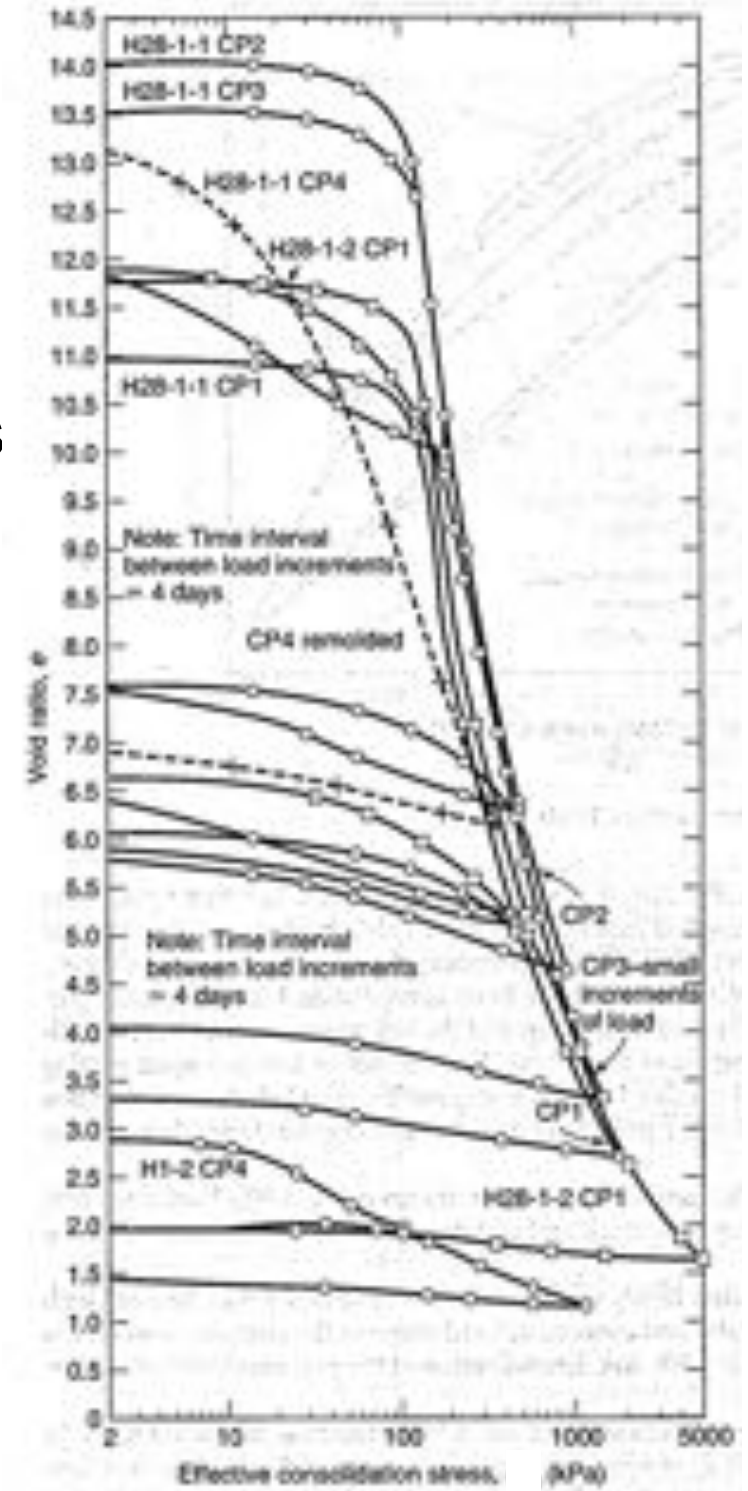
(after Mc Donald & Sauer, 1970)

Curvas de consolidación de arcillas Ciudad de México

- presencia de alófanas y microfósiles en su estructura mineral
- $e_0 > 10$, $C_c > 1.0$!!!
- elevada compresibilidad C_c en rama normalmente consolidada



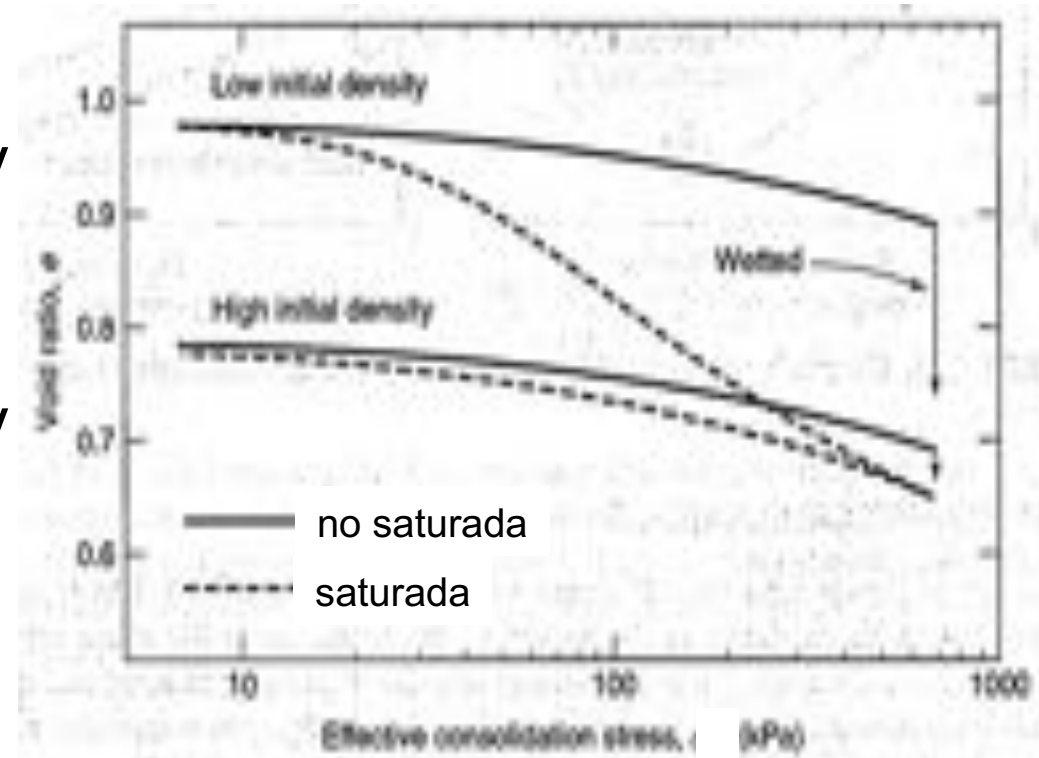
(Rutledge, 1944)



Curvas de consolidación para suelos colapsibles



- Suelos loésicos cuenca del río Missouri, USA
- Distinto comportamiento para condición saturada y no saturada
- Similar comportamiento para condición saturada y carga > 600 kPa
- ¿ Es conveniente saturar previamente el terreno?

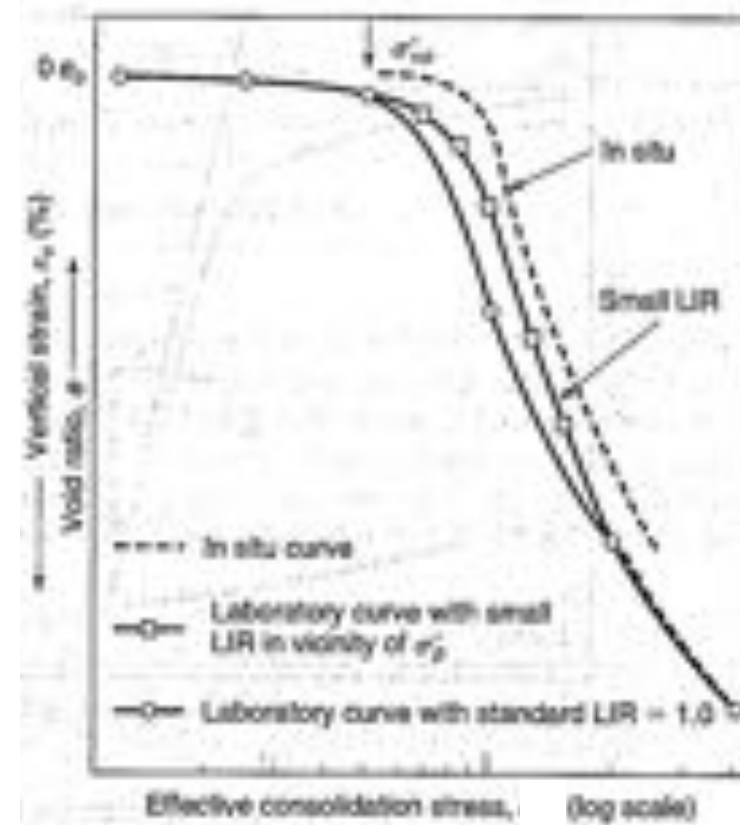
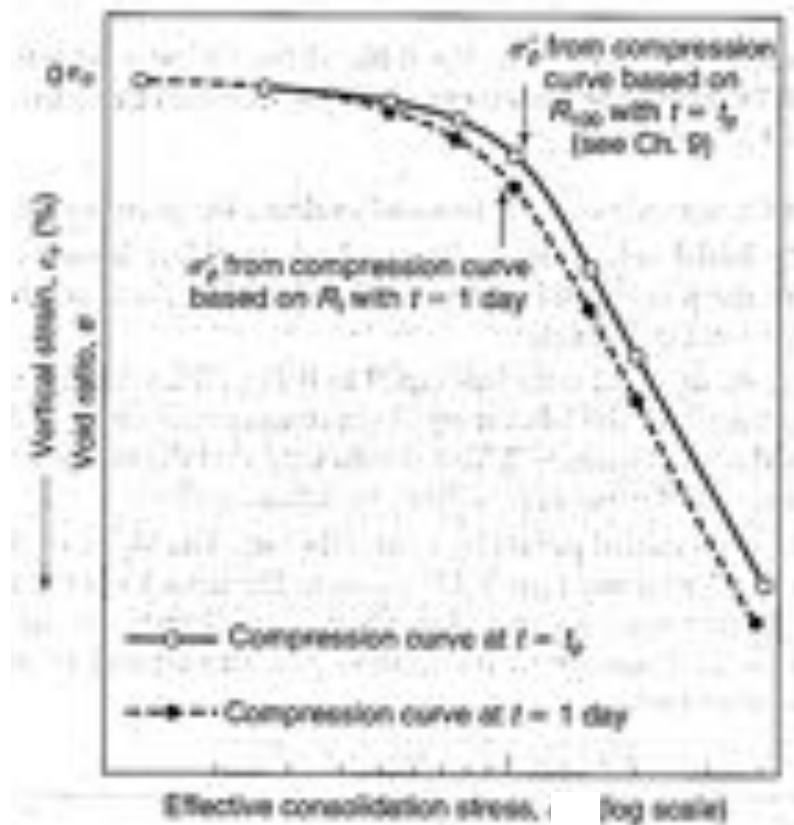


(after Clevenger, 1958)



Factores que afectan la determinación de carga de preconsolidación σ'_p

- Escalonamiento de carga (*LIR*)
- Duración de carga (*t*)

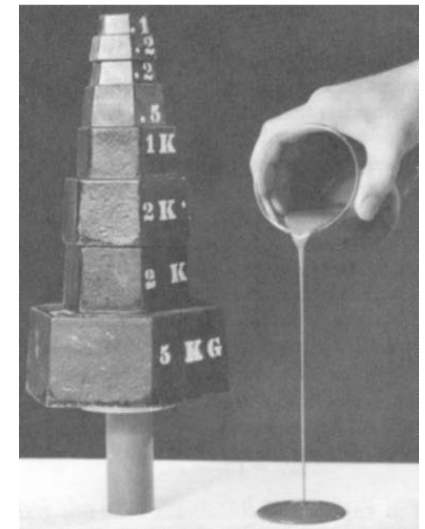
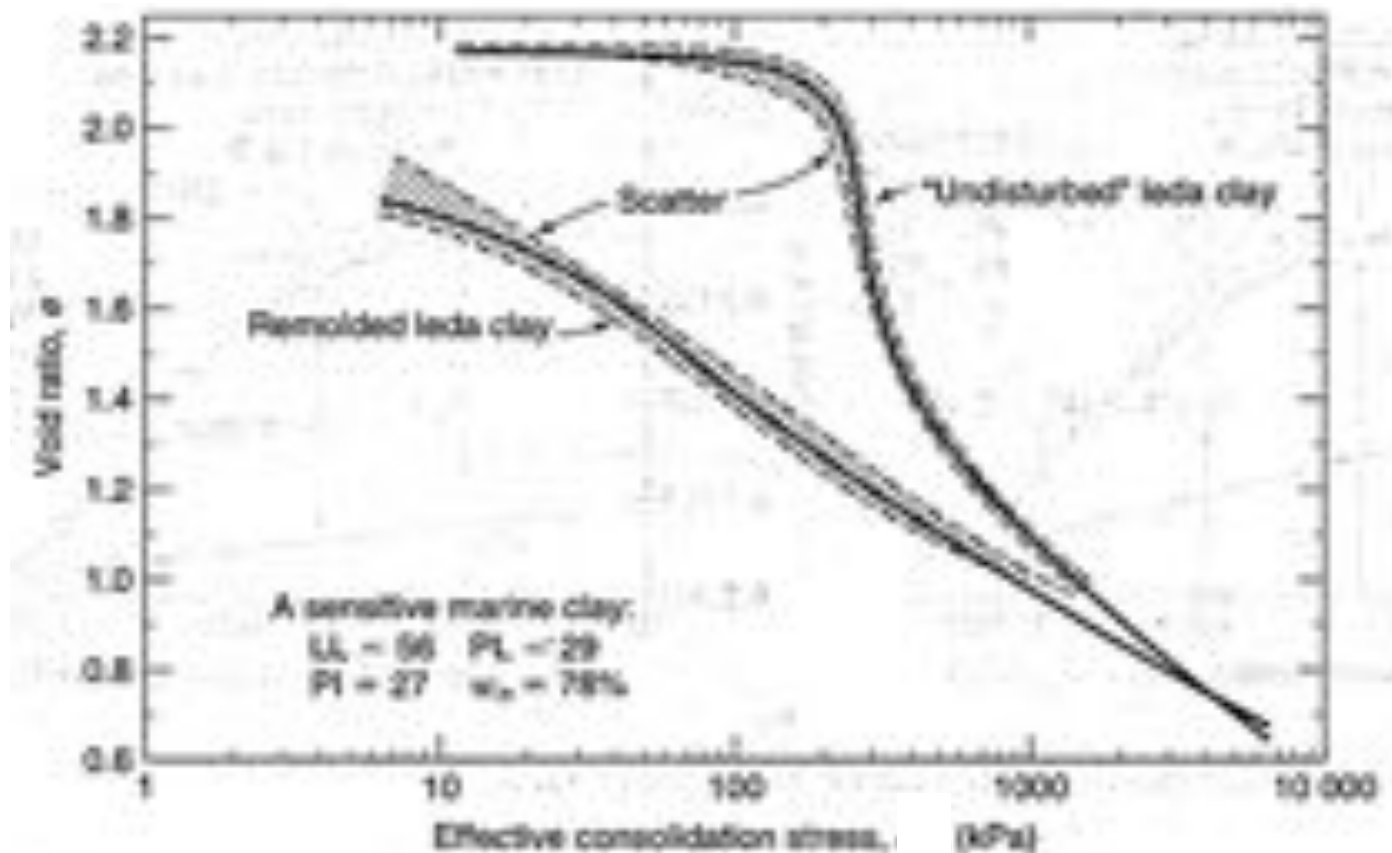


(after Brumund et al, 1976)



Factores que afectan la determinación de carga de preconsolidación σ'_p

- Calidad de muestra



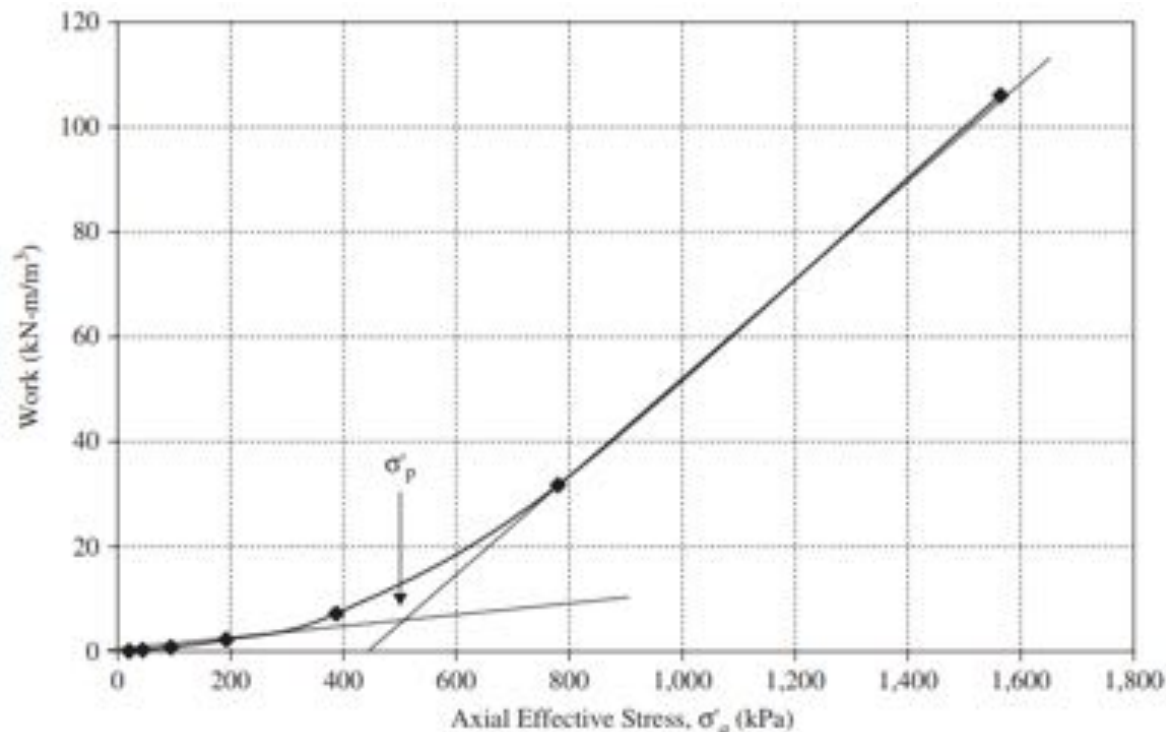
(after Quigley & Thompson, 1966)



Determinación de carga de preconsolidación σ'_p

- Método clásico: construcción gráfica (Casagrande)
- Método alternativo: cálculo de energía de deformación

$$W_j = \int \sigma_1 d\epsilon_1 + \sigma_2 d\epsilon_2 + \sigma_3 d\epsilon_3 = \int \sigma_1 d\epsilon_1 \sim \sum_{m=1}^j \left(\frac{\sigma_m + \sigma_{m-1}}{2} \right) \left(\ln \frac{1 - \epsilon_{m-1}}{1 - \epsilon_m} \right)$$



σ_m, ϵ_m : tensión-deformación
escalón de carga actual

$\sigma_{m-1}, \epsilon_{m-1}$: tensión-deformación
escalón de carga anterior

Aeropuerto de Kansai (KIA)



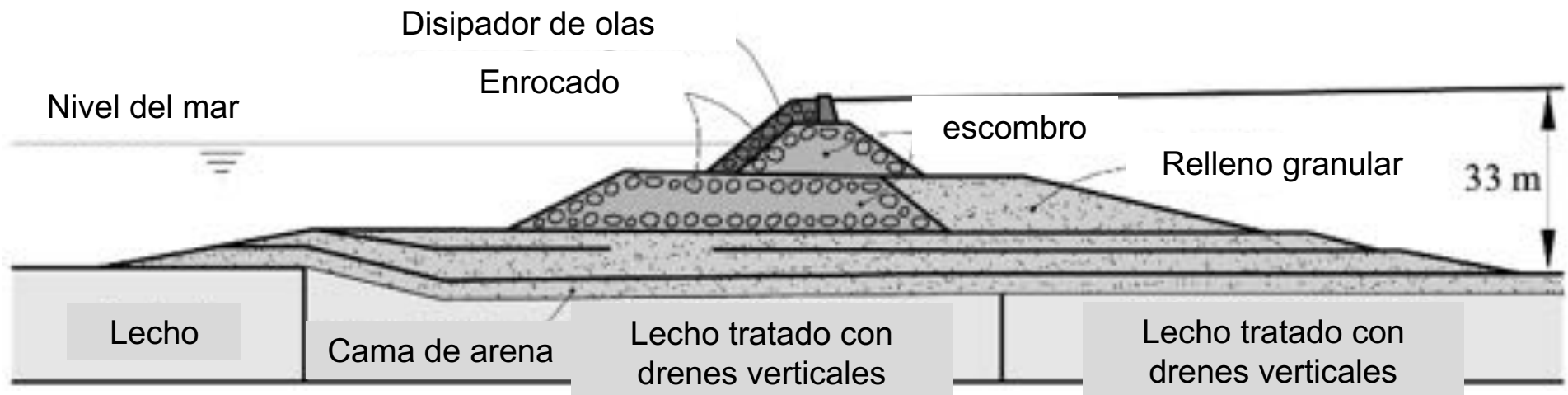
- Ubicado en la Bahía de Osaka
- Islas artificiales de 1.25 x 4km, 5km de distancia a la costa
- Profundidad media aguas: 18m
- 5 años de construcción para fase I (Ene 1987 – Dic 1991)
- Se registraron asentamientos no previstos antes y durante la construcción
- Fuerte impacto económico y retraso del proyecto



Aeropuerto de Kansai (KIA)



- Isla artificial fase I
 - Instalación de drenes verticales en lecho
 - 180M m³ relleno granular en 33m altura
 - Consolidación de lecho (arcillas y arenas intercaladas)

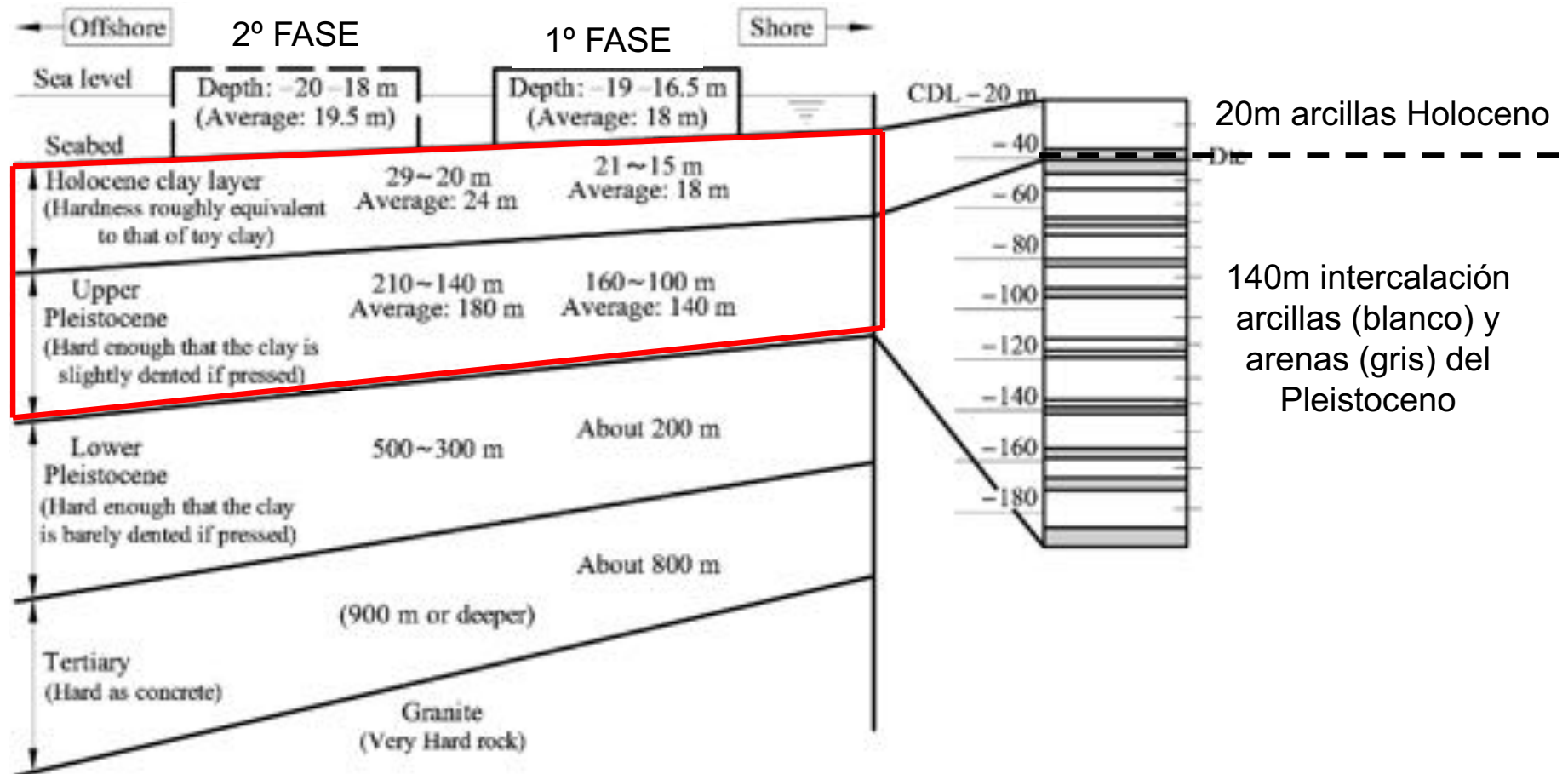


(after KALD 2009)

Aeropuerto de Kansai (KIA)



- Perfil geotécnico (C Holoceno – C+S Pleistoceno)



Aeropuerto de Kansai (KIA)

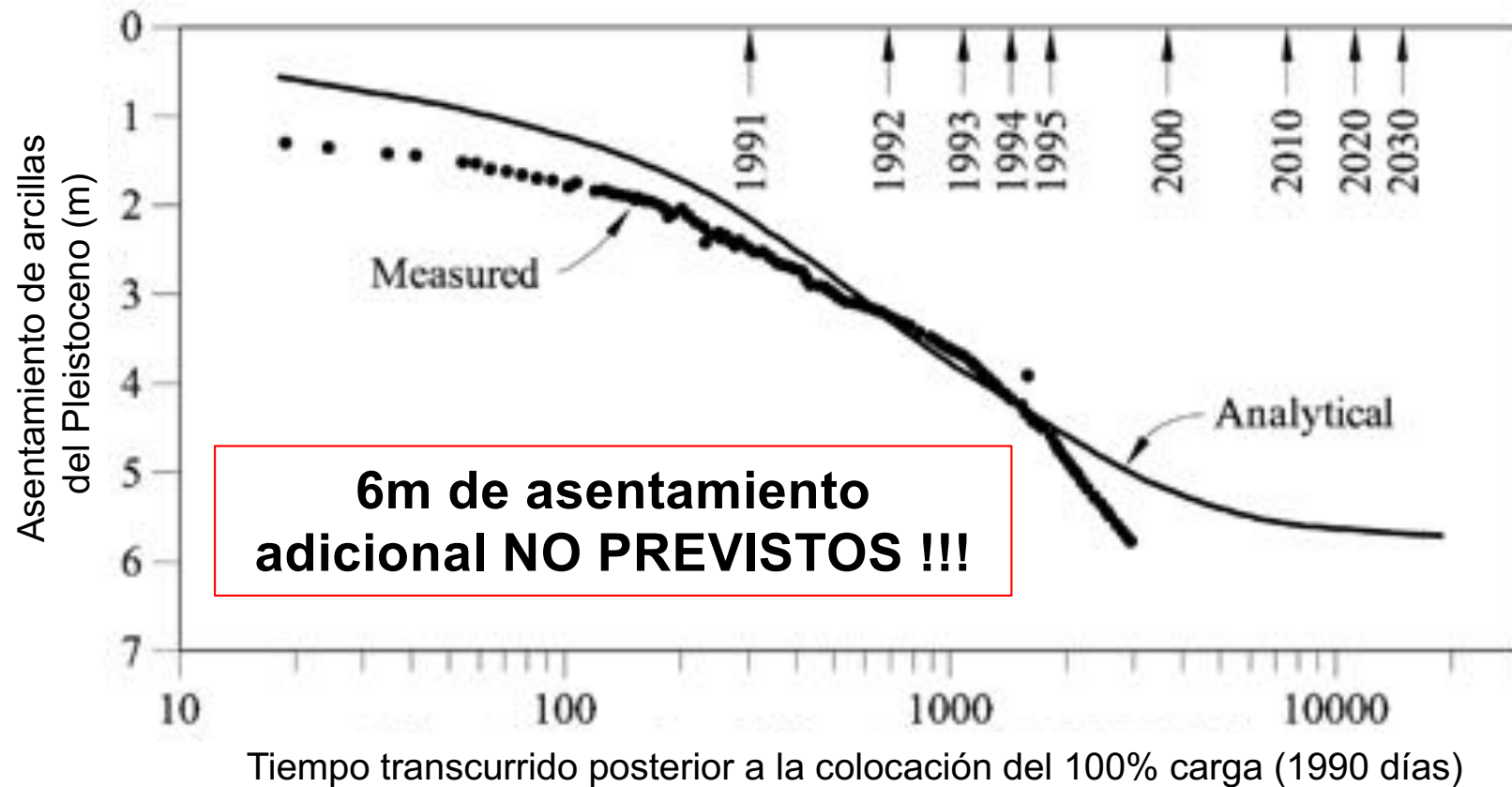


- Los 20m de arcillas del Holoceno alcanzaron prácticamente $U=90\%$ durante la construcción (descenso final aprox. 6m) debido a la presencia de drenes verticales
- No se instalaron drenes verticales en el horizonte de arcillas del Pleistoceno
- Modificación del proceso de colocación del relleno
- Para 1999, se registraron asentamientos inmediatos de 1m seguidos de 5m adicionales, los cuales continuaban a razón de un avance de 15cm por año
- El excesivo asentamiento de las arcillas del Pleistoceno disparó una revisión de los cálculos originales



Aeropuerto de Kansai (KIA)

- Evolución de asentamientos del Pleistoceno (punto A)



Aeropuerto de Kansai (KIA)

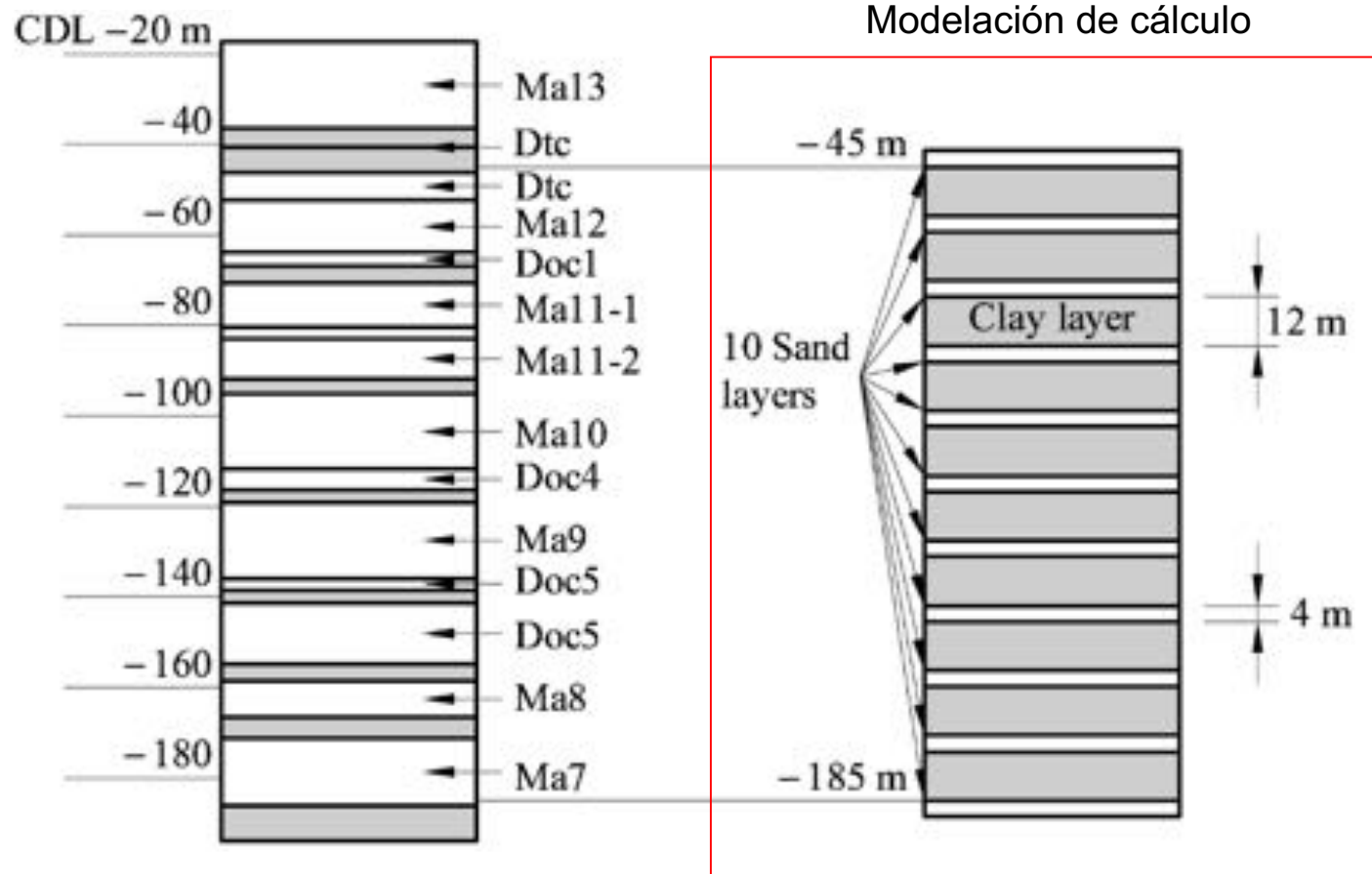


- Principales factores que afectaron la predicción del cálculo de los asentamientos:
 - Consolidación tridimensional inmediata de los estratos de arena (bajo confinamiento lateral)
 - Lentas arenosas no actuaron como horizontes drenantes en las arcillas del Pleistoceno (mayores tiempos de consolidación o disipación de presión poros)
 - Importante magnitud de consolidación secundaria de la arcilla del Pleistoceno
 - Variabilidad espacial de los parámetros geotécnicos



Aeropuerto de Kansai (KIA)

- Recálculo de asentamientos del Pleistoceno (140m)



Aeropuerto de Kansai (KIA)



- Recálculo de asentamientos del Pleistoceno (140m)

$$\rho_{\text{inf}} = \sum_{i=1}^{i=9} \Delta \rho_{\text{inf}}^i = \sum_{i=1}^{i=9} \Delta H \frac{C_c}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{0i} + \Delta \sigma}{\sigma'_{0i}} \right) =$$

$$= \sum_{i=1}^{i=9} 12 \frac{0.6}{1+1.5} \log \left(\frac{8D_i + 403}{8D_i} \right) = 5.6 \text{ m,}$$

Consolidación primaria
arcillas del Pleistoceno

$$\Delta \sigma = \gamma_{\text{island}} (h - h_w) + (\gamma_{\text{island}} - \gamma_w) h_w = 21 \times 4 + 11 \times 29 = 403 \text{ kPa;}$$

Sobrecarga
(relleno de isla)

$$\sigma'_0 = \gamma'_{\text{seabed}} D_i = 8D_i \quad \text{Presión efectiva inicial}$$

$$D_i = 31 \text{ m} + 16 \text{ m} \cdot (i - 1) \quad \text{Profundidad del estrato } i\text{-ésimo de arcilla}$$

Aeropuerto de Kansai (KIA)



- Recálculo de asentamientos del Pleistoceno (140m)

$$\rho_S = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} H \log\left(\frac{t}{t_p}\right) = \frac{0.034}{1 + 1.5} \times 108 \times \log\left(\frac{50 \times 365}{1,800}\right) = 1.5 \text{ m.}$$

Consolidación secundaria
arcillas del Pleistoceno
para 50 años

$$\rho_T^{Pl} = \rho_I + \rho_{inf} + \rho_S = 0.9 + 5.6 + 1.5 = 8.0 \text{ m.}$$

Asentamiento total
Pleistoceno en 50 años

- Asentamiento total en superficie (Holoceno + Pleistoceno)

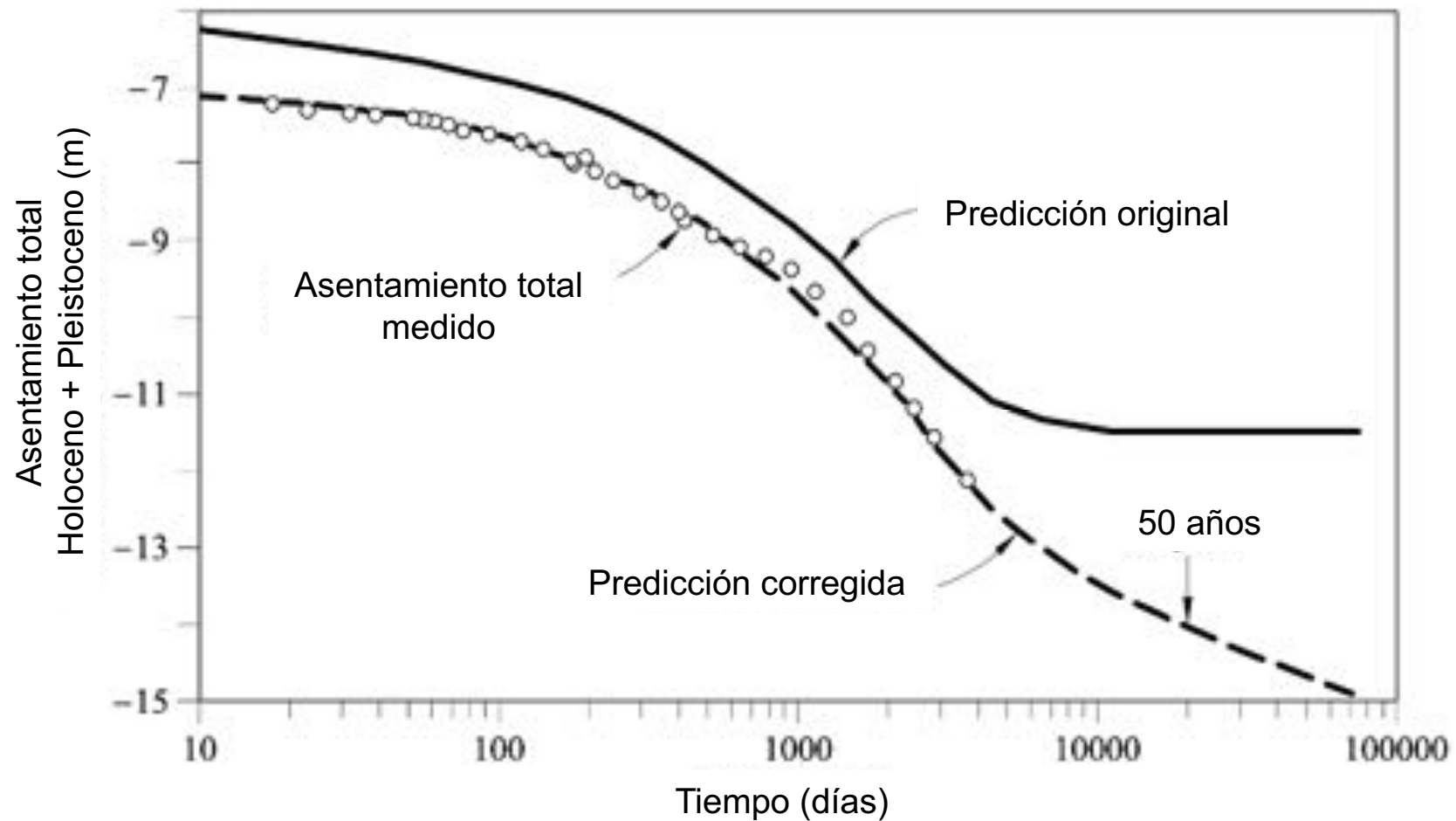
$$\rho_T = 8.0 + 6.0 = 14.0 \text{ m.}$$

Catorce metros en 50 años



Aeropuerto de Kansai (KIA)

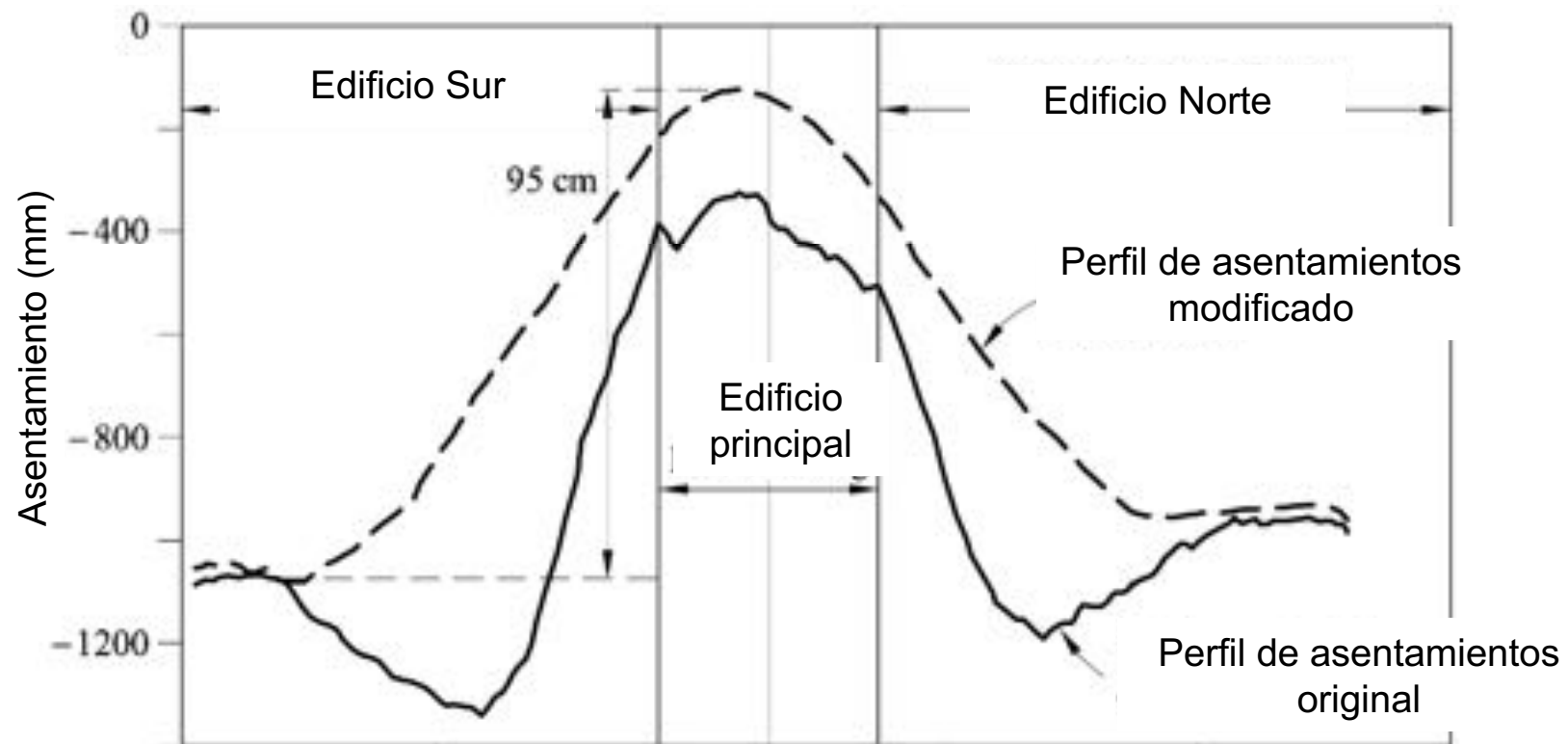
- Evolución de asentamientos esperada en 50 años





Aeropuerto de Kansai

- Se dispusieron gatos hidráulicos en las columnas de la estructura de los edificios para compensar los asentamientos que actualmente siguen evolucionando



(Akai & Tanaka 2003)

Bibliografía



- Normas ASTM – American Society of Testing Materials
 - D 2435 (ensayo de consolidación)
 - D 4186 (ensayo de consolidación a deformación controlada)
- Holtz & Kovacs. An introduction to geotechnical engineering. 2nd edition.
- Germaine – Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers
- A.M. Puzrin et al., Geomechanics of Failures. Unexpected excessive settlements: Kansai international Airport.