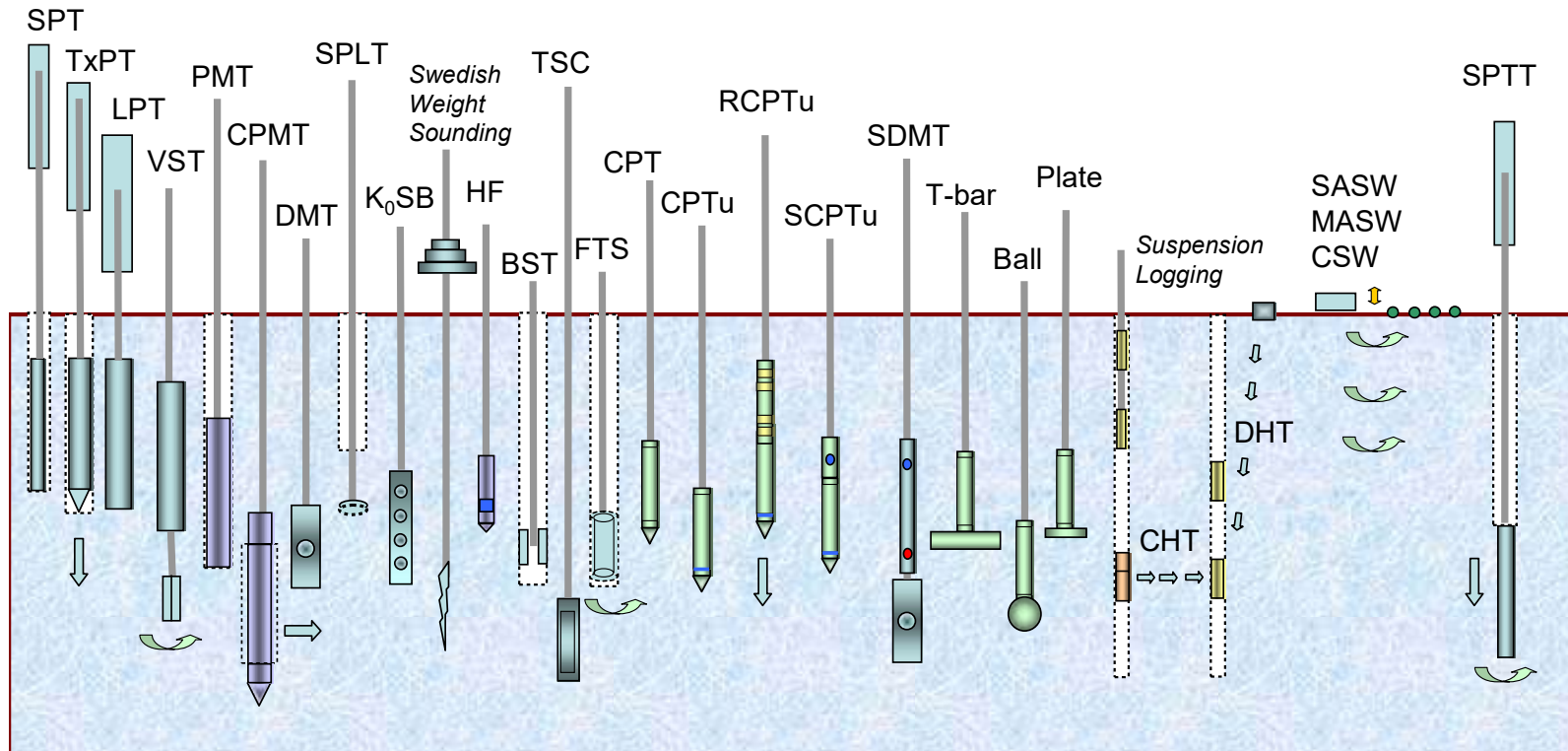


Ensayos in situ



Mecánica de Suelos y Geología

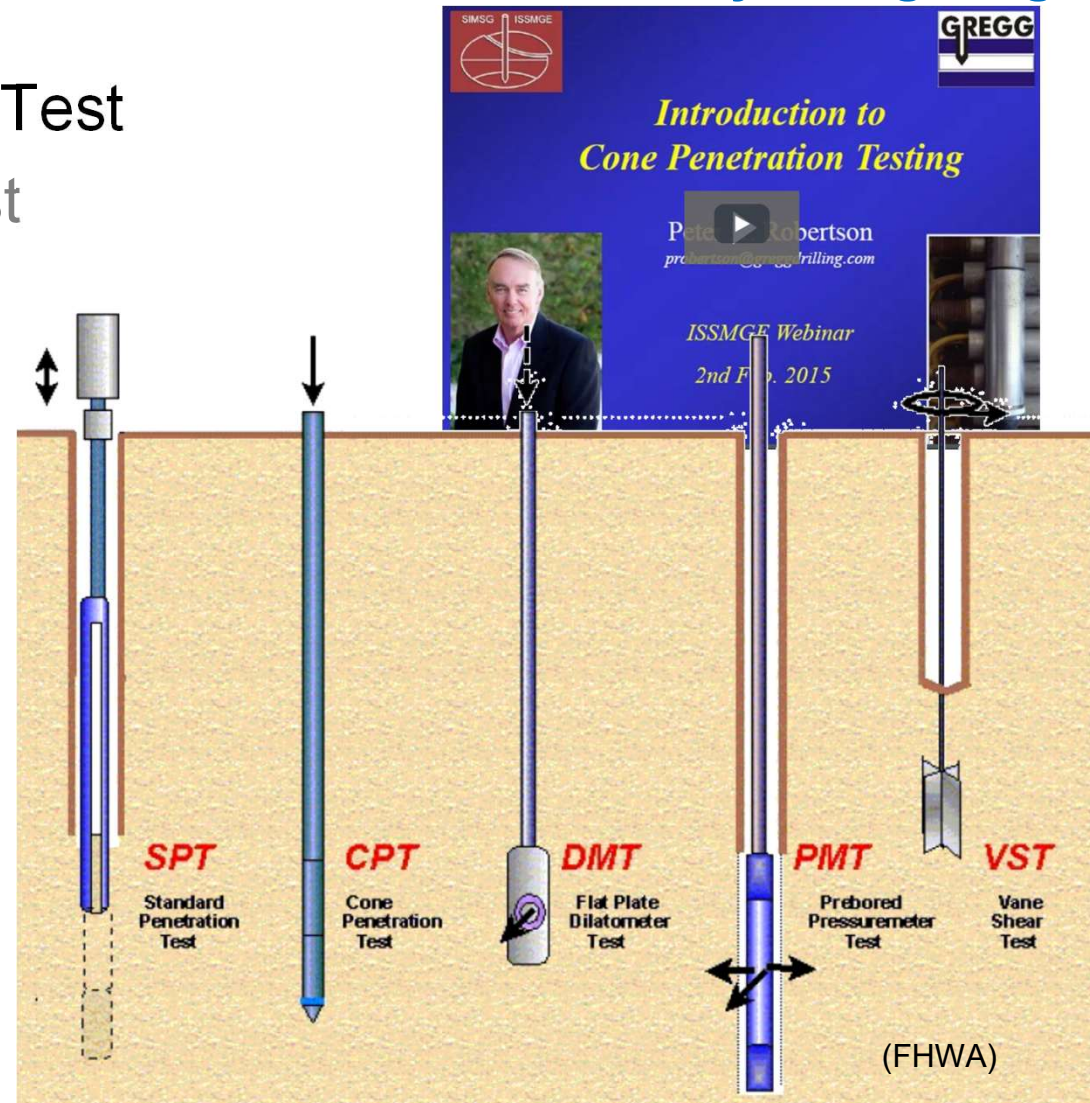
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

Índice



virtualuniversity.issmge.org

- SPT: Standard Penetration Test
- CPT: Cone Penetration Test
- PMT: Pressuremeter Test
- VST: Vane Shear Test
- DMT: Dilatometer Test
- PLT: Plate Load Test



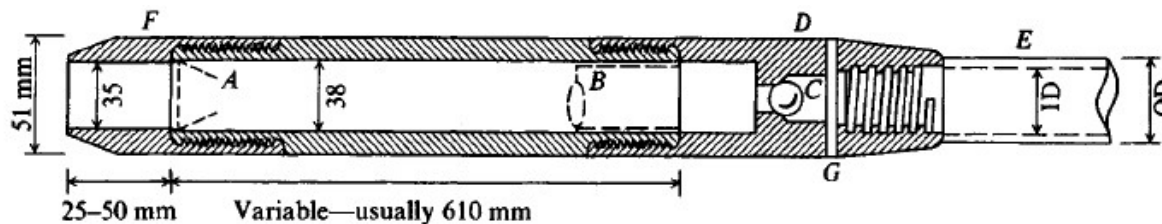
Ensayo SPT

<https://www.youtube.com/watch?v=jo64QIE4hr4>
<https://www.youtube.com/watch?v=3WEFw5K1tF8>
<https://www.youtube.com/watch?v=JVrciNqoGAQ>



Se mide la resistencia a la penetración del terreno mediante la hincada dinámica de un sacamuestras normalizado

- Se hincada 45 cm en el fondo de una perforación mediante una maza de 63.5 kg que cae desde 76 cm de altura
- Se cuenta el número de golpes para que entre los últimos 30 cm
- Se recupera una muestra (si el terreno lo permite, en general si)



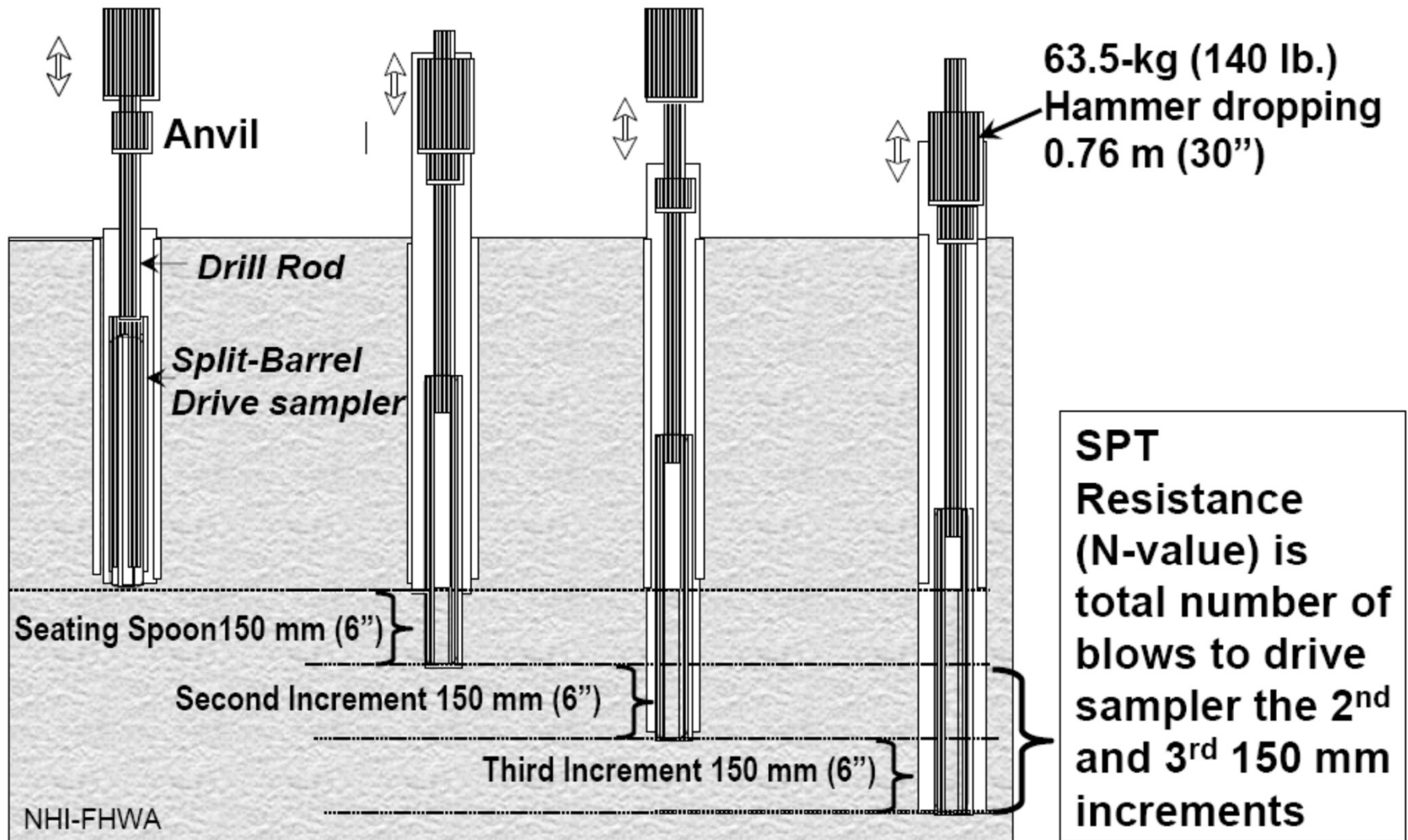
A—insert if used B—liner if used
 C—ball check valve (provide suction on sample)
 D—sampler-to-drill rod coupling
 E—drill rod (A or AW)
 F—drive shoe G—vent holes (used with C)

Drill rod sizes:
 A: 41 OD × 29 ID mm 5.51 kg/m
 AW: 44 OD × 32 ID mm 6.25 kg/m





Resultado del ensayo SPT (la perforación es una sola, que no confunda el dibujo)

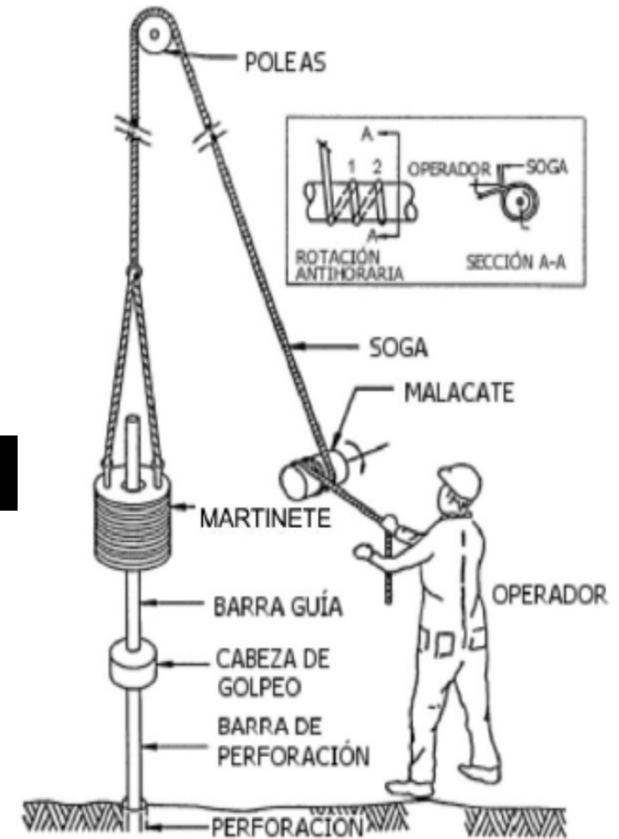
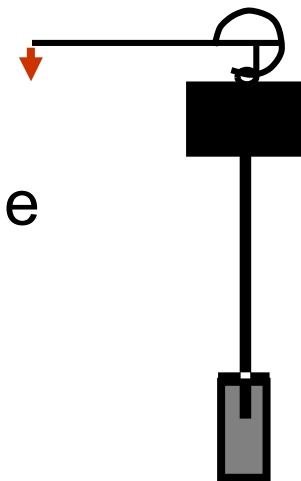


Resultado del ensayo SPT



Hay dos resultados posibles

- N_{SPT} : Un número entero adimensional igual a la cantidad de golpes necesarios para que el sacamuestras penetre en el terreno los últimos 30 cm
- Rechazo: más de 50 golpes para 15 cm, más de 100 golpes o 10 golpes sin ningún avance
 - Se informa como NN/pp , donde pp es la penetración total en centímetros para NN golpes



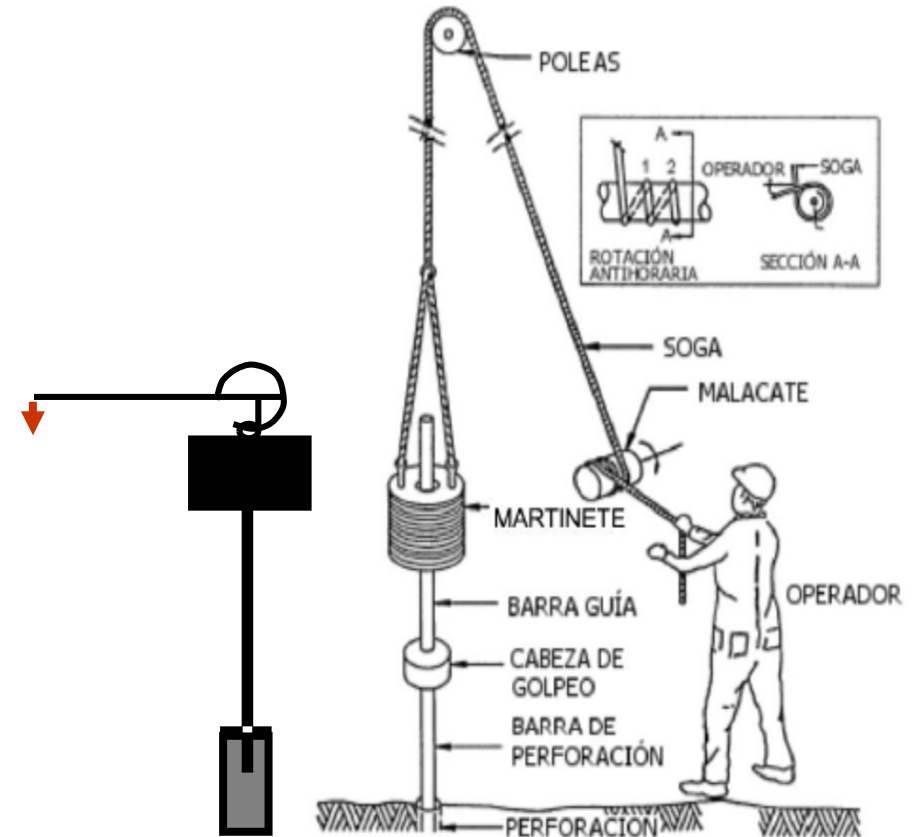
Correcciones a la medición de campo



N_{SPT} es el número medido en el terreno

Se corrige por

- Energía aplicada
- Profundidad
- Napa de agua
- Diámetro de perforación
- Peso de barras
- ...





Corrección por energía aplicada:

N_{SPT} a N_{60}

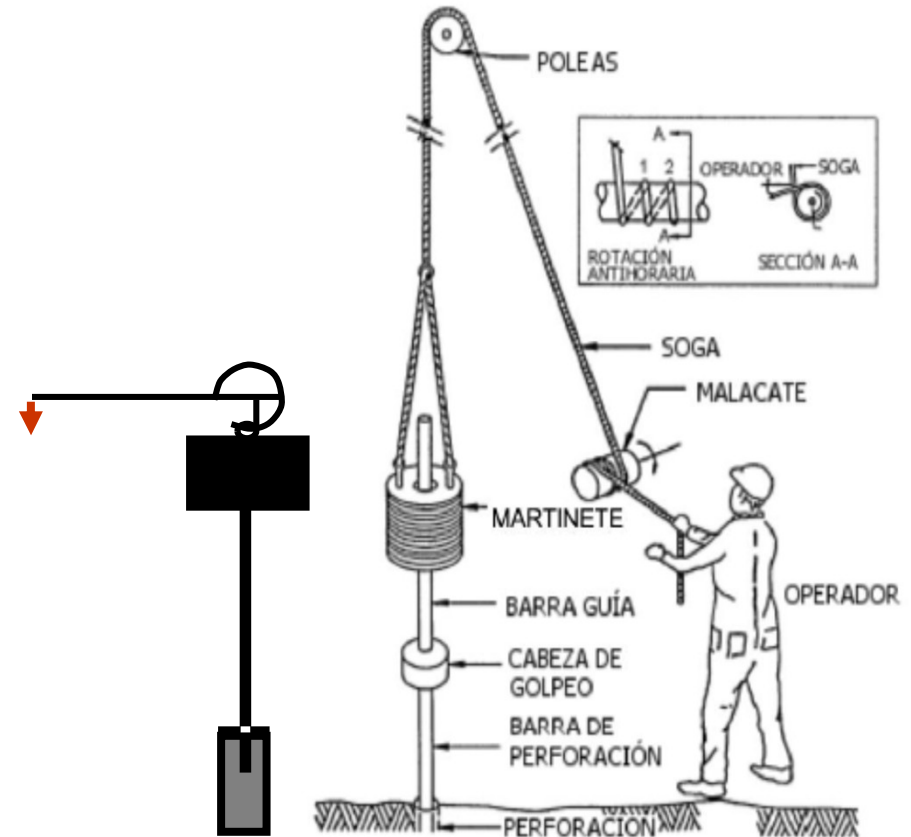
La energía potencial nominal ($W \times H$) es 475 J

La energía realmente aplicada ER varía entre el 30% y el 100% de ese valor en función del equipo y la técnica de ensayo

Se normaliza N para una eficiencia del 60%

$$N_{60} = N_{SPT} \cdot \frac{ER}{60\% \cdot 475J}$$

$ER \sim 90\% \cdot 475J$ (Leoni 2008)



Corrección por nivel de tensiones:

N_{60} a $(N_1)_{60}$

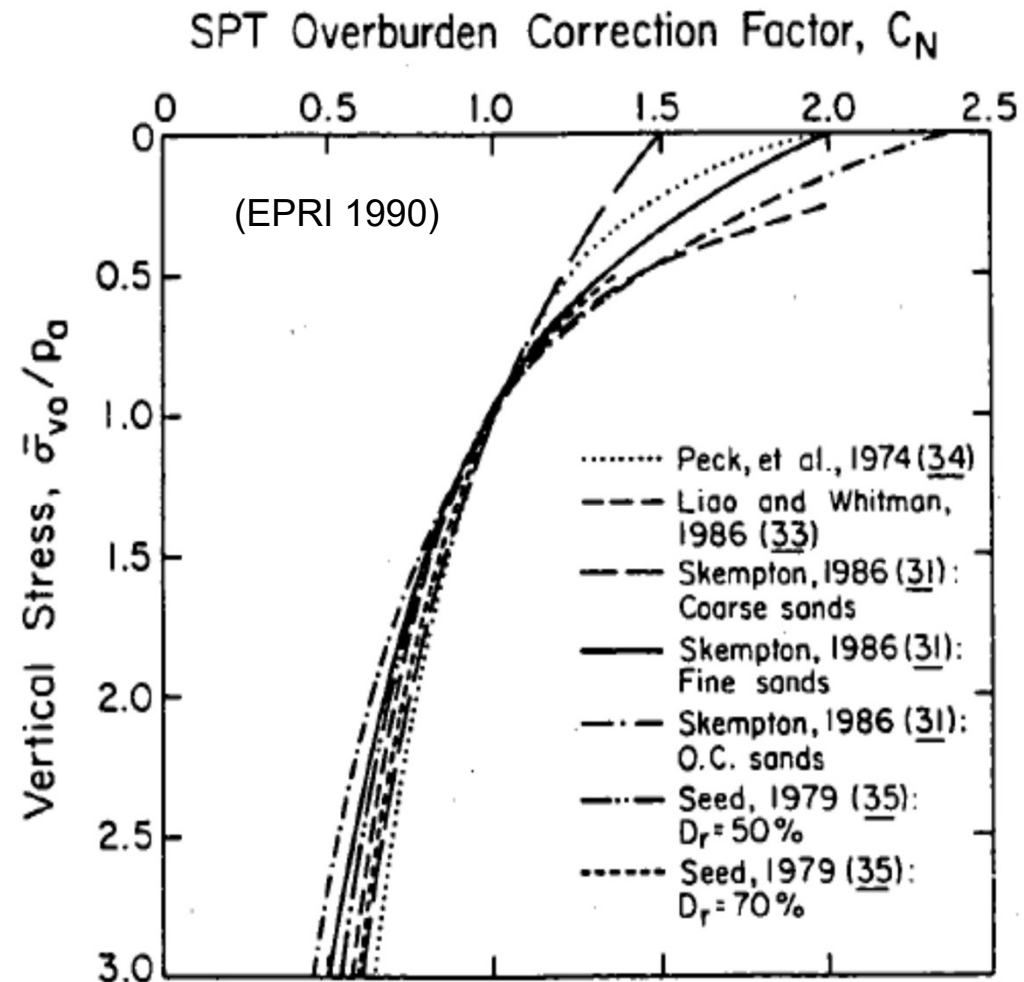


Para un suelo uniforme, la resistencia a la penetración varía con la presión efectiva (profundidad)

- El N_1 significa $1\text{atm}=100\text{kPa}$

$$(N_1)_{60} = N_{SPT} \cdot \frac{ER}{60\% \cdot 475\text{J}} \cdot C_N$$

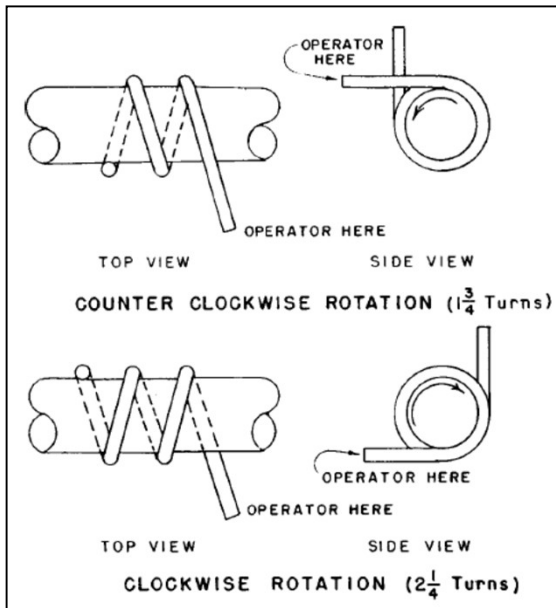
$$C_N = \sqrt{\frac{100\text{kPa}}{\sigma'_{v0}}}$$





Corrección por otros factores de ensayo

$$(N_1)_6 = N \cdot \frac{ER}{60\% \cdot 475J} C_N \cdot C_B \cdot C_S \cdot C_R$$



Factor	Equipment Variables	Correction	
		Term	Value
Energy ratio	Safety hammer	C_{ER}	0.9
	Donut hammer		0.75
Borehole diameter	65 to 115 mm (2.5 to 4.5 in)	C_B	1.0
	150 mm (6 in)		1.05
	200 mm (8 in)		1.15
Sampling method	Standard sampler	C_S	1.0
	Sampler without liner		1.2
Rod length	> 10 m (> 30 ft)	C_R	1.0
	6 to 10 m (20 to 30 ft)		0.95
	4 to 6 m (13 to 20 ft)		0.85
	3 to 4 m (10 to 13 ft)		0.75

Source: Based on Skempton (31).

SPT y correlaciones de parámetros



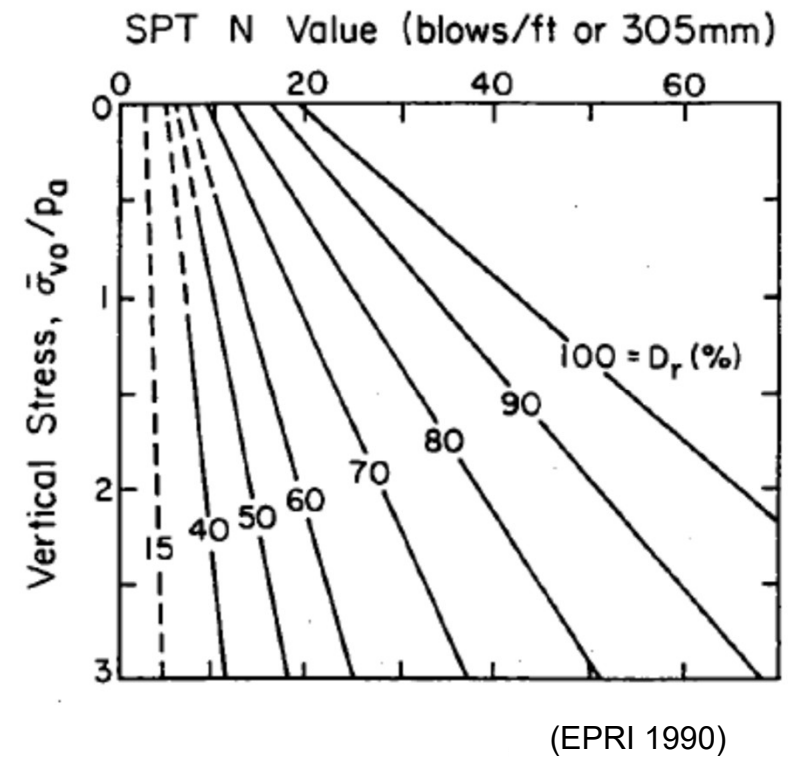
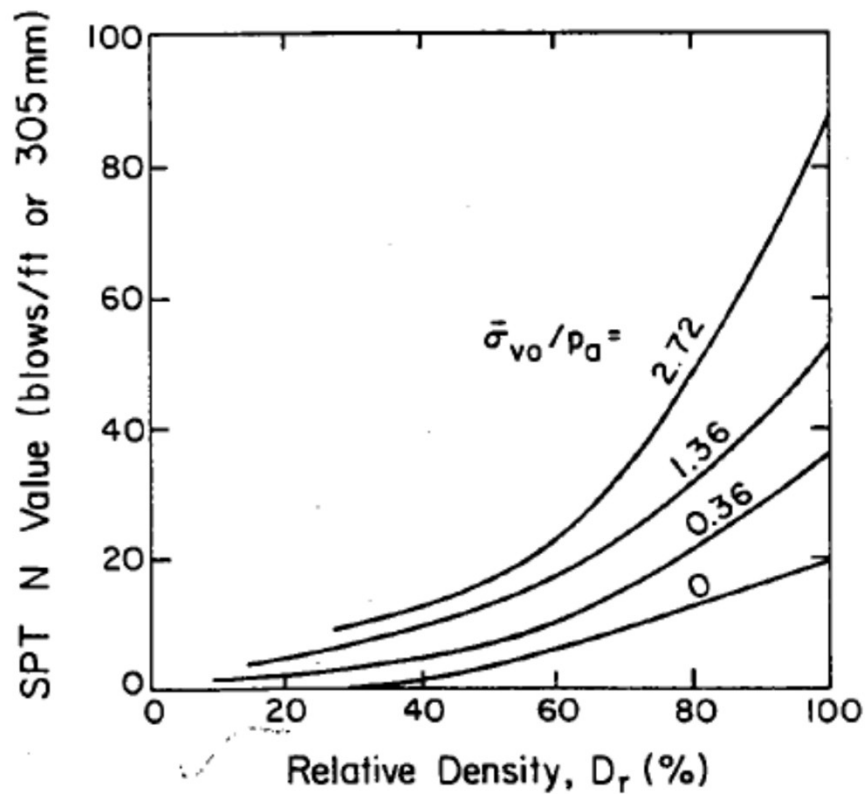
El SPT es un ensayo que tiene muchas correlaciones

- Es importante saber cómo se calculó N en cada caso
 - Algunos informan el número de campo: N_{SPT}
 - Otros efectúan todas las correcciones excepto la de nivel de tensiones: N_{60}
 - Otros efectúan todas las correcciones: $(N_1)_{60}$

Las correlaciones publicadas en diferentes épocas usan diferentes definiciones de SPT

Las correlaciones deben ser usadas con responsabilidad y tienen DISPERSIÓN (nube de puntos)

Arenas: estimación de D_r



En estos gráficos hay que usar N_{60} , no $(N_1)_{60}$

Arenas: estimación de ϕ_{\max}



- Procedimiento 1

- Estimación directa:

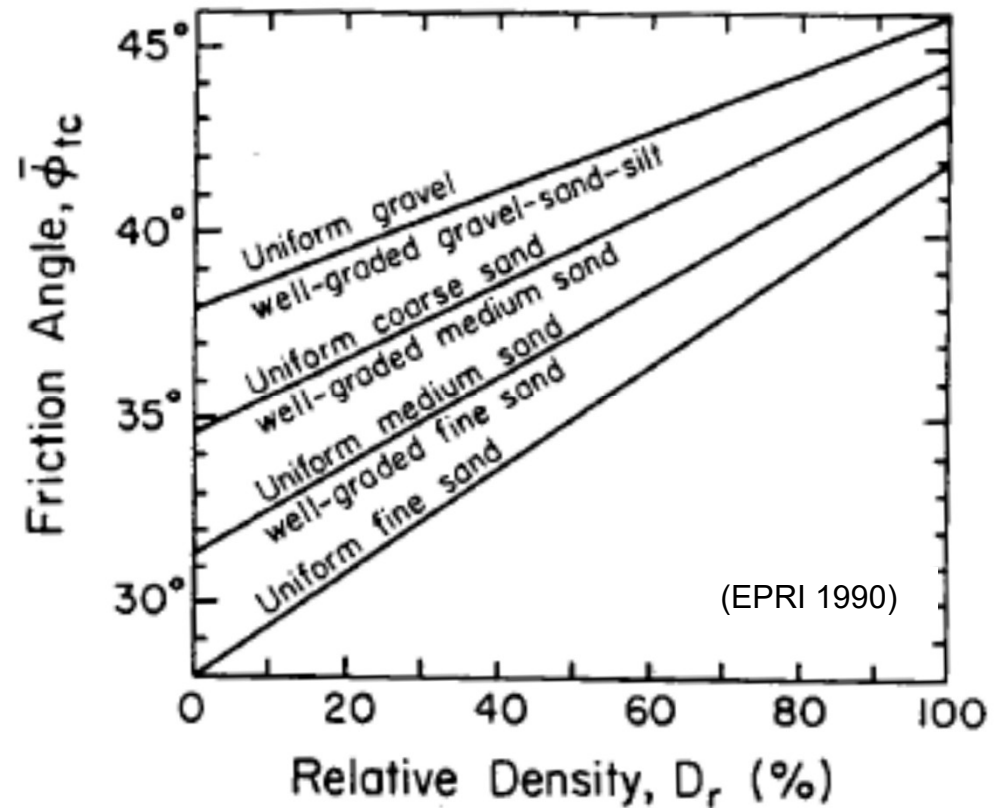
$$\phi_{\max} \cong \text{atan} \left[\frac{N_{60}}{12+2 \frac{\sigma_v}{p_{atm}}} \right]^{0.34}$$

- Procedimiento 2

- Se estima D_r con *SPT*

- Se estima ϕ_{\max} con D_r y observando la muestra

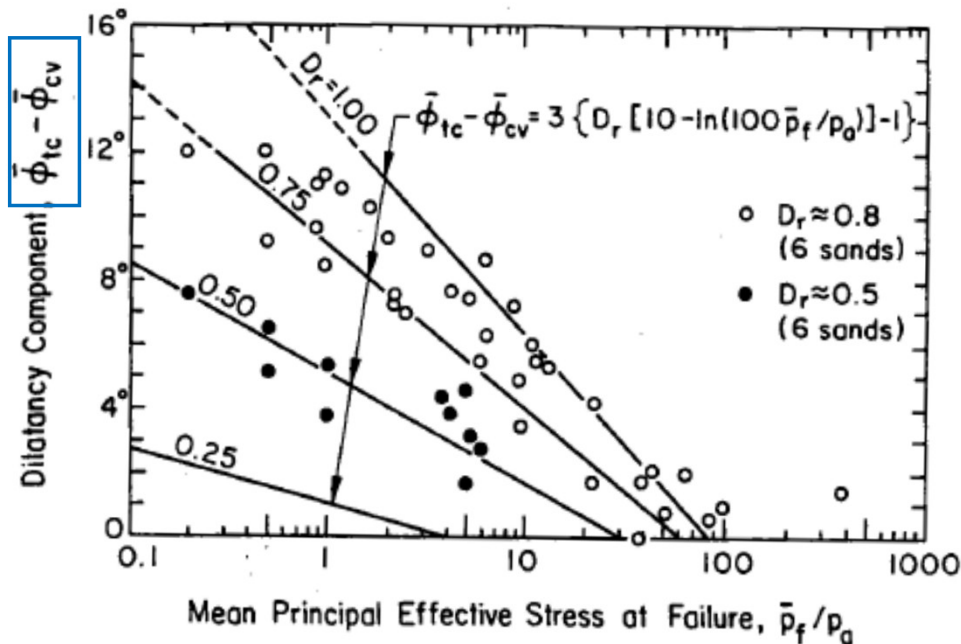
($\phi_{tc} = \phi_{\max}$)





Arenas: estimación de ϕ_{\max}

- Procedimiento 3 (recomendado)
 - Se estima D_r a partir del resultado de *SPT*
 - Se observa la muestra y se estima ϕ_{cv} (estado crítico)
 - Se aplica la ecuación de Bolton: $\phi_{\max}[p, D_r]$



$$\phi_{\max} - \phi_{cv} = 3^{\circ} D_r \left(Q - \ln \left[\frac{100 p}{p_{atm}} \right] \right) - 3^{\circ}$$

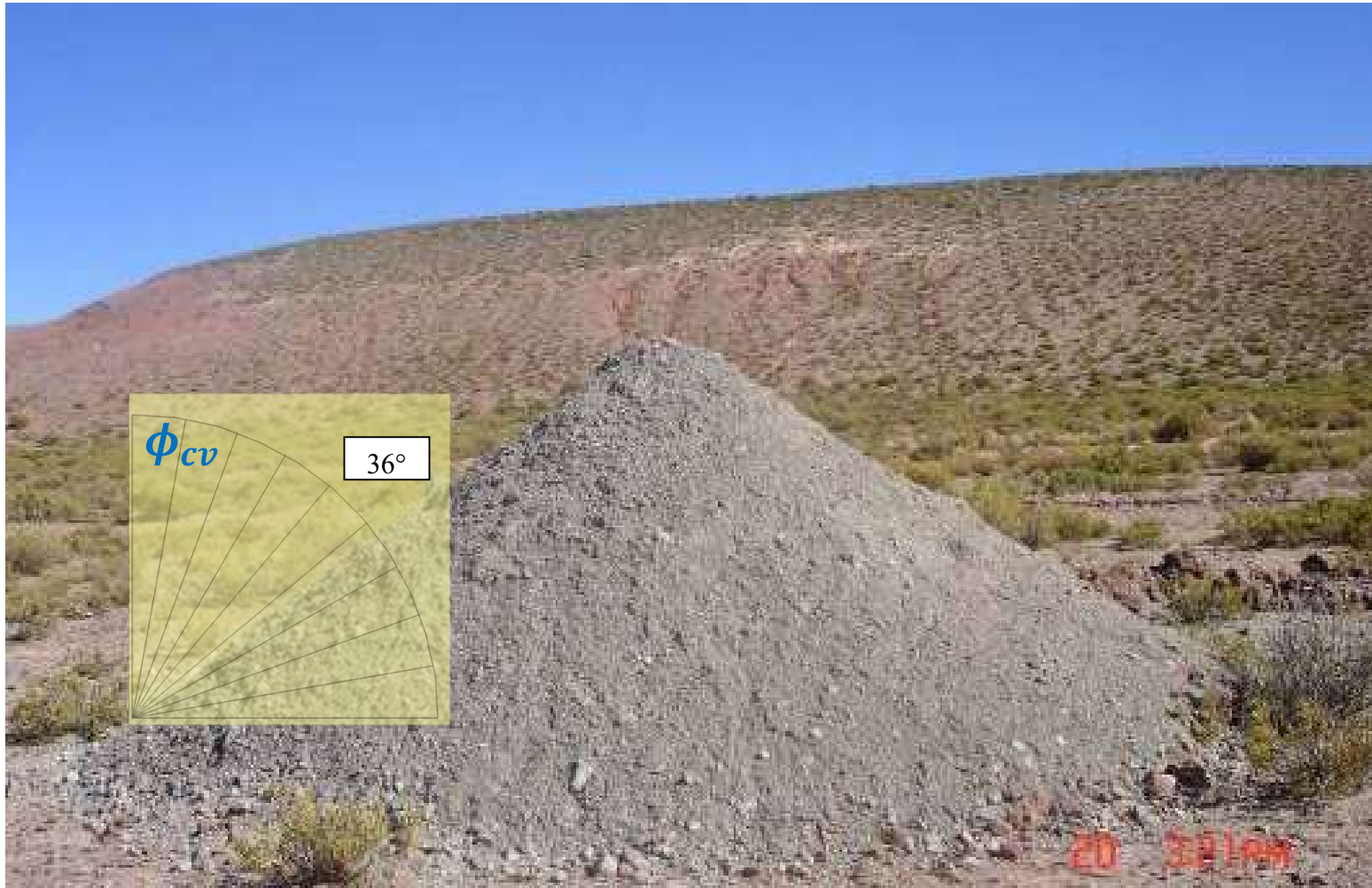
Q	Grain type
10	Quartz and feldspar
8	Limestone
7	Anthracite
5.5	Chalk

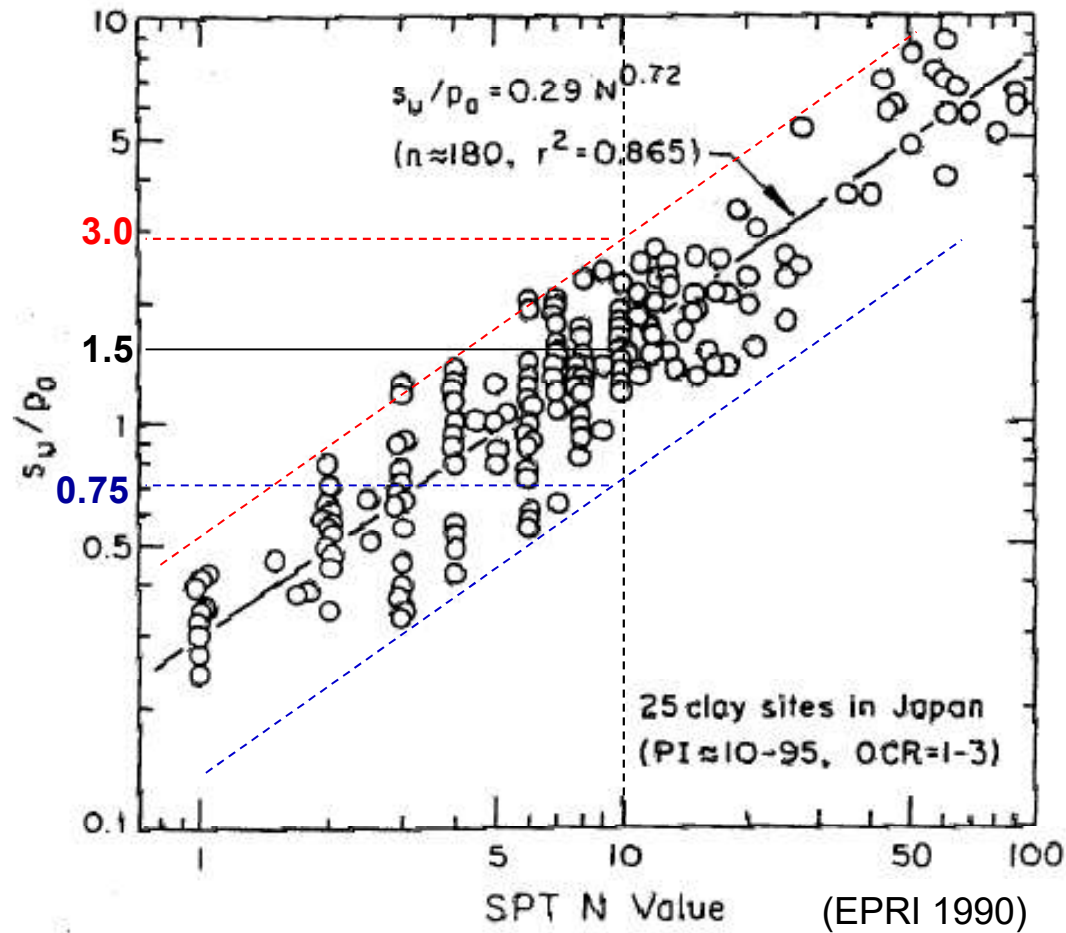
(Bolton 1986)



Arenas: estimación de ϕ_{\max}

Procedimiento 3



Arcillas: Estimación de s_u 

La correlación $s_u - (N_1)_{60}$ es débil

$$s_u \cong 7(N_1)_{60} \text{ kPa}$$

$$\frac{s_u}{p_{atm}} = 0.57 \frac{(N_1)_{60}^{0.72}}{0.14}$$

Mayne: Is One Number Enough???



c_u = undrained strength

γ_T = unit weight

I_R = rigidity index

ϕ' = friction angle

OCR = overconsolidation

K_0 = lateral stress state

e_o = void ratio

V_s = shear wave

E' = Young's modulus

C_c = compression index

q_b = pile end bearing

f_s = pile skin friction

k = permeability

q_a = bearing stress

D_R = relative density

γ_T = unit weight

LI = liquefaction index

ϕ' = friction angle

c' = cohesion intercept

e_o = void ratio

q_a = bearing capacity

σ_p' = preconsolidation

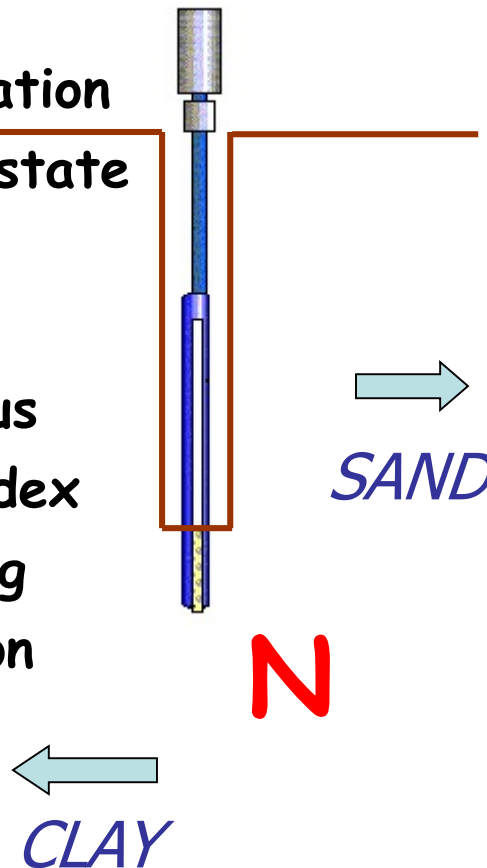
V_s = shear wave

E' = Young's modulus

Ψ = dilatancy angle

q_b = pile end bearing

f_s = pile skin friction

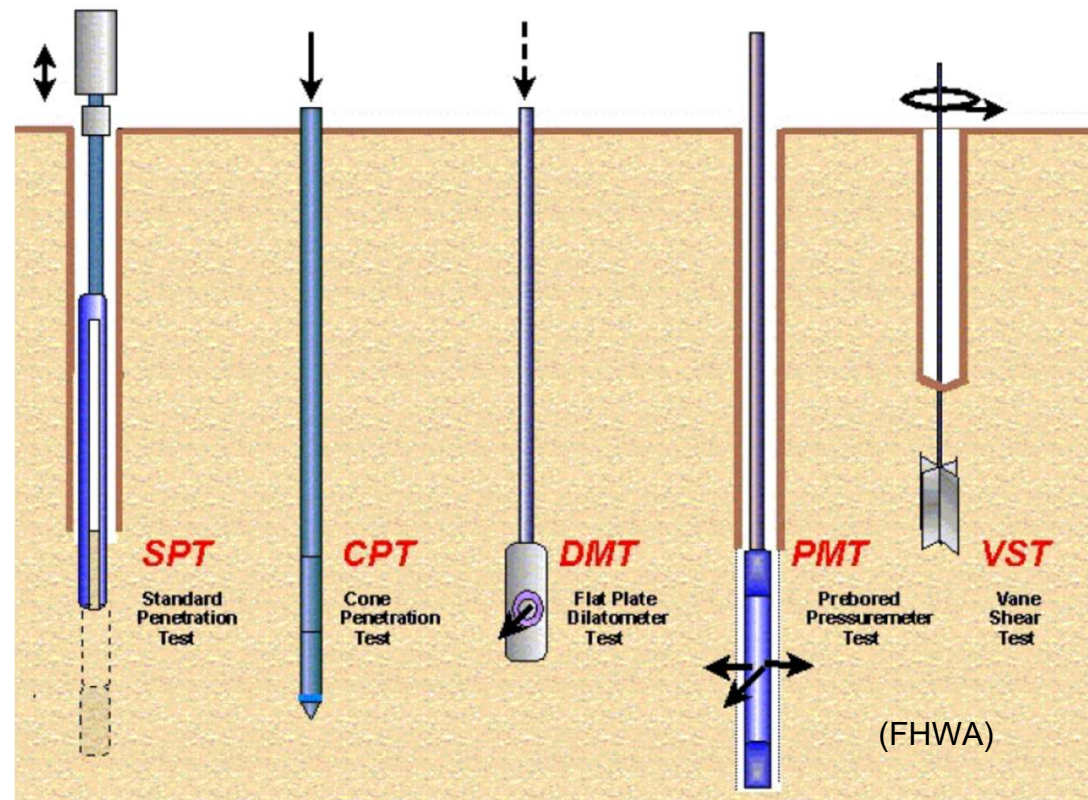


(Mayne 2001)



Índice

- SPT: Standard Penetration Test
- CPT: Cone Penetration Test
- PMT: Pressuremeter Test
- VST: Vane Shear Test
- DMT: Dilatometer Test
- PLT: Plate Load Test



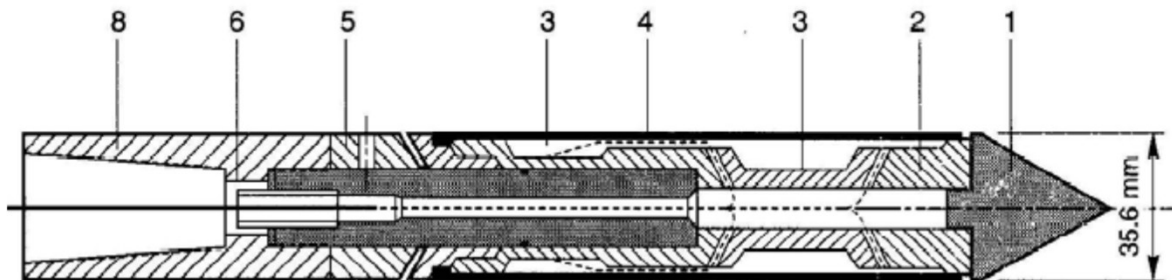
Descripción del ensayo CPTu



<https://www.youtube.com/watch?v=Cvu9iBSnQYo>
<https://www.youtube.com/watch?v=4SKjkOqaMk8>
<https://www.youtube.com/watch?v=WBeHGnA4-VU>

Se mide cada 2cm de avance y mediante la hincas estática de un cilindro instrumentado con punta cónica los siguientes parámetros:

- Punta (q_t)
- Fricción (f_s)
- Presión de poros (u)

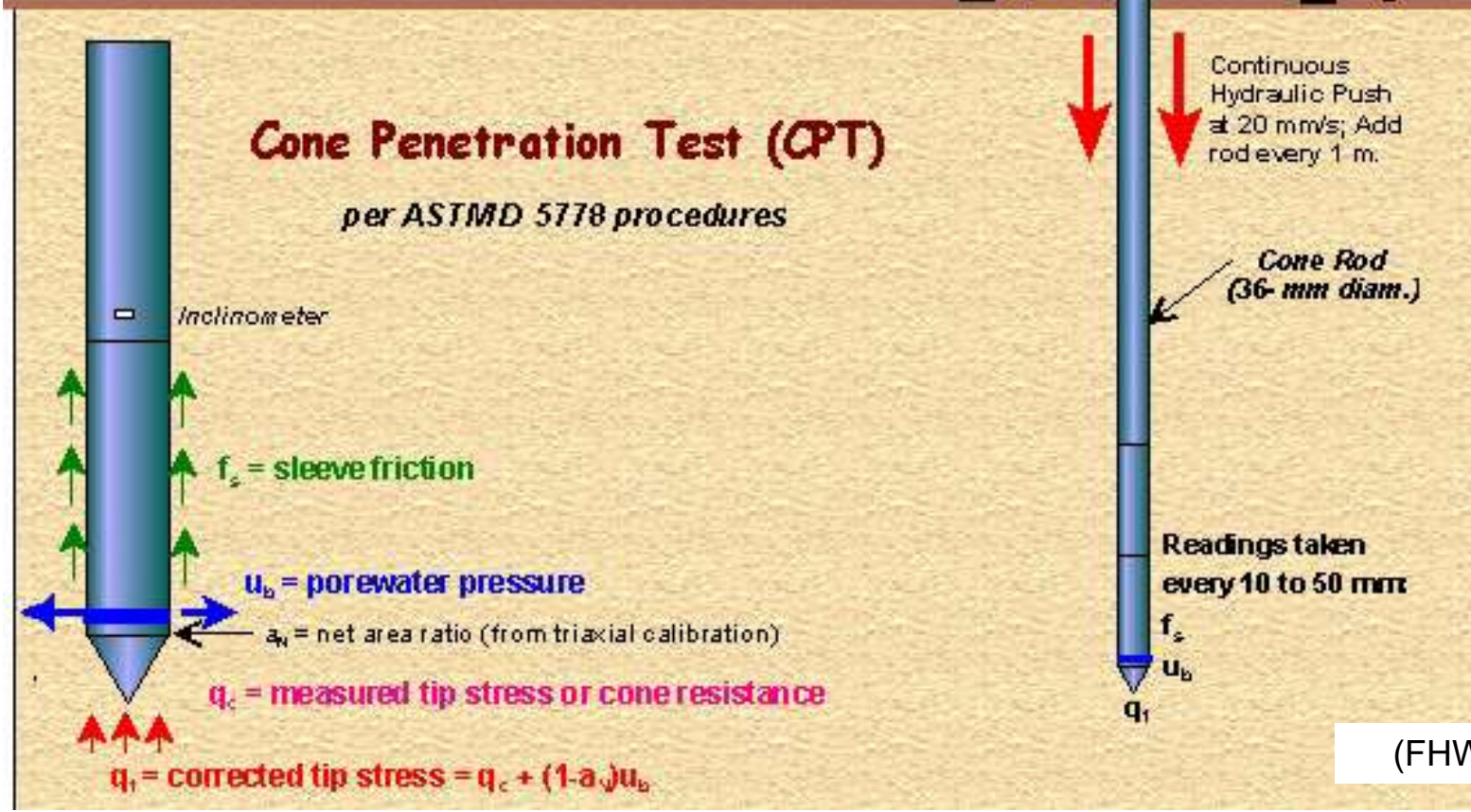
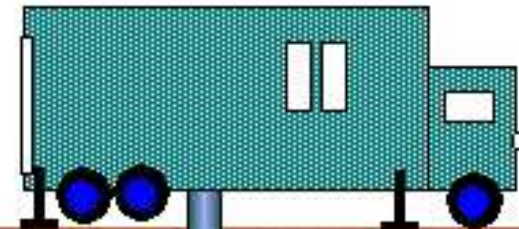
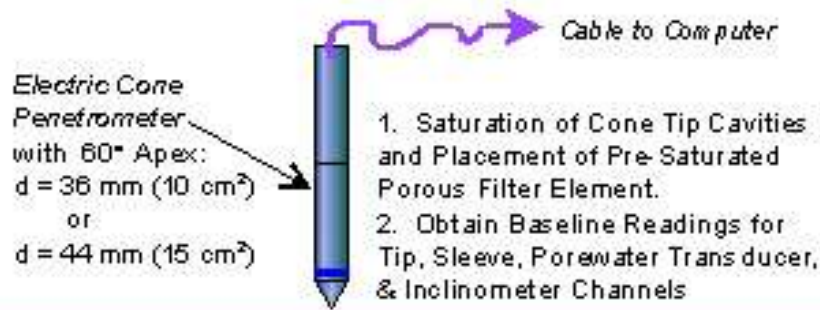


- | | |
|---------------------------------------|------------------------|
| 1 Conical point (10 cm ²) | 5 Adjustment ring |
| 2 Load cell | 6 Waterproof bushing |
| 3 Strain gauges | 7 Cable |
| 4 Friction sleeve | 8 Connection with rods |
- (Lunne et al. 1997)





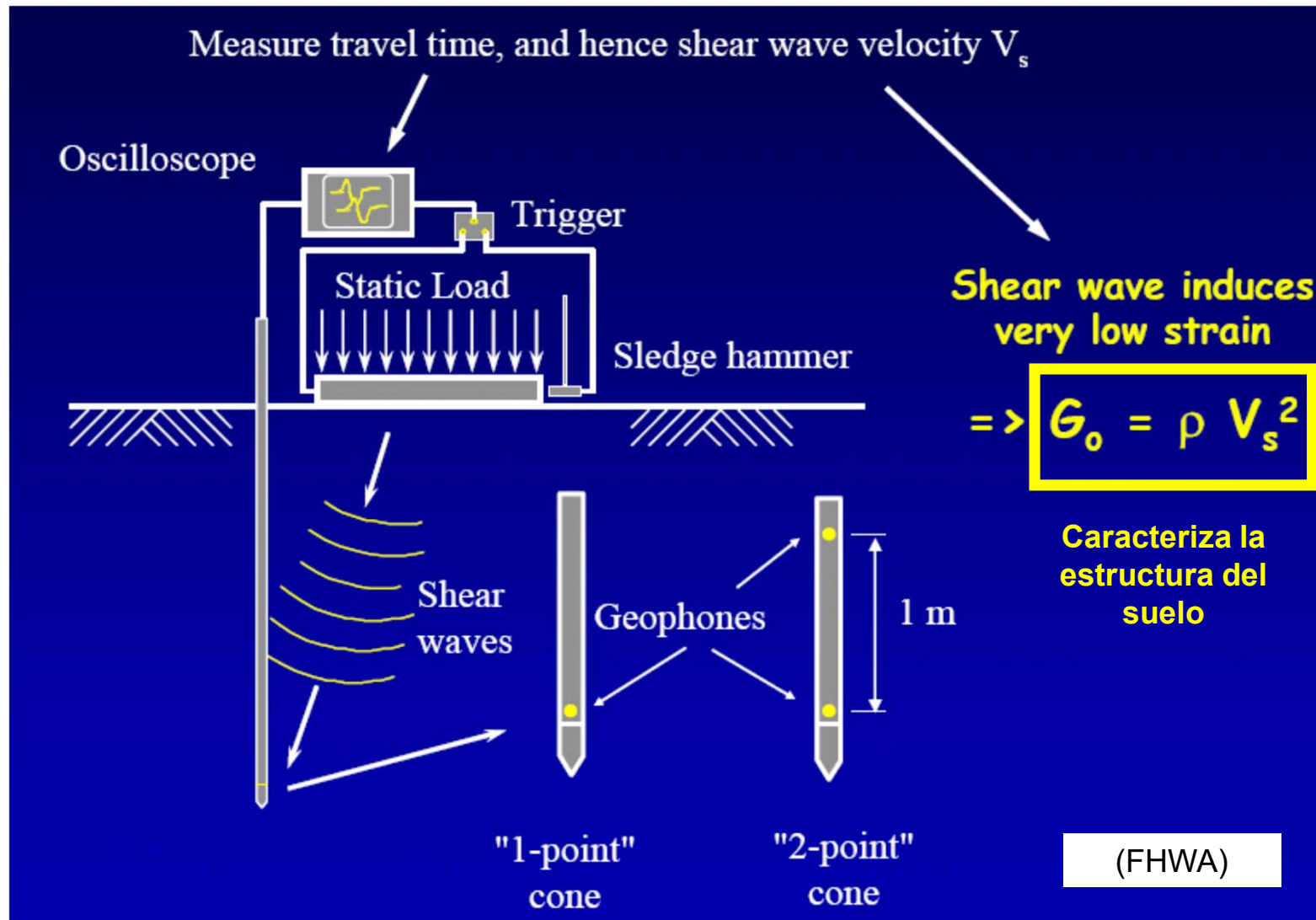
Descripción del ensayo CPTu



(FHWA)



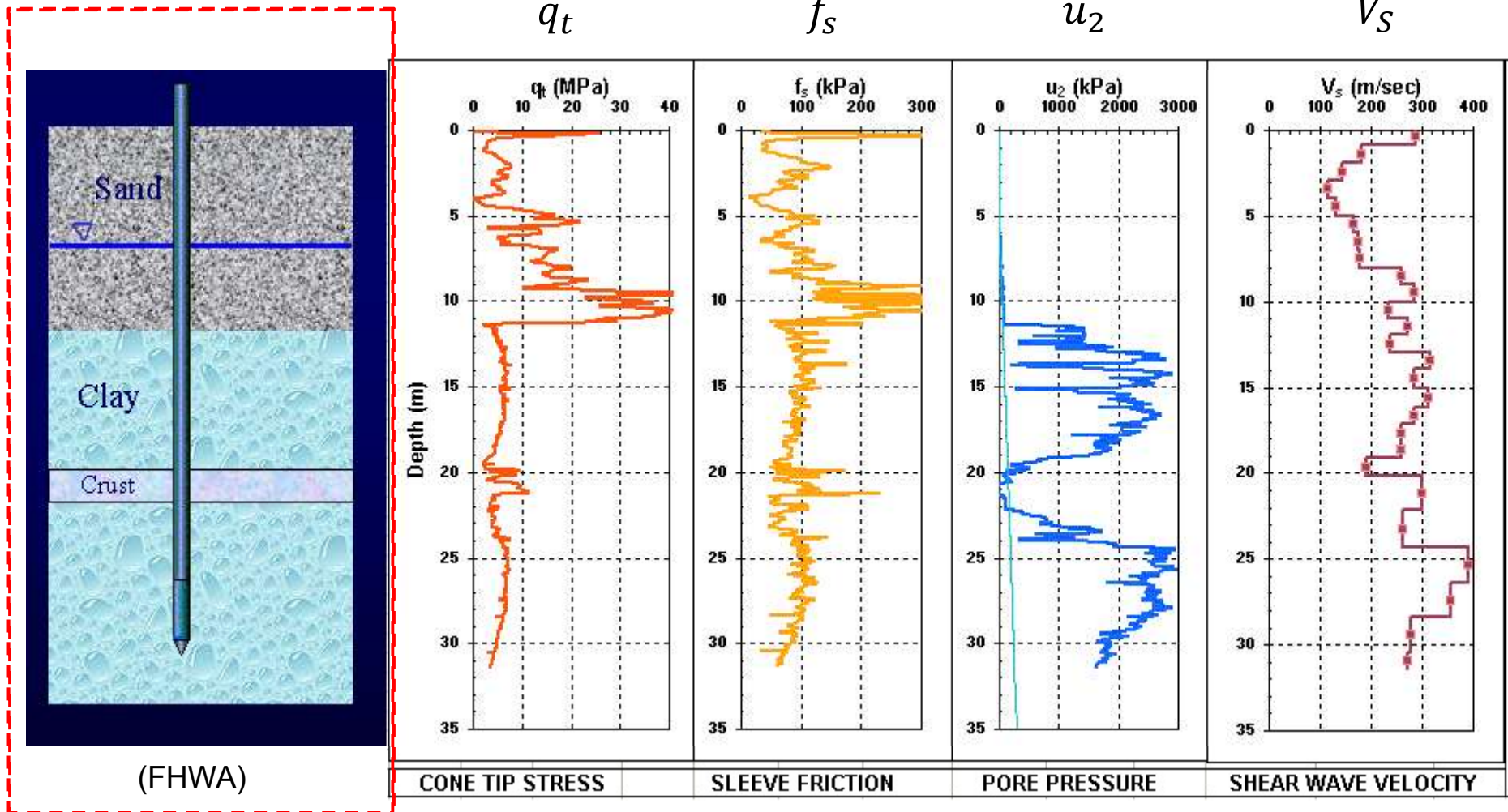
S-CPT: CPT más velocidad de onda de corte V_s (ensayo geofísico)





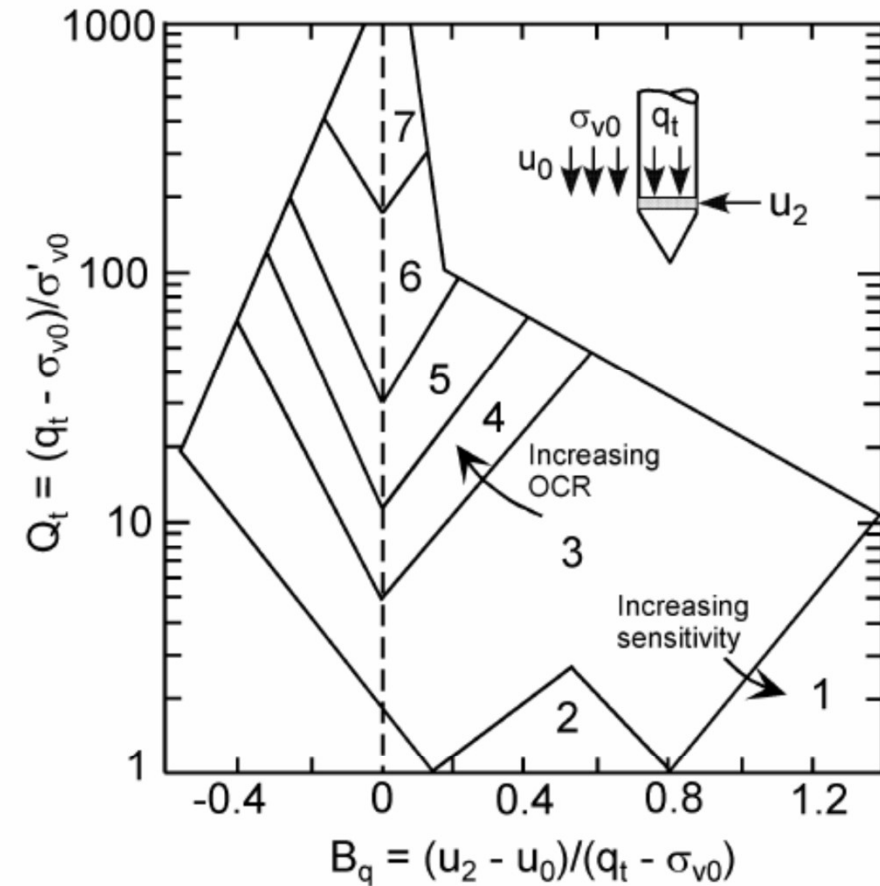
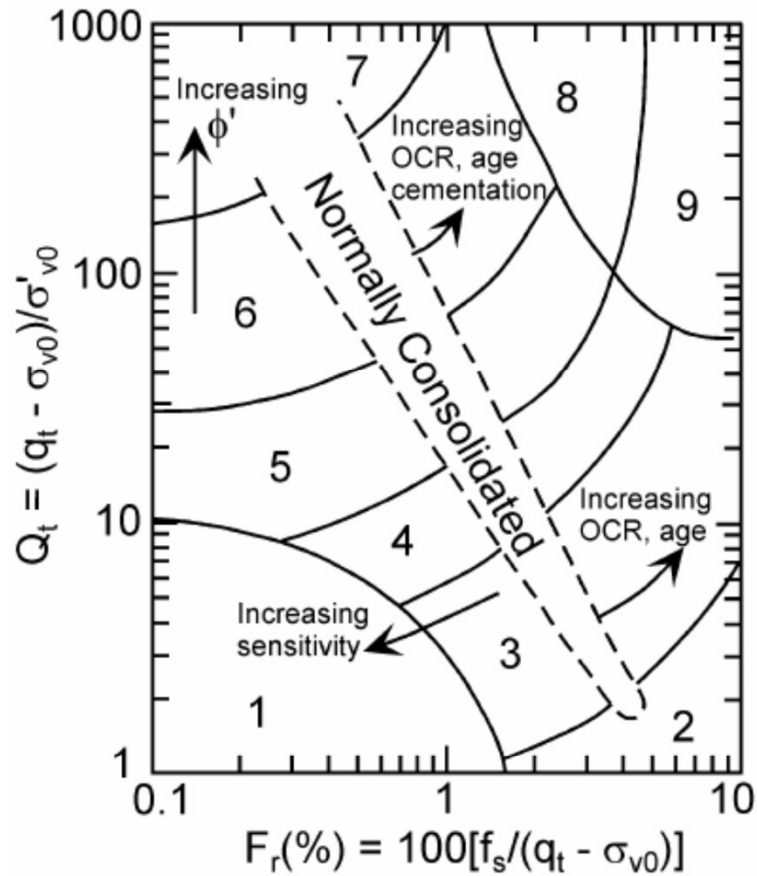
Un resultado típico (S-CPTu)

El perfil geotécnico puede ser desconocido al momento de hacer el ensayo !!





Identificación de suelos con CPTu



SBT (Soil Behavior Type)

(EPRI 1990)

- | | | |
|------------------------------|---|-----------------------------------|
| 1. Sensitive, fine grained | 4. Silt mixtures: clayey silt to silty clay | 7. Gravelly sand to sand |
| 2. Organic soils-peats | 5. Sand mixtures: silty sand to sand silty | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clays: clay to silty clay | 6. Sands: clean sands to silty sands | 9. Very stiff fine grained |

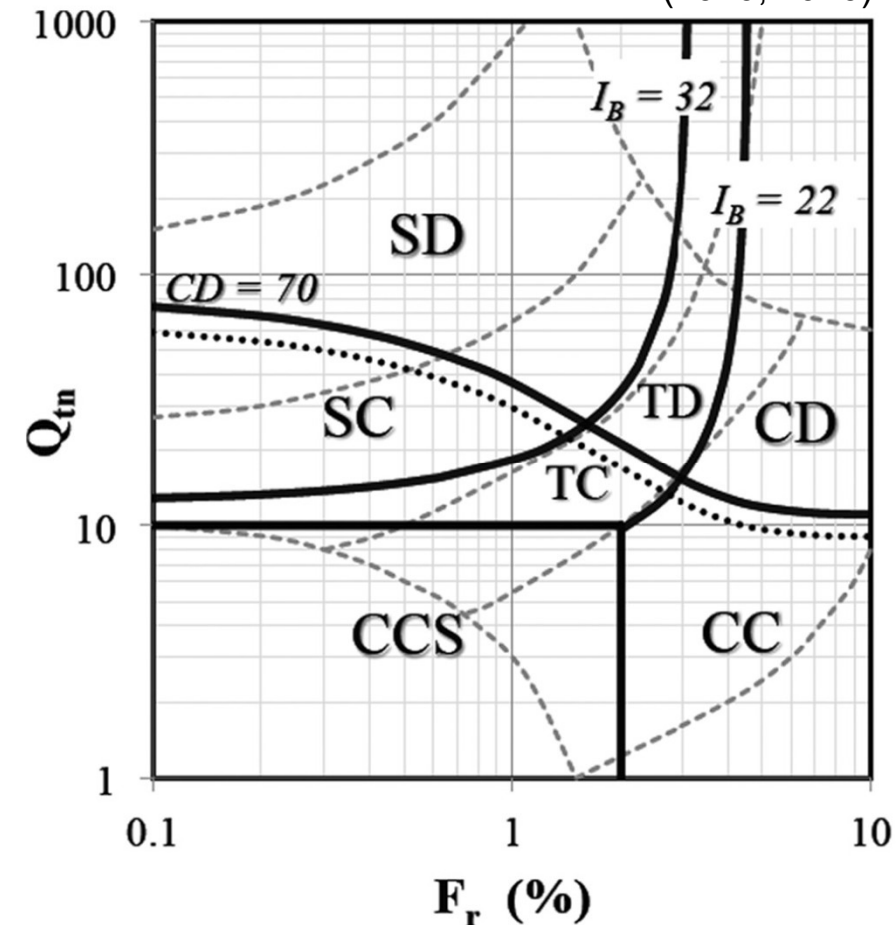
Estimación de comportamiento probable (“clasificación por comportamiento”)



Robertson (2010, 2016)

SBT modificado

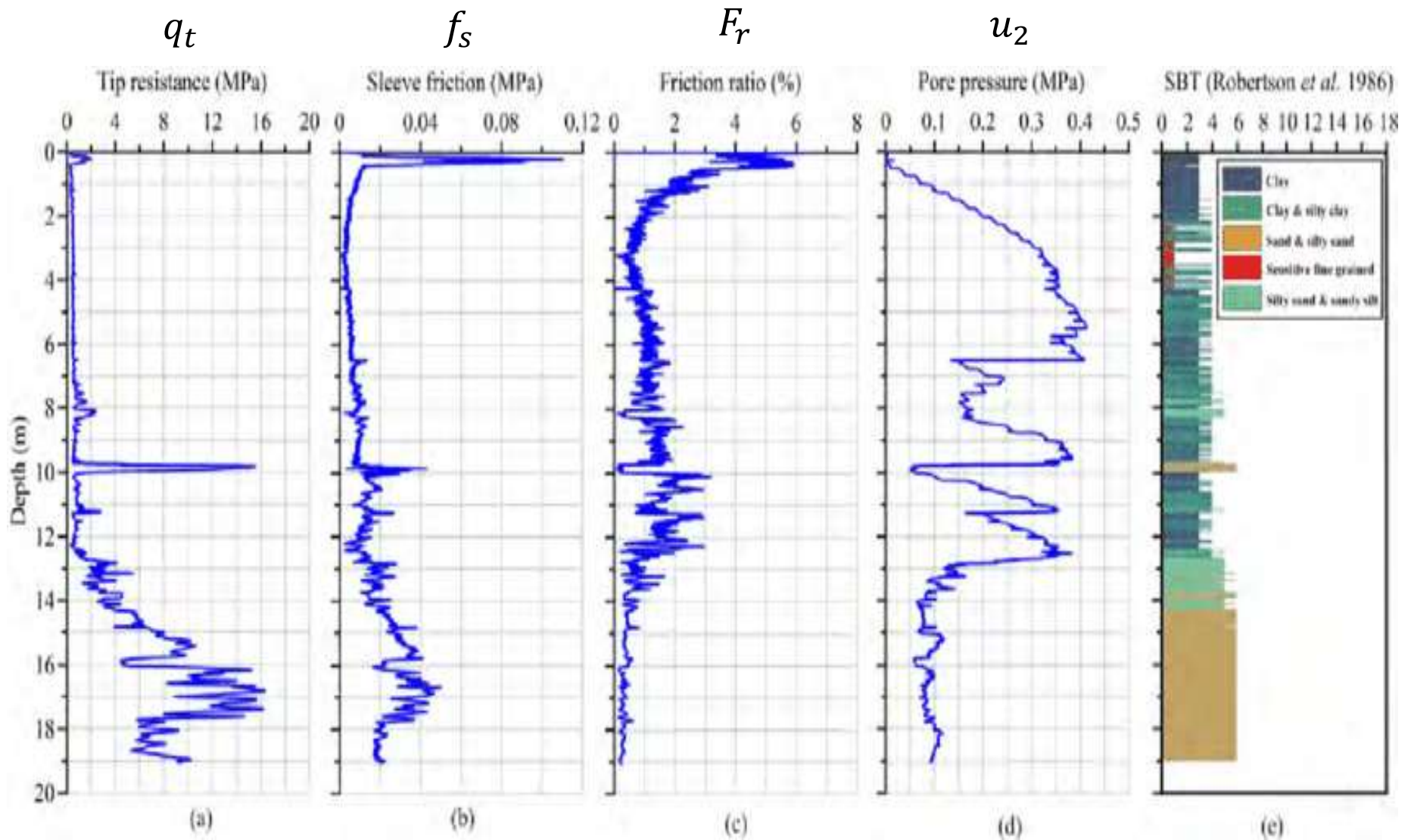
- CCS: Clay-like – Contractive – Sensitive
- CC: Clay-like – Contractive
- CD: Clay-like – Dilative
- TC: Transitional – Contractive
- TD: Transitional – Dilative
- SC: Sand-like – Contractive
- SD: Sand-like – Dilative



Con velocidad de propagación de onda de corte ($V_s \rightarrow G_0$) se puede estimar el grado de estructuración del depósito



Identificación de suelos con CPTu





Estimación de resistencia al corte no drenado y sensibilidad con CPTu

$$s_{u,max} \cong (q_t - \sigma_v) / N_{kt}$$

- s/Cam-Clay: $N_{kt} \cong 2.44 + 1.33 \ln(E/s_u)$

E/s_u	400	600	800
N_k	10.4	11.0	11.3

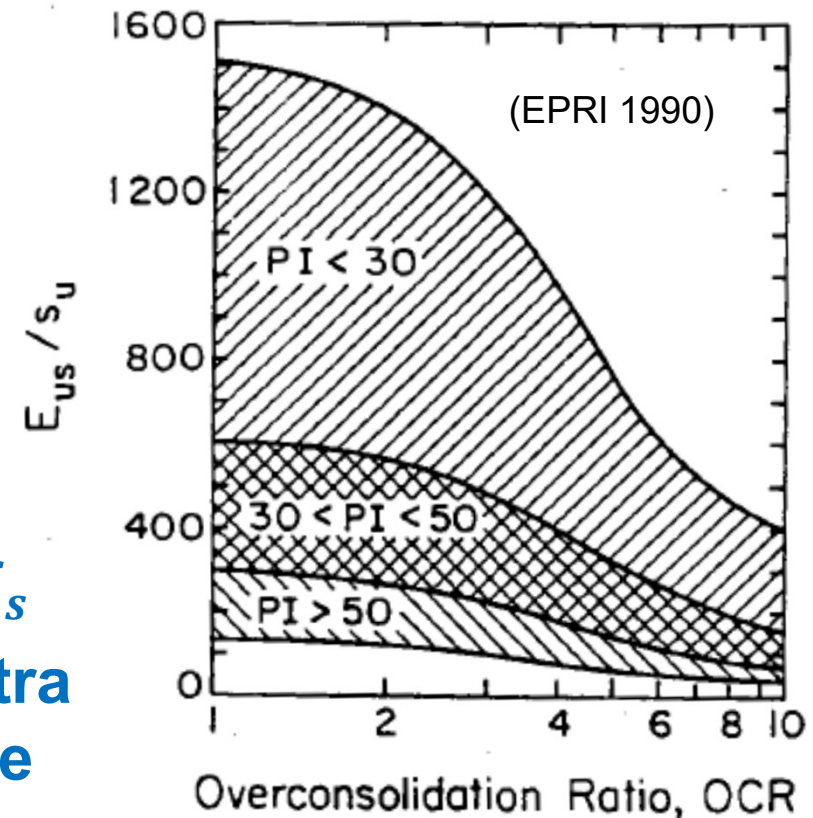
- Rango experimental $N_{kt} = 12|14|16$

$s_{u,r}$ se estima con:

- Sensitividad (S)
- Fricción lateral del cono (f_s)

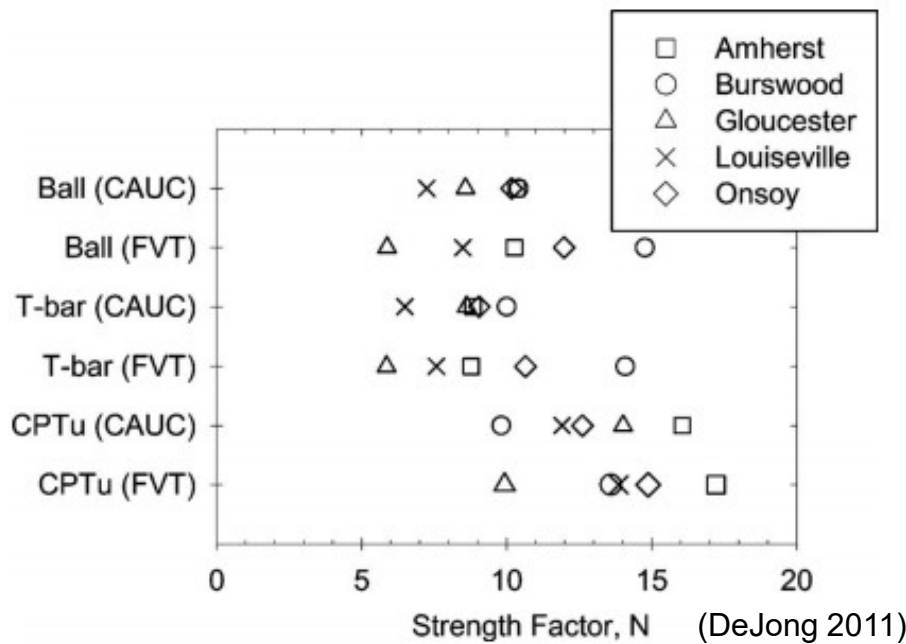
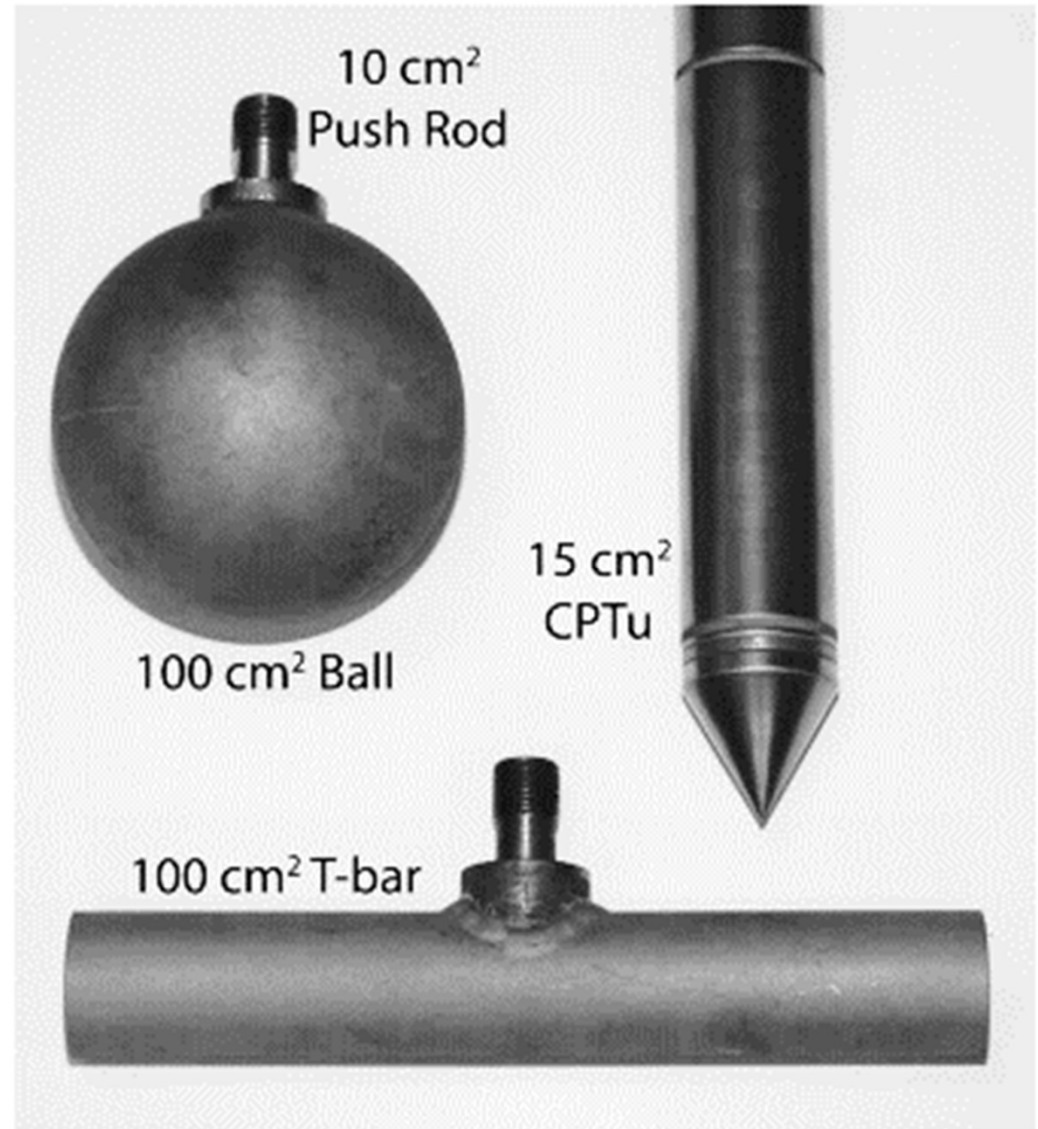
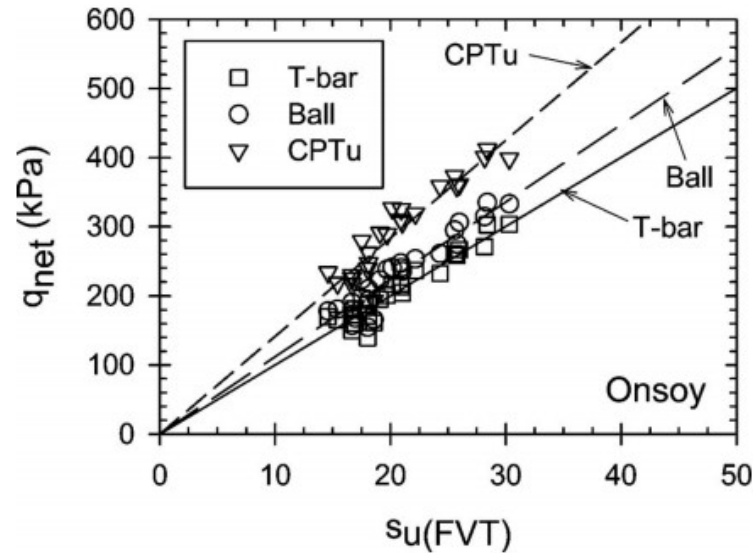
$$S = s_{u,max} / s_{u,r} \cong (q_t - \sigma_v) / N_{kt} \cdot 1 / f_s$$

Conviene calibrar los resultados contra VST, ensayos triaxiales o corte simple



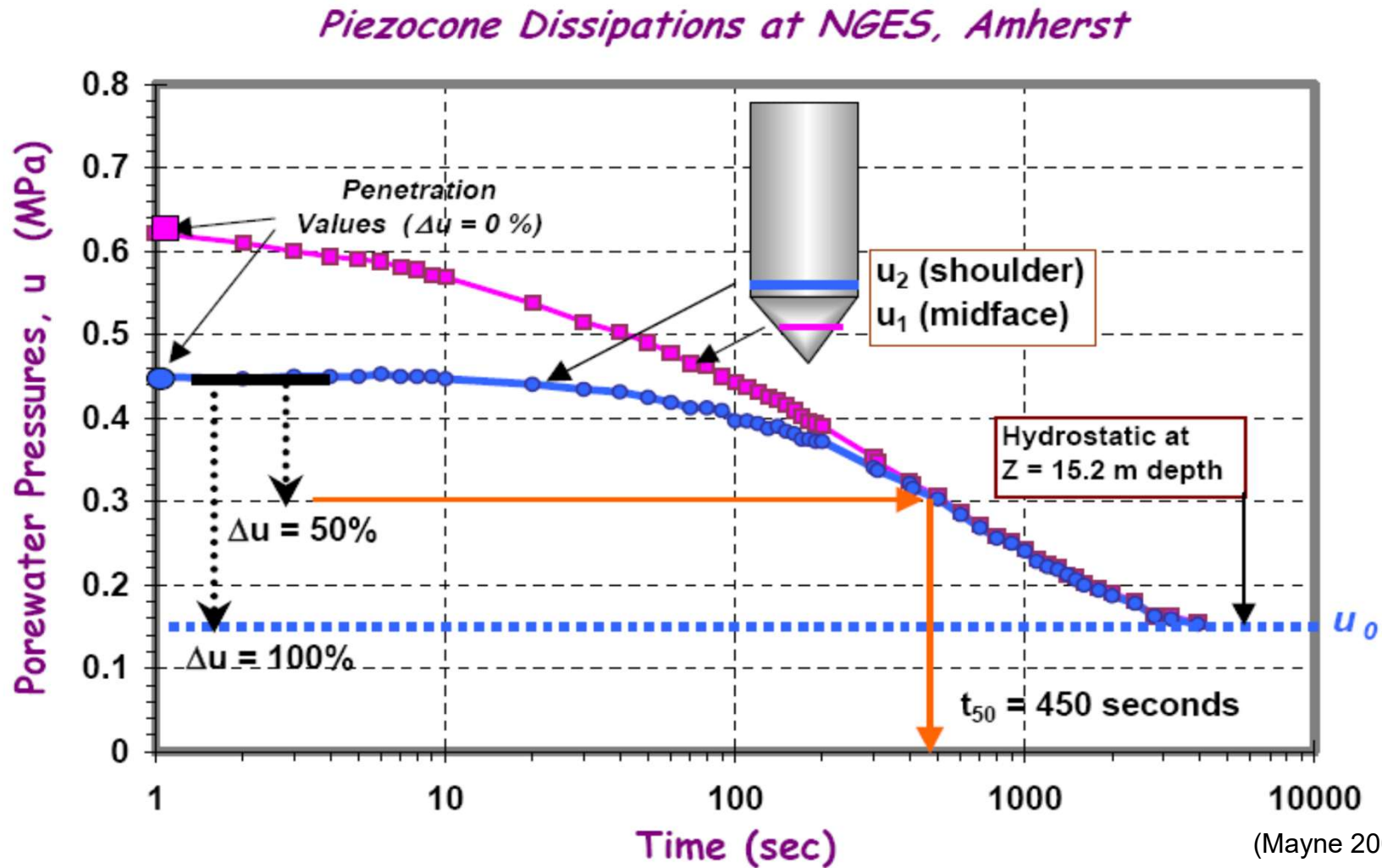


Calibración con otros penetrómetros





Ensayos de disipación con CPTu (evaluar tiempos de consolidación)



Ensayos de disipación con CPTu



Disipación de presiones de poro durante pausa en la penetración

- Permeabilidad horizontal
- Piezométrica estacionaria
- Condiciones de drenaje durante la penetración

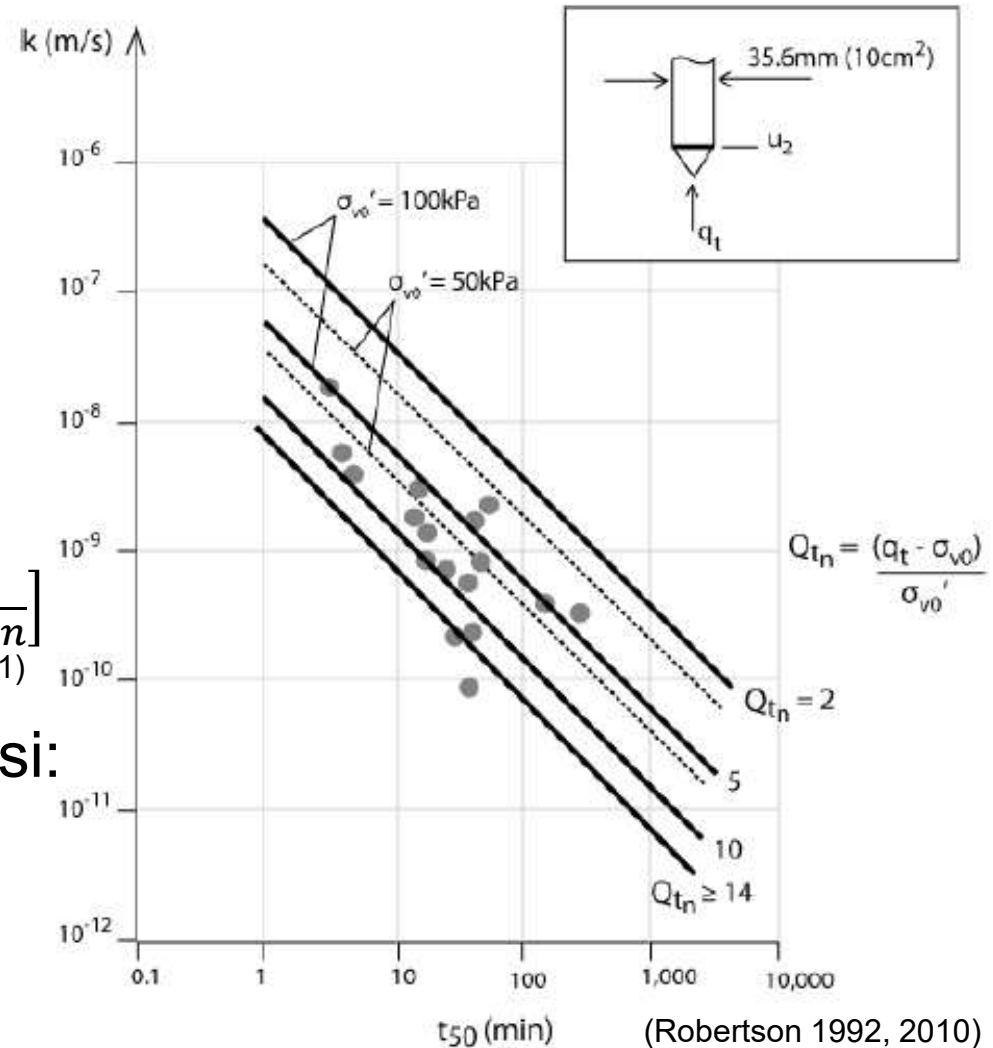
$$c_h \left[\frac{m^2}{sec} \right] \cong (1.67 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^{1 - \log \left[\frac{t_{50}}{1 \text{ min}} \right]}$$

(Teh 1991)

- La penetración es no drenada si:

$$V = \frac{v \cdot d_c}{c_h} > 10$$

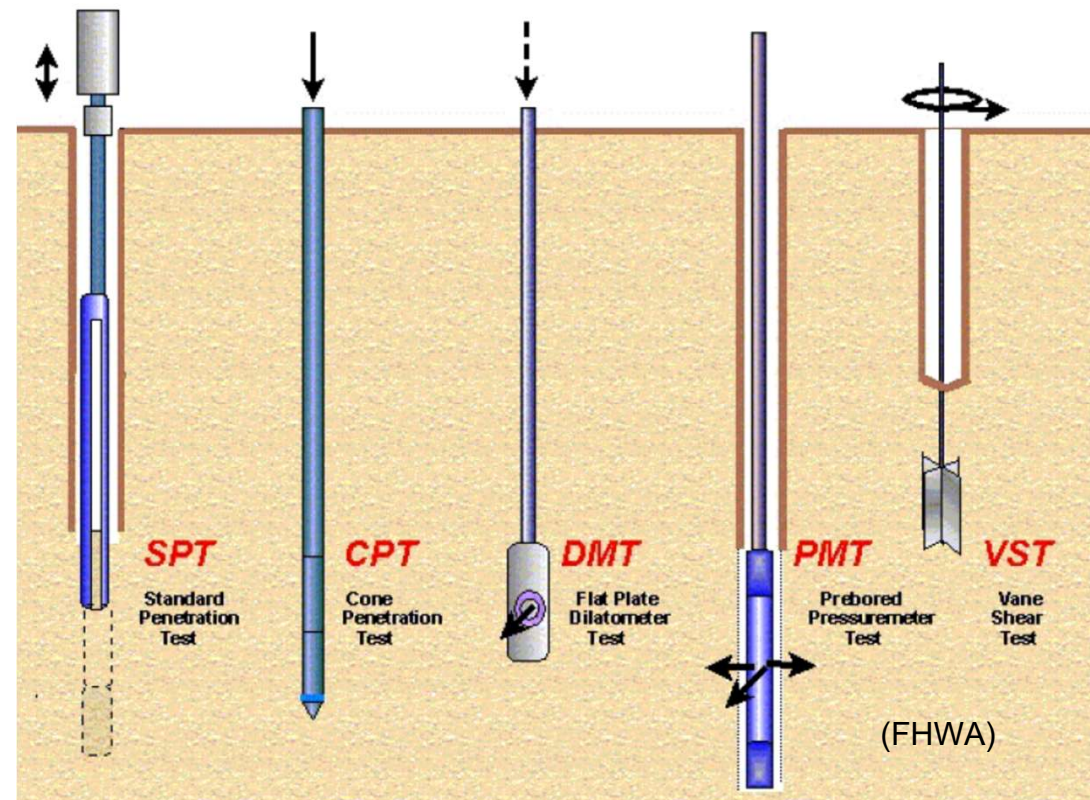
(Finnie & Randolph 1994, DeJong & Randolph 2010)





Índice

- SPT: Standard Penetration Test
- CPT: Cone Penetration Test
- PMT: Pressuremeter Test
- VST: Vane Shear Test
- DMT: Dilatometer Test
- PLT: Plate Load Test



Presurímetro Menard



<https://www.youtube.com/watch?v=TScwup1pJCo>
<https://www.youtube.com/watch?v=lUeqLDj6u-k>

Es un ensayo standard en Francia
(norma DTU 13.2)

- Mide rigidez y resistencia in situ inflando una sonda cilíndrica que se expande en forma radial



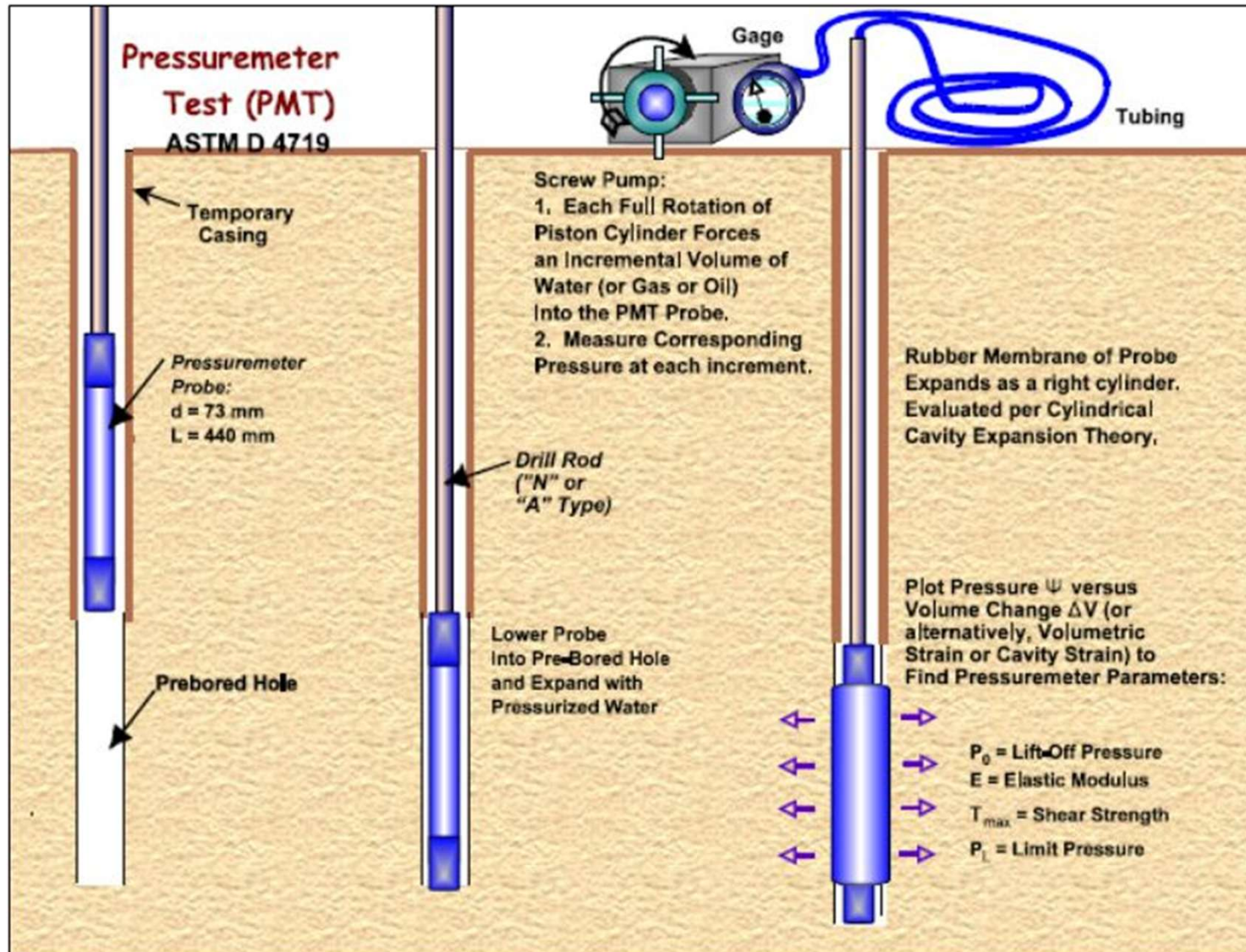
Sonda cilíndrica



Sonda + tablero control + presurizador



Presurímetro Menard



Parámetros que se miden

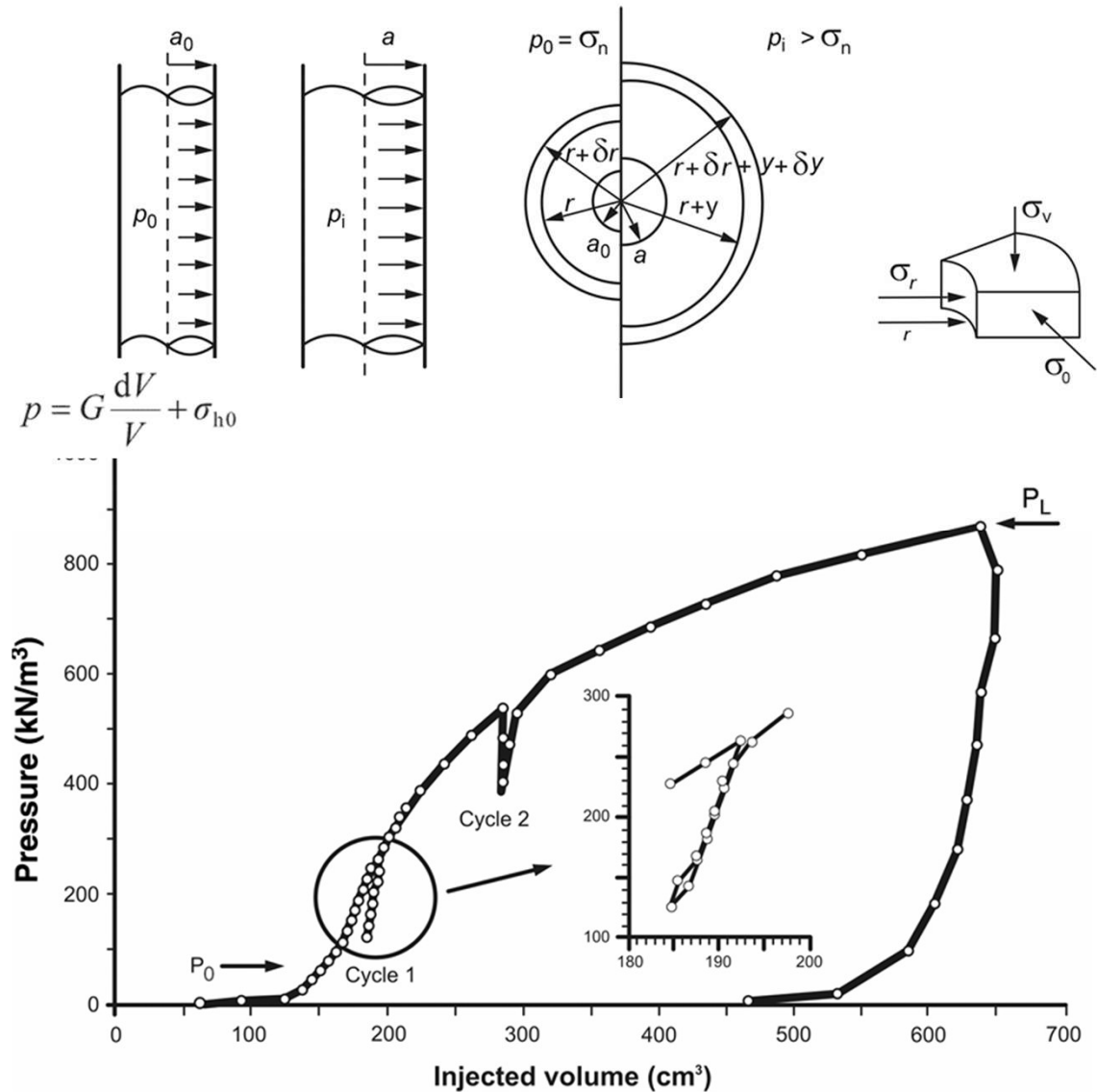


- Presión de contacto (p_0)
- Presión de fluencia (p_f)
- Presión límite (p_l)

$$- p = G \frac{dV}{V} + \sigma_{h0}$$

Desventaja del ensayo:

La sonda no queda bien fijada a las paredes de la perforación

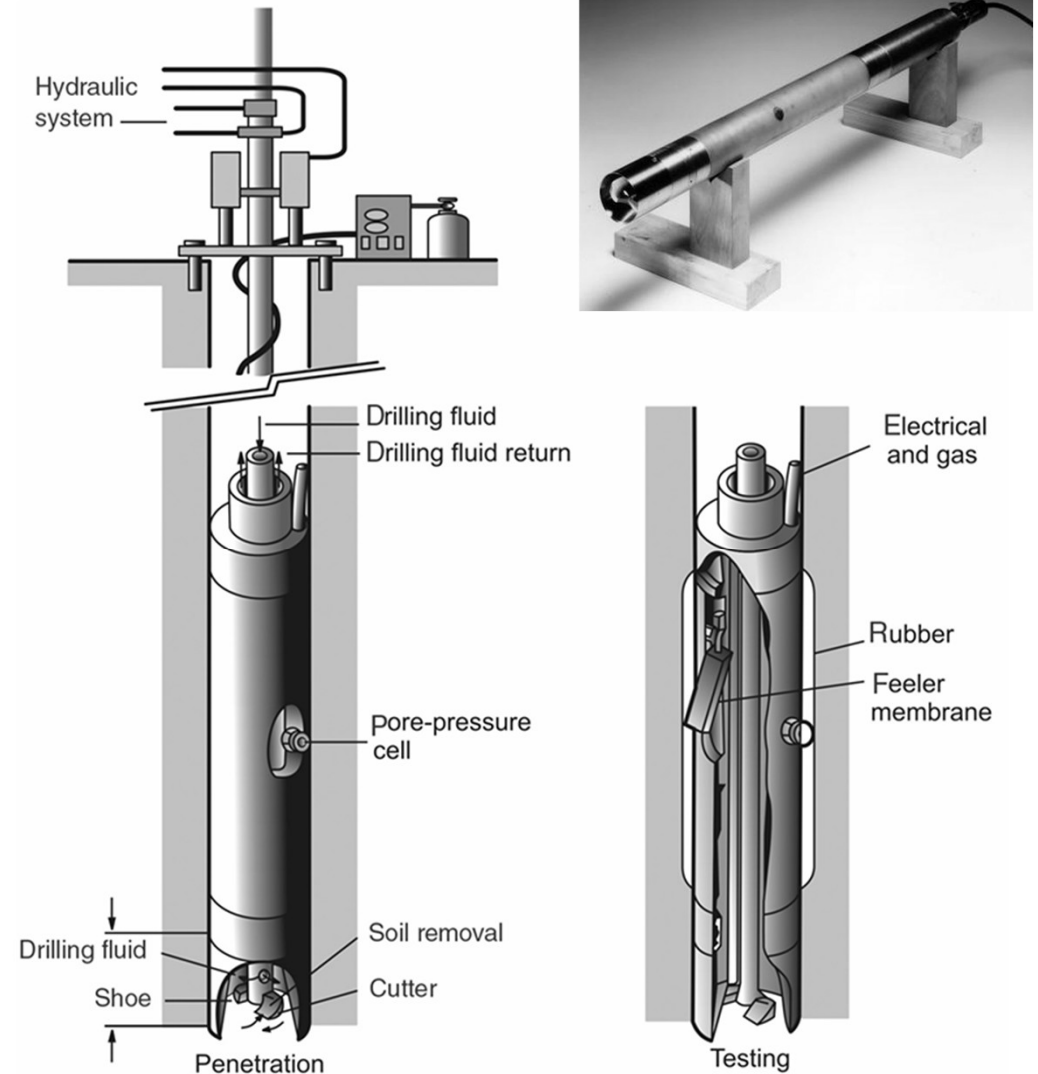


Presurímetro autoperforante



Presurímetro que perfora su propio orificio:

- No hay relajación de las paredes de la perforación
- Permite medir la rigidez inicial con mayor precisión
- Permite medir $K_0 = \frac{\sigma'_{h0}}{\sigma'_{v0}}$

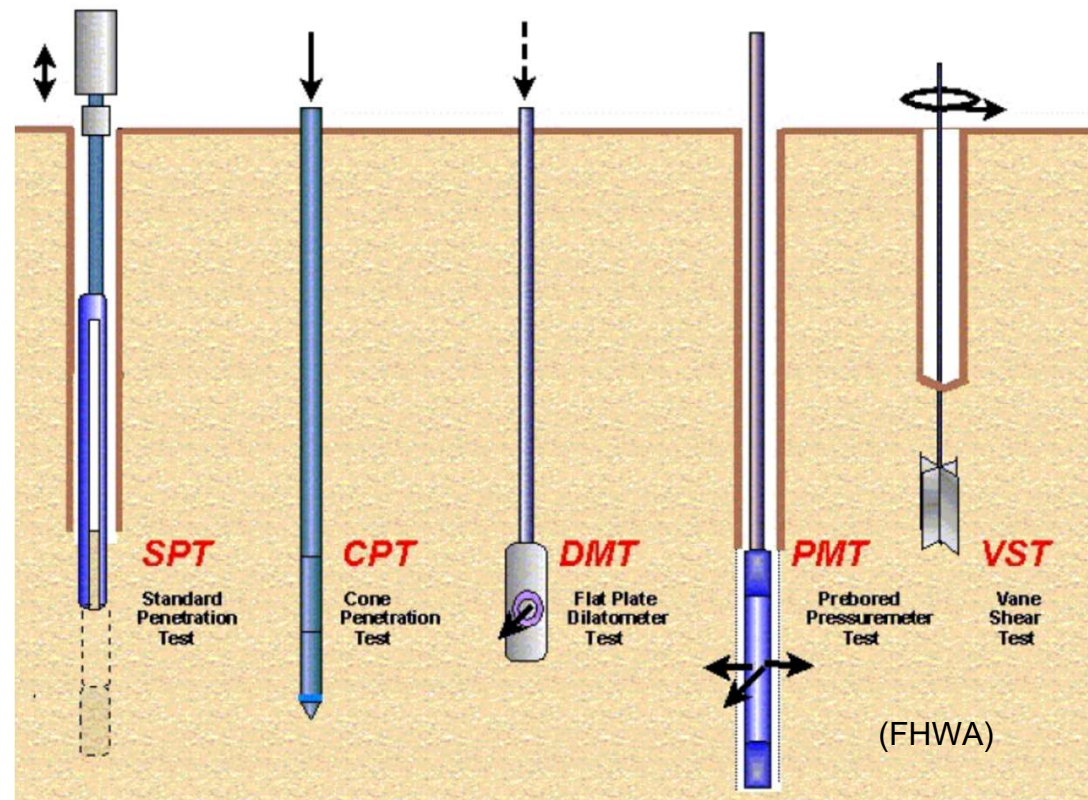


(adapted from Weltman and Head, 1983)



Índice

- SPT: Standard Penetration Test
- CPT: Cone Penetration Test
- PMT: Pressuremeter Test
- VST: Vane Shear Test
- DMT: Dilatometer Test
- PLT: Plate Load Test



Ensayo de veleta VST



- Determinación directa in situ de resistencia al corte no drenada (s_u) y sensibilidad (S)
- Apto en suelos blandos o medios, no apto en suelos duros o granulares
- Puede practicarse en coincidencia con perforaciones hechas para otros trabajos
- Un buen torquímetro, fundamental



Diferentes juegos de veletas



Mini VST (laboratorio)



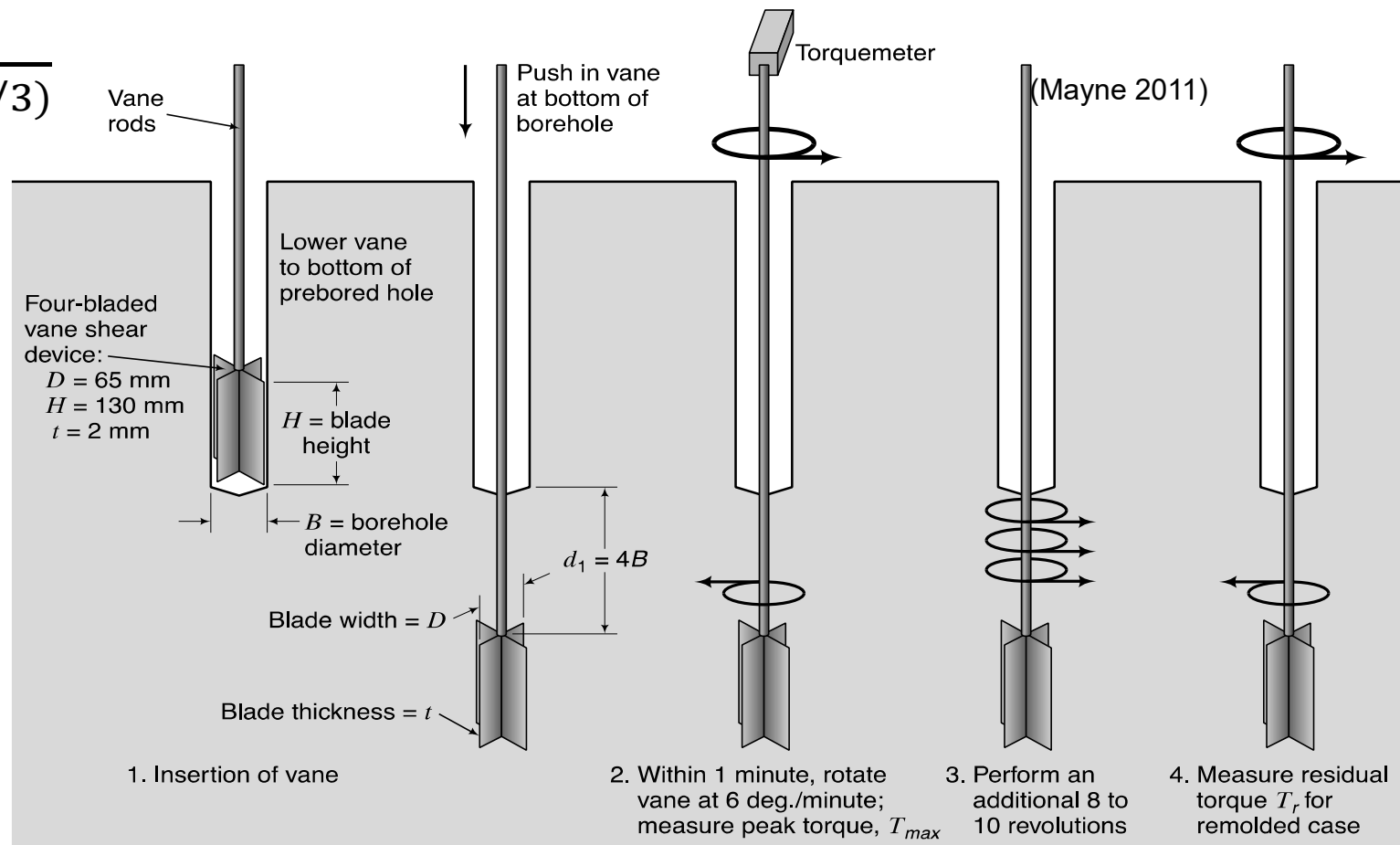
Ensayo de veleta VST

Secuencia del ensayo (resistencia a torsión de veleta)

$$S_u = \frac{2T}{\pi d^3 (h/d + 1/3)}$$

$$S = \frac{T_{max}}{T_r}$$

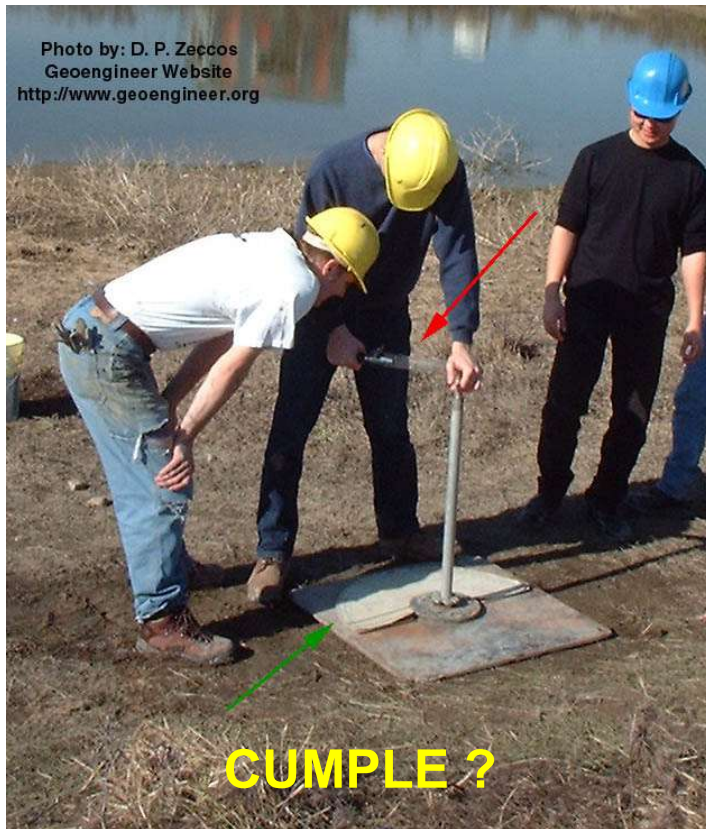
$T = \text{torque}$





Ensayo de veleta VST

- Ensayo “a deformación controlada” (3 a 12 deg/min)



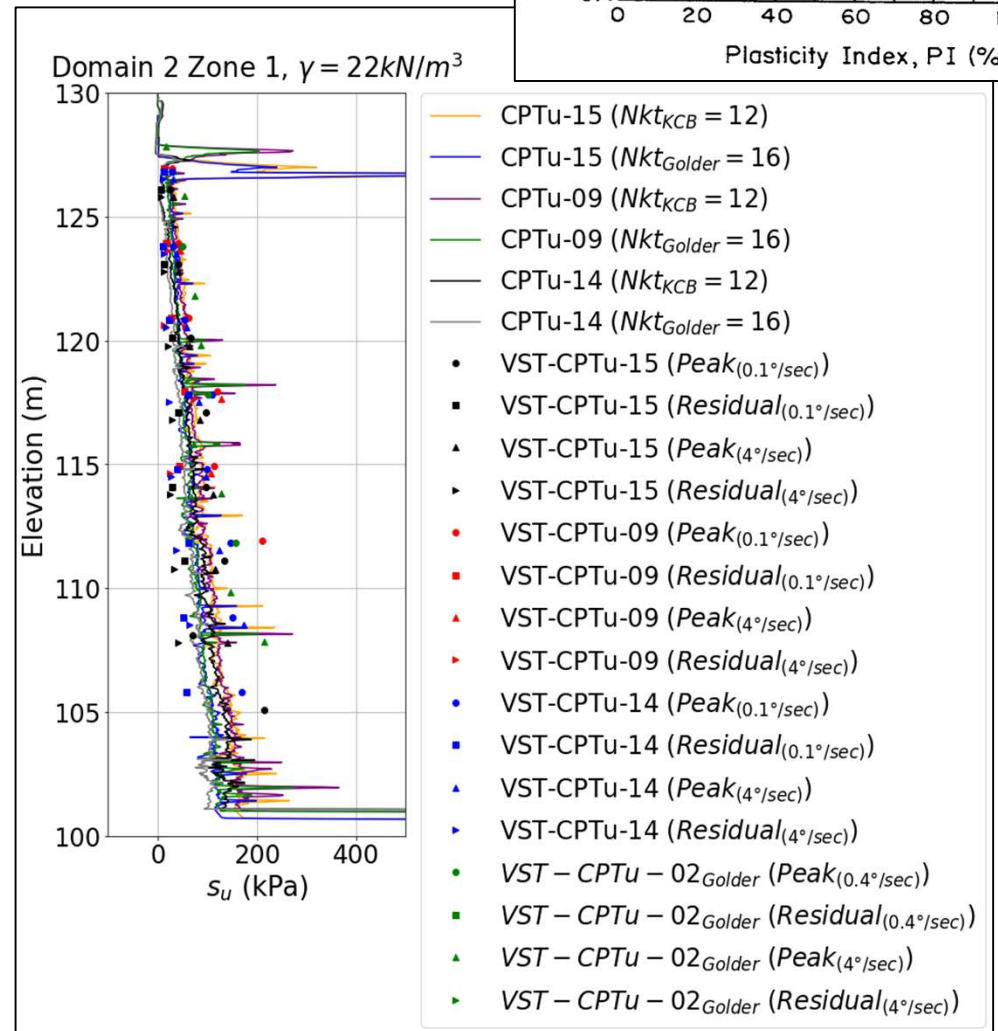
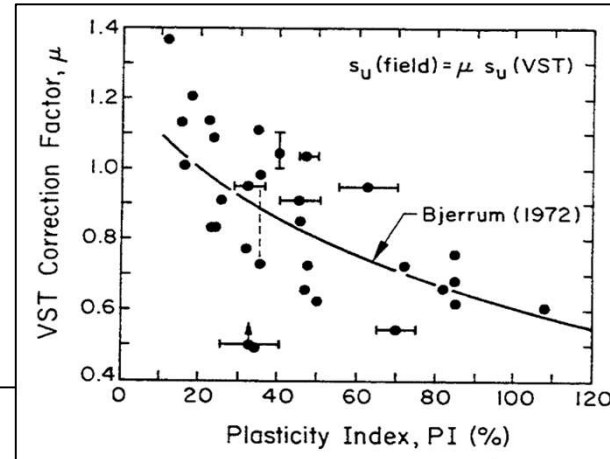
Calibración de CPTu con VST

Ensayos de veleta

- Resist. máxima: $s_{u,max}$
- Se comprueba no drenado girando a dif. velocidades
- Resist. residual: $s_{u,r}$ con 5 y 10 giros
- Sensitividad: $S = s_u/s_{u,r}$

CPTu

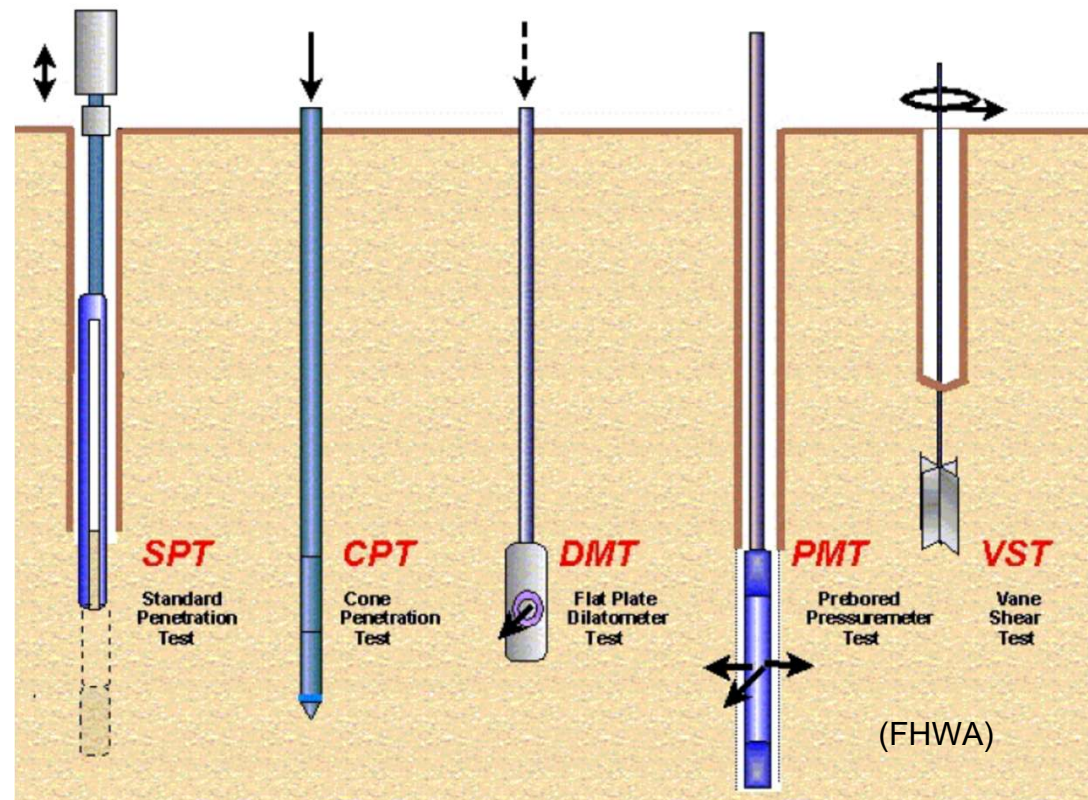
- Veleta permite elegir N_{kt}
- $s_{u,max} \cong (q_t - \sigma_v)/N_{kt}$
- $s_{u,r}$ estimada con S y f_s





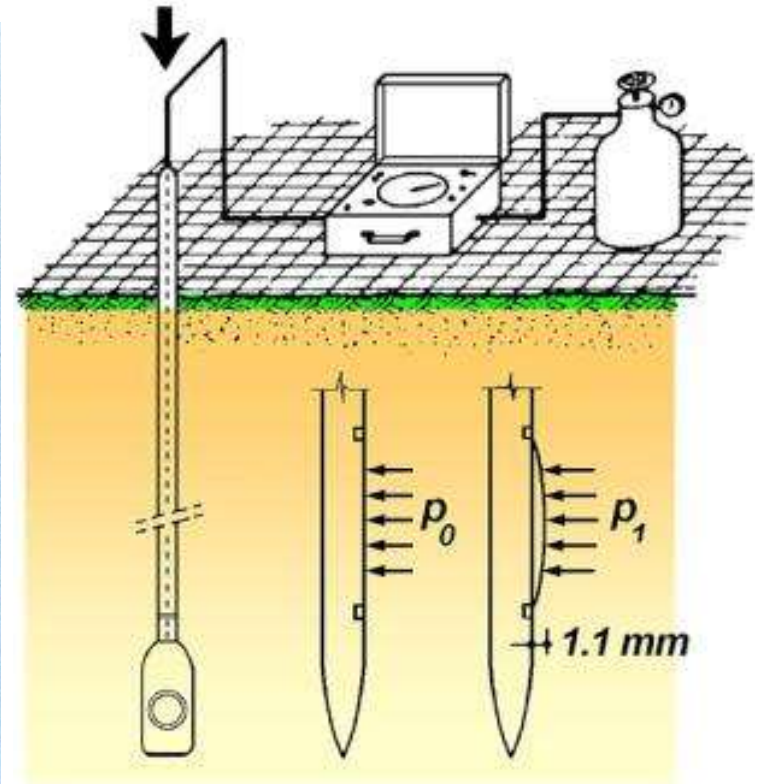
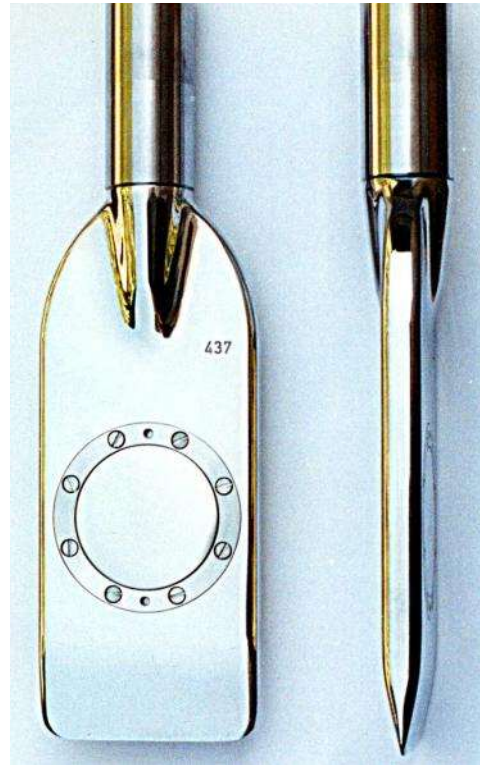
Índice

- SPT: Standard Penetration Test
- CPT: Cone Penetration Test
- PMT: Pressuremeter Test
- VST: Vane Shear Test
- DMT: Dilatometer Test
- PLT: Plate Load Test



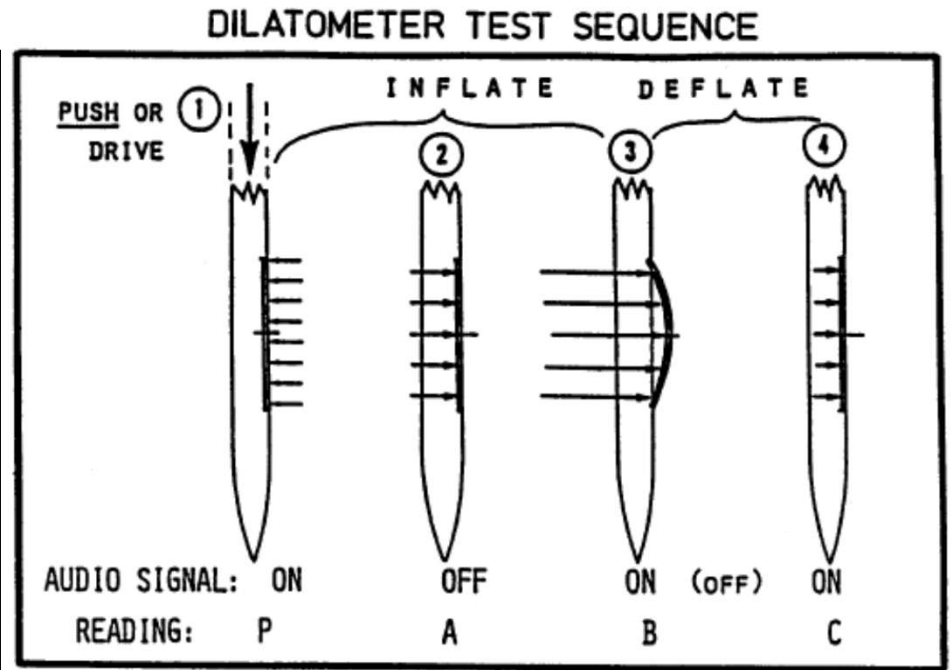
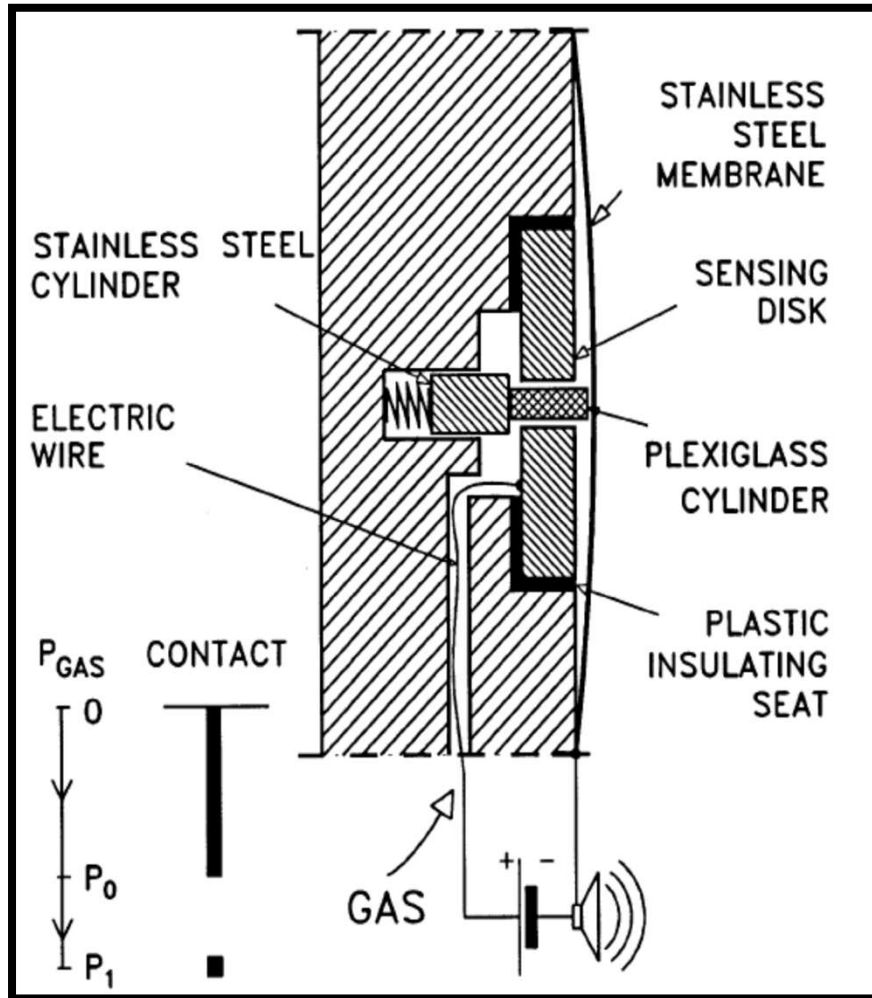


Dilatómetro Marchetti



(Marchetti 2008)

Principio de funcionamiento del DMT

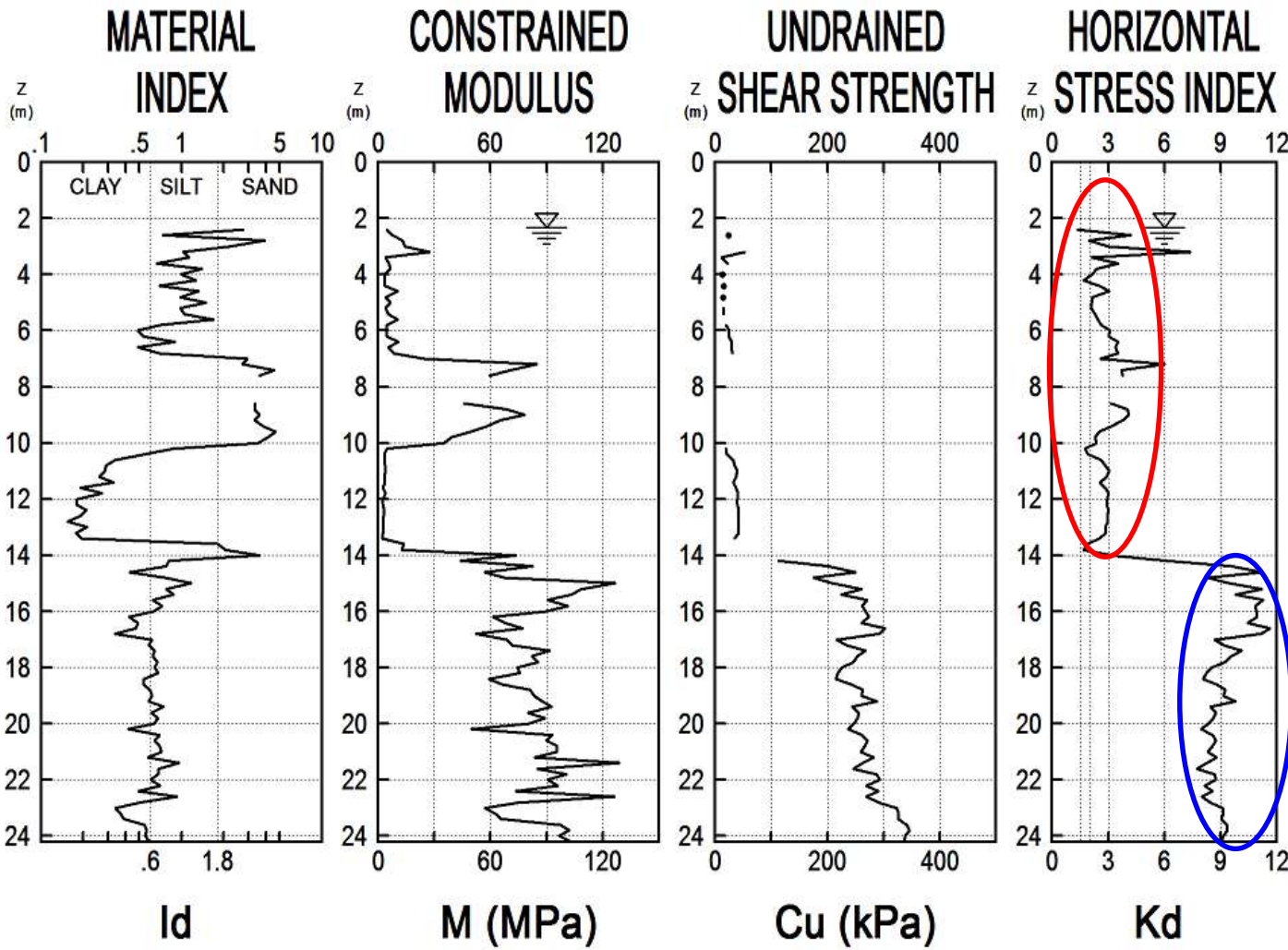


(Marchetti 2008)



DMT: Puede estimar OCR

Ensayos in situ



$$I_D = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0)$$

$$K_D = (p_0 - u_0) / \bar{\sigma}_{vo}$$

$$E_D = 34.7(p_1 - p_0)$$

NC: $K_d \sim 2.0$

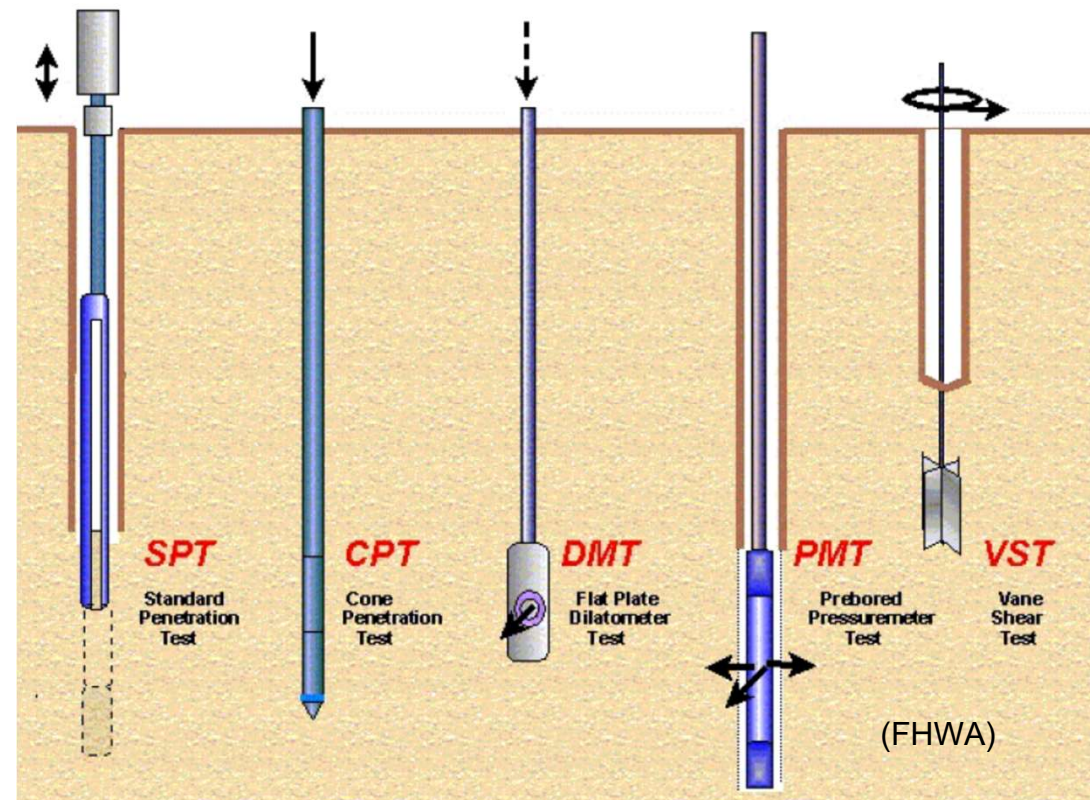
OC: $K_d > 2.0$

(Taranto 1987)



Índice

- SPT: Standard Penetration Test
- CPT: Cone Penetration Test
- PMT: Pressuremeter Test
- VST: Vane Shear Test
- DMT: Dilatometer Test
- PLT: Plate Load Test
- Ensayos geofísicos



Ensayo de carga en placa (PLT)

Mide el coeficiente de reacción de la subrasante

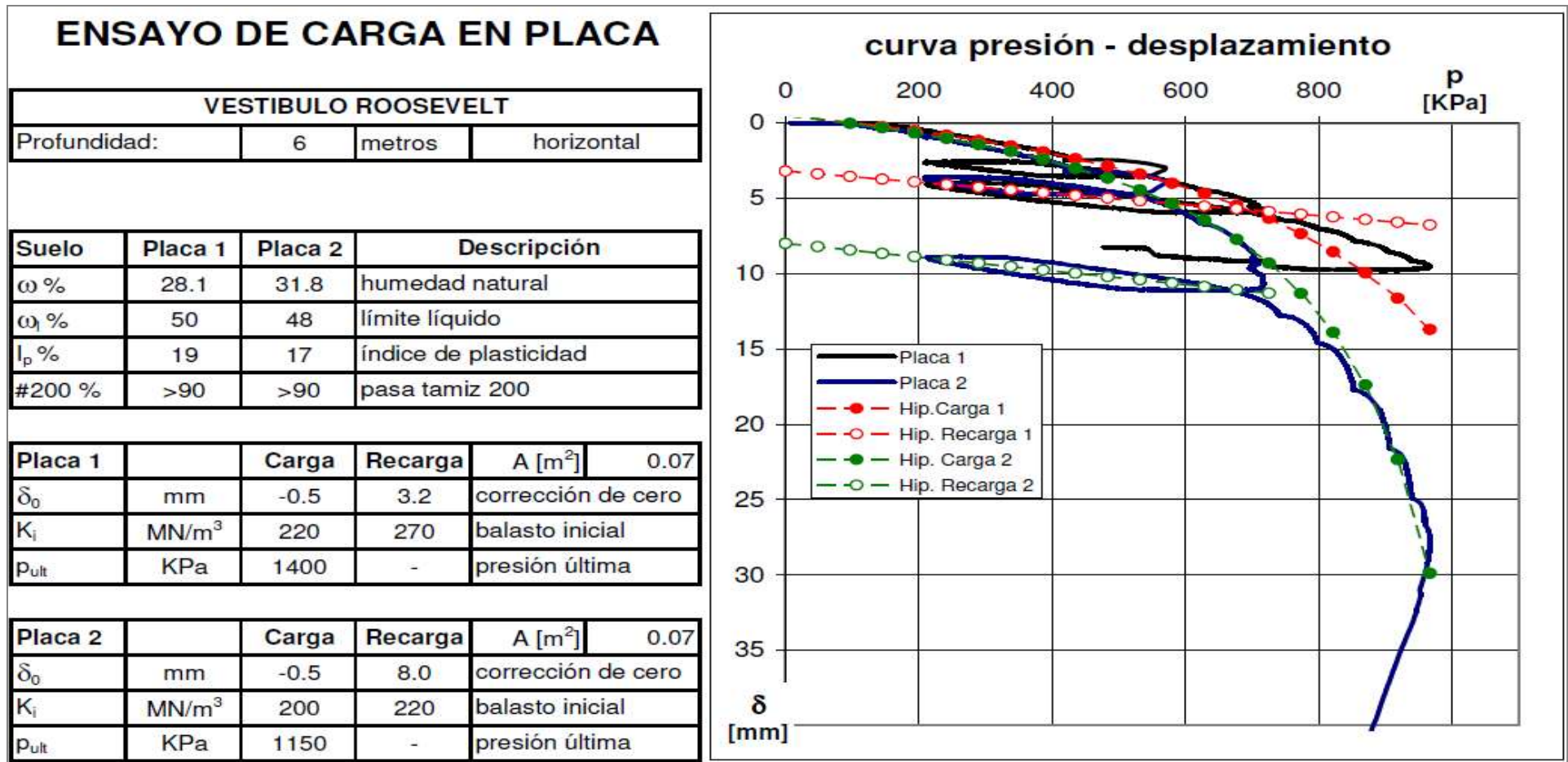
$$k_s = \frac{P}{\delta}$$

- Teoría de la elasticidad: $k_s \propto \frac{E}{B}$
 - Puede aproximarse como
- $$k_s \sim 1.35 \frac{E}{B} \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \frac{B}{L} \right)$$

Permite estimar un valor medio del módulo de Young E

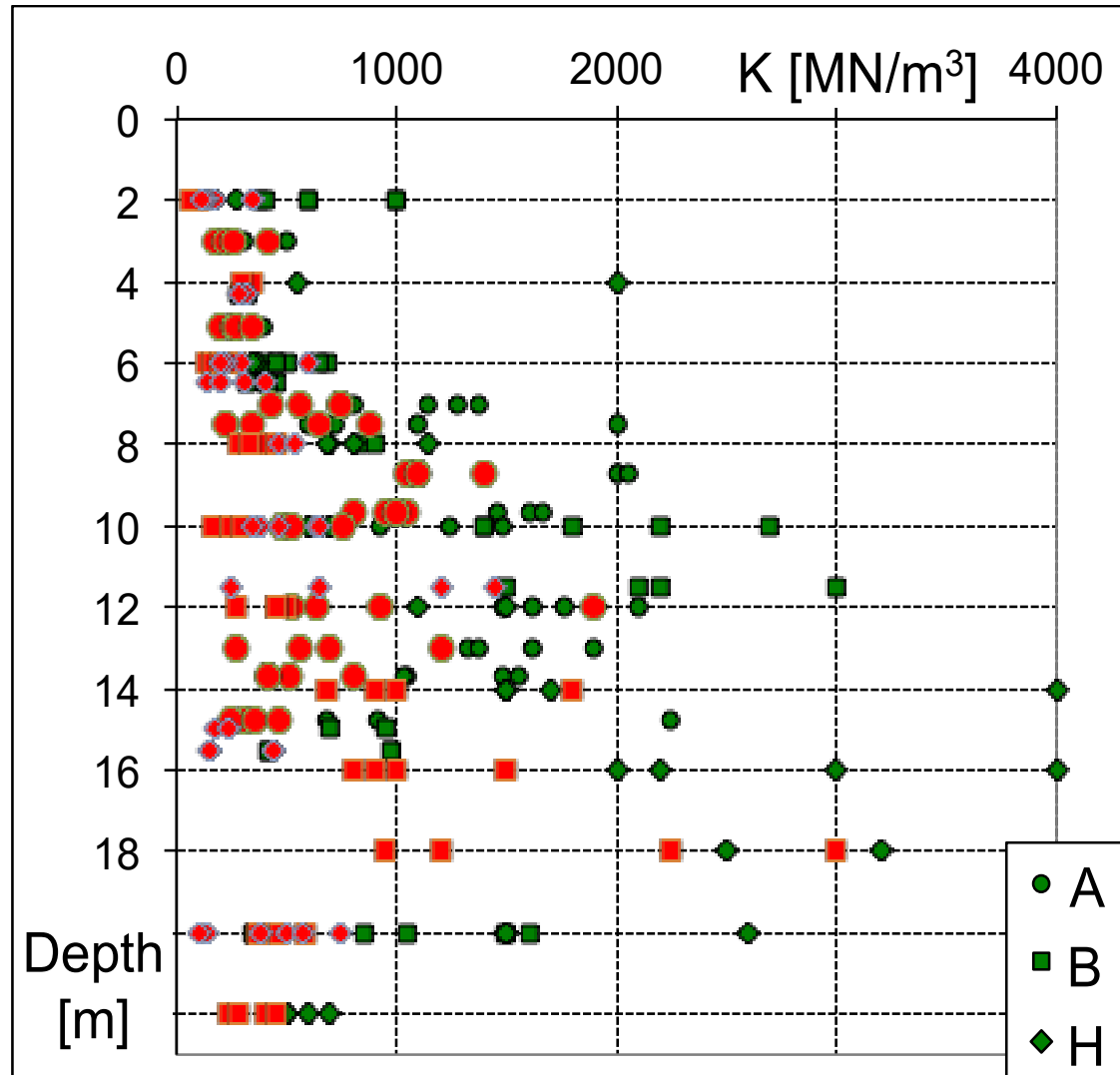
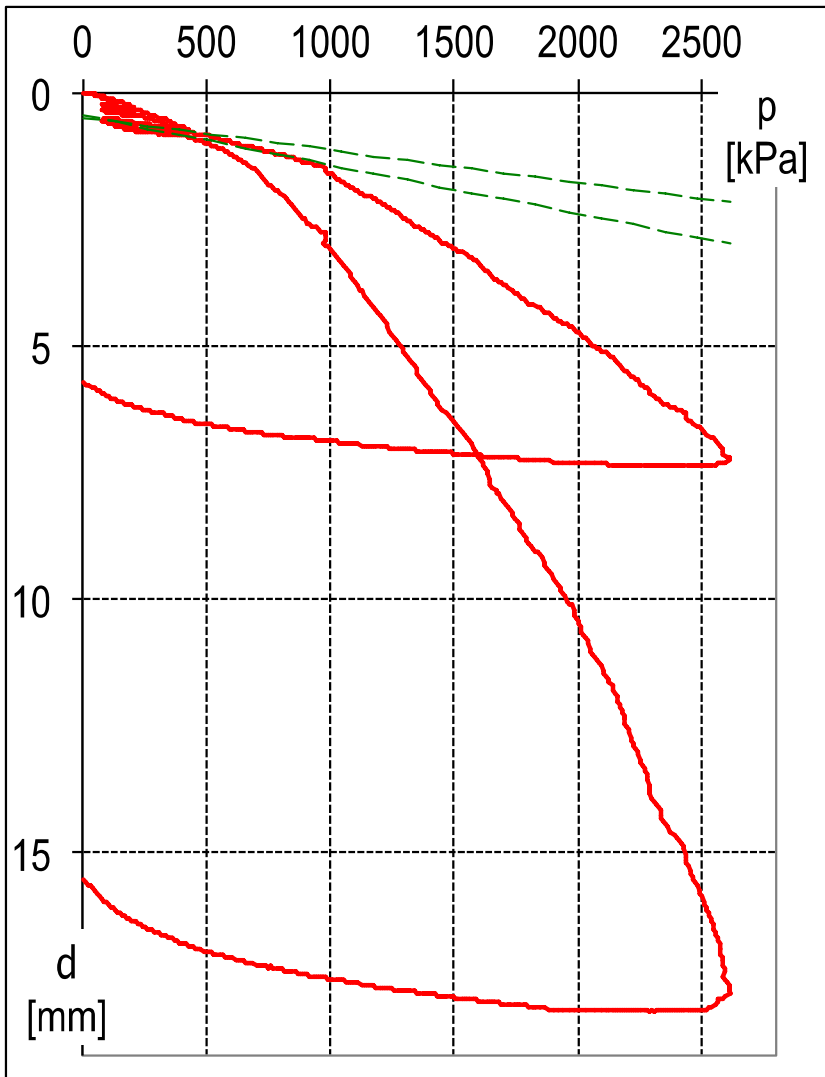


Ensayo de carga en placa: un resultado



(Sfriso 2006)

Ensayo de placa en Pampeano



Resumen



- Saber la metodología de ejecución de cada ensayo
- Saber los recursos asignados (\$\$\$) de cada ensayo
- Saber que parámetros se determinan en cada ensayo
- El uso de correlaciones debe efectuarse con cuidado
- La combinación de varios ensayos mejora la descripción general de un perfil geotécnico

Bibliografía



Básica

- Kulhawy & Mayne. Manual on estimating soil properties for foundation design. EPRI (fuente de figuras)

Complementaria

- FHWA (2001). Manual on subsurface investigations. NHI-01-031.
- FHWA (2006). Soils and Foundations I y II. NHI-06-088
- USACE (2001). Geotechnical Investigations. EM 1110-1-1804