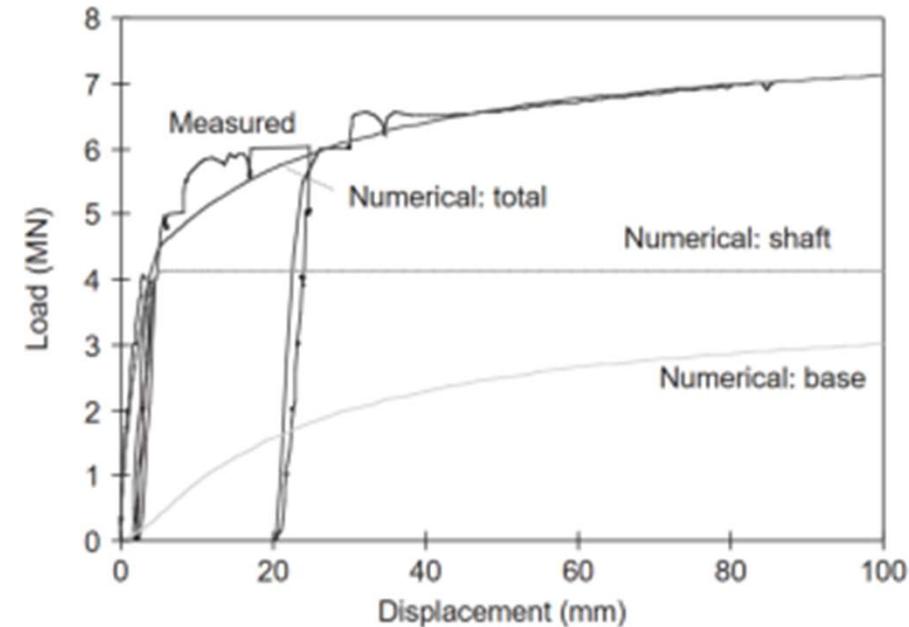
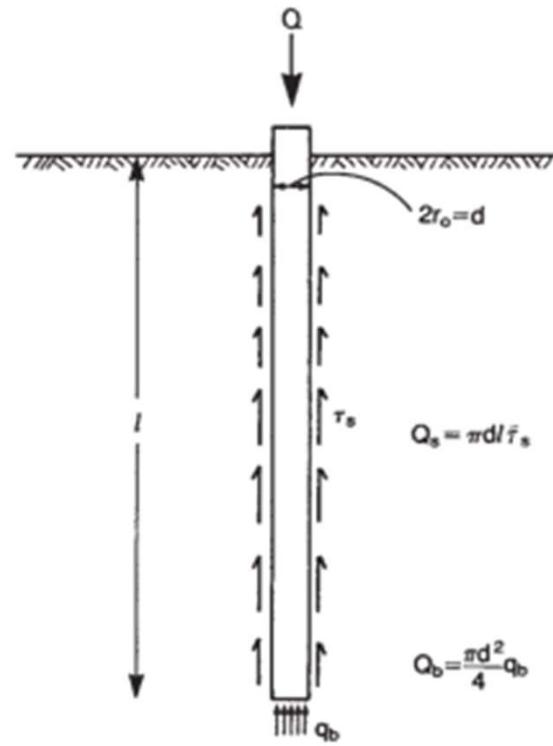


Fundaciones profundas

Estados límites de servicio



Interacción Terreno Estructura I
Especialización en Ingeniería Geotécnica

Contenido

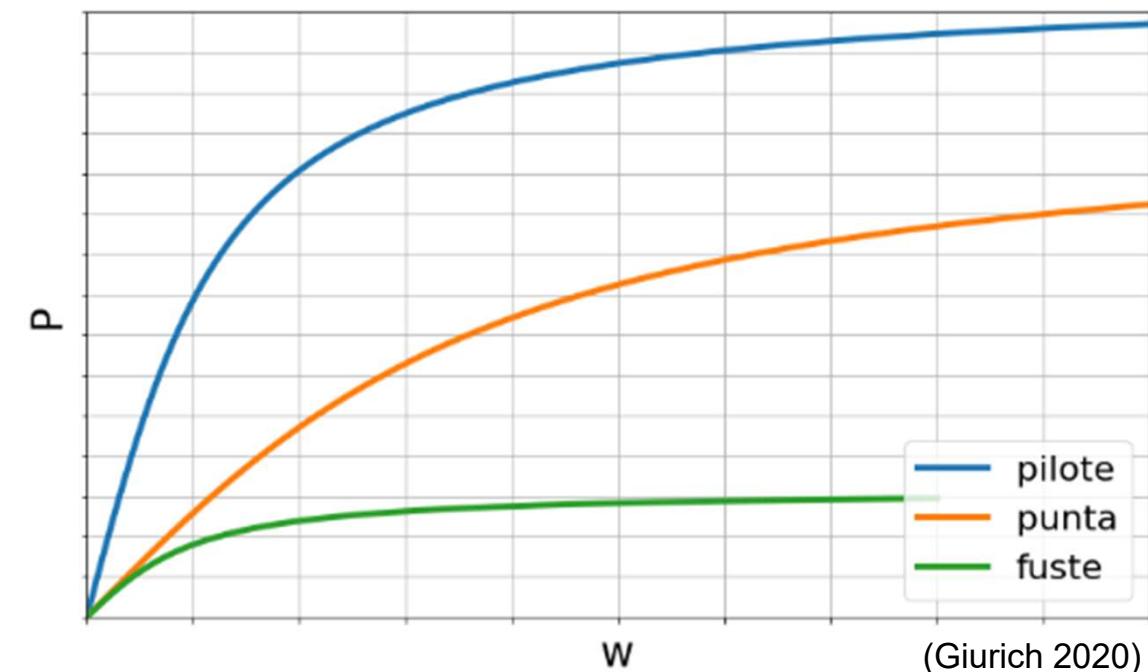
- Definición y tipos de fundación profunda
- Métodos de instalación de pilotes
- Diseño para estados límites últimos
- **Diseño para estados límites de servicio**
 - **Estimación de asentamientos – Métodos analíticos**
 - Problemas de interacción axil lineal
 - Problemas de interacción axil no lineal
- Aspectos de diseño

La idea: determinar la curva $P - \delta$ de diseño

Si ULS es de la superestructura y no del pilote:

**Procedimiento para
determinar la curva $P - \delta$**

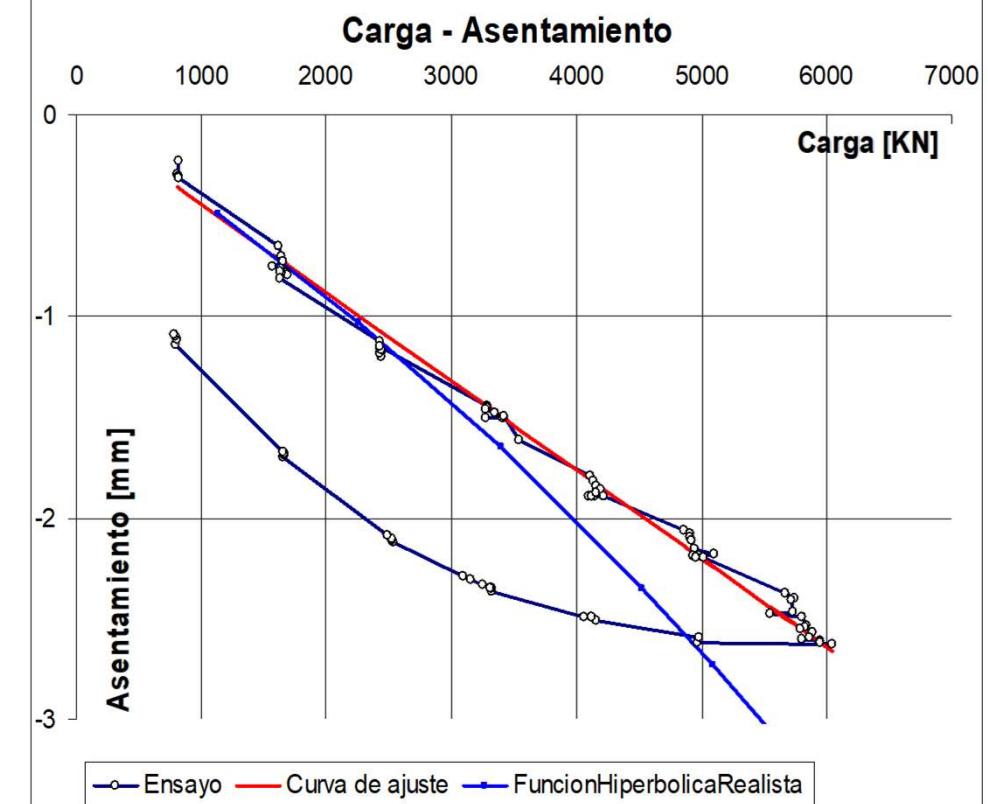
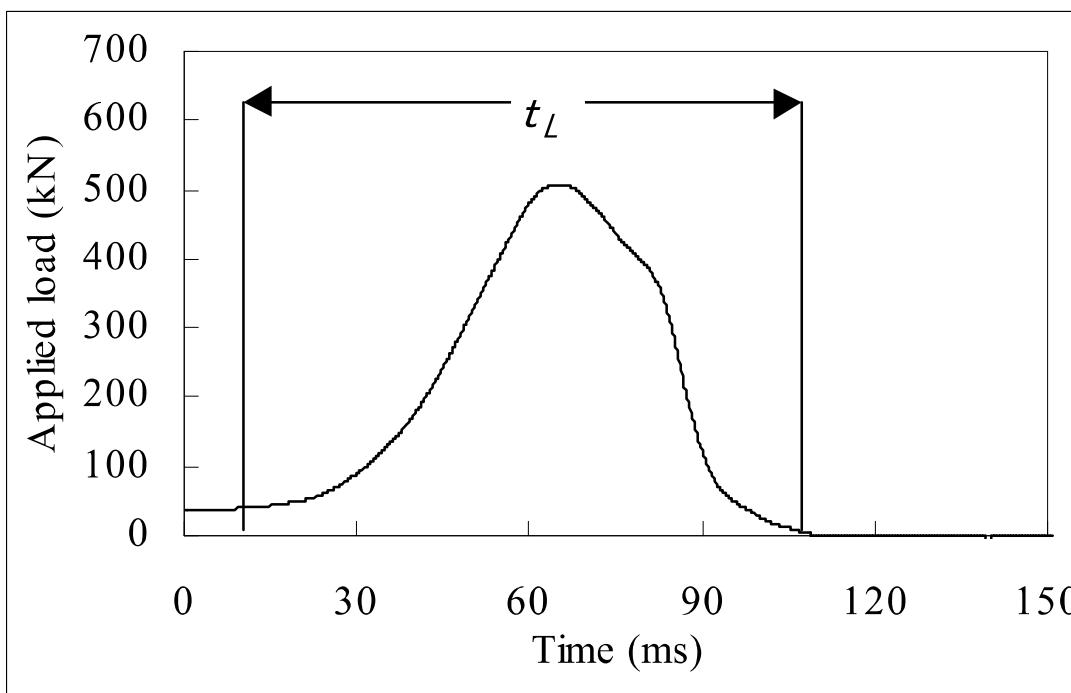
- Parámetros de rigidez medios
- Parámetros resistentes característicos



Esto permite que el estructuralista elija el asentamiento SLS y ULS de la superestructura y determine la carga de diseño

Curva carga-asentamiento

- La mejor herramienta para estimar el comportamiento de un pilote es un **ensayo de carga**.



Métodos analíticos clásicos

Expresión de Vesic

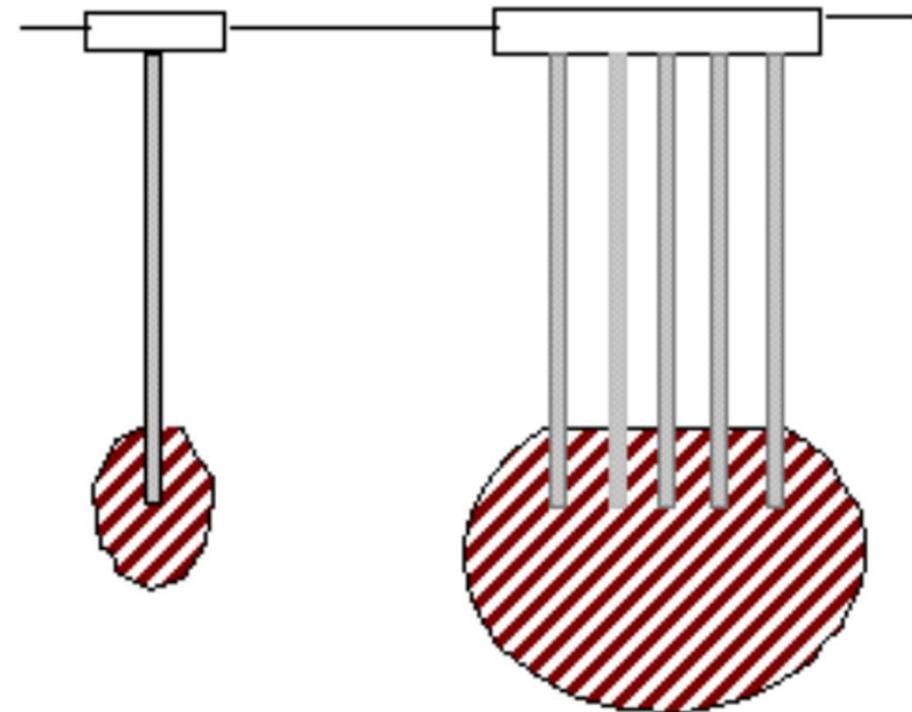
El asentamiento se puede estimar según la expresión de Vesic:

$$w = w_s + w_{pp} + w_{ps}$$

w_s : Asentamiento elástico

w_{pp} : Asentamiento por punta

w_{ps} : Asentamiento por fuste



Asentamiento elástico (w_s)

Compresión de un pilote

Si asumimos que para la carga de servicio, las proporciones de la carga por fricción y por punta son las mismas que en la falla.

$$\text{Punta: } Q_p = Q \cdot \frac{Q_{u.p}}{Q_{u.p} + Q_{u.f}}$$

$$\text{Fricción: } Q_f = Q \cdot \frac{Q_{u.f}}{Q_{u.p} + Q_{u.f}}$$

La carga por la punta será transmitida en toda la longitud del pilote y la carga por fricción será reducida con la profundidad.

Compresión de un pilote

Para un pilote de longitud L y sección A_p , el esfuerzo promedio es

- Arcillas: Fricción constante.

$$\sigma_{pr} = \frac{Q}{A_p} \left(\frac{Q_p + 0.5 Q_f}{Q_u} \right)$$

- Arenas: Fricción linealmente creciente.

$$\sigma_{pr} = \frac{Q}{A_p} \left(\frac{Q_p + 2/3 Q_f}{Q_u} \right)$$

Y la compresión elástica será:

$$\mathbf{w}_s = \frac{\sigma_{pr} L}{E_p}$$

Asentamiento de un pilote individual en condiciones drenadas (USACE 1993)

- Deformación por punta:
- Deformación por fuste:

$$w_{pp} = \frac{c_p q_p}{D q_u}$$

$$w_{ps} = \frac{c_s q_s}{L q_u}$$

Donde:

- c_p depende del tipo de terreno y del método de instalación

Value of C_p		
Soil Type	Driven Piles	Bored Piles
Sand (dense to loose)	0.02 to 0.04	0.09 to 0.18
Clay (stiff to soft)	0.02 to 0.03	0.03 to 0.06
Silt (dense to loose)	0.03 to 0.05	0.09 to 0.12

Asentamiento de un pilote individual en condiciones drenadas (USACE 1993)

- Deformación por punta:
- Deformación por fuste:

$$w_{pp} = \frac{c_p q_p}{D q_u}$$

$$w_{ps} = \frac{c_s q_s}{L q_u}$$

Donde:

- c_p depende del tipo de terreno y del método de instalación
- D es el diámetro del pilote
- q_u es la capacidad de carga última por punta
- L es la longitud del pilote
- $c_s = (0.93 + 0.16 \sqrt{L/D}) \cdot c_p$

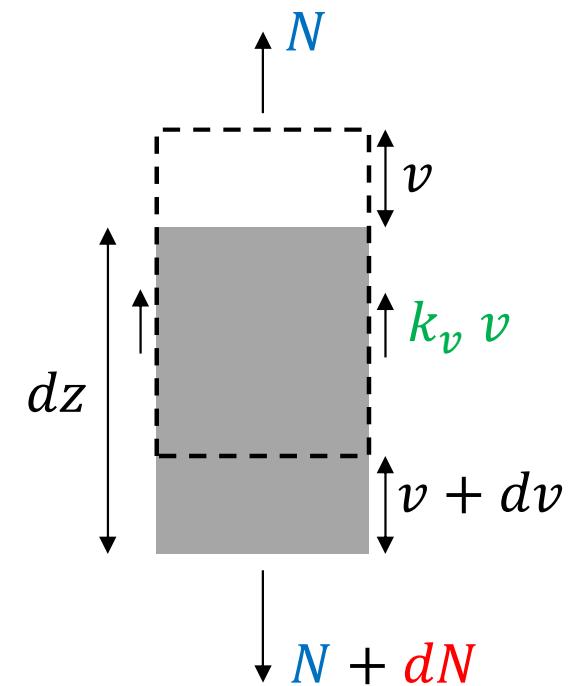
Contenido

- Definición y tipos de fundación profunda
- Métodos de instalación de pilotes
- Diseño para estados límites últimos
- **Diseño para estados límites de servicio**
 - Estimación de asentamientos – Métodos analíticos
 - **Problemas de interacción axil lineal**
 - Problemas de interacción axil no lineal
- Aspectos de diseño

Columnas sobre resortes lineales independientes (Similar a Winkler para vigas)

- Equilibrio: $dN - k_v v dz = 0$
- Relación constitutiva: $N = E A \frac{dv}{dz}$

$$\text{Si } E A = cte \rightarrow \frac{d^2v}{dz^2} - \frac{k_v}{E A} v = 0$$



(Solución general: $v_{(z)} = C_1 e^{\beta z} + C_2 e^{-\beta z}, \beta = \sqrt{\frac{k_v}{E A}}$)

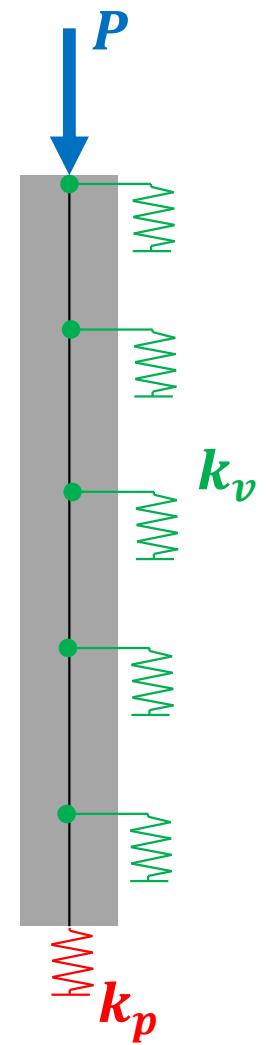
Comportamiento axil elástico de pilotes

Condiciones de borde

- $P = -N_{z=0} = -E A \beta (C_1 - C_2)$
- $N_{z=L} = E A \beta (C_1 e^{\beta L} - C_2 e^{-\beta L}) = -k_p v_{z=L}$
- $N_{z=L} = -k_p (C_1 e^{\beta L} - C_2 e^{-\beta L})$

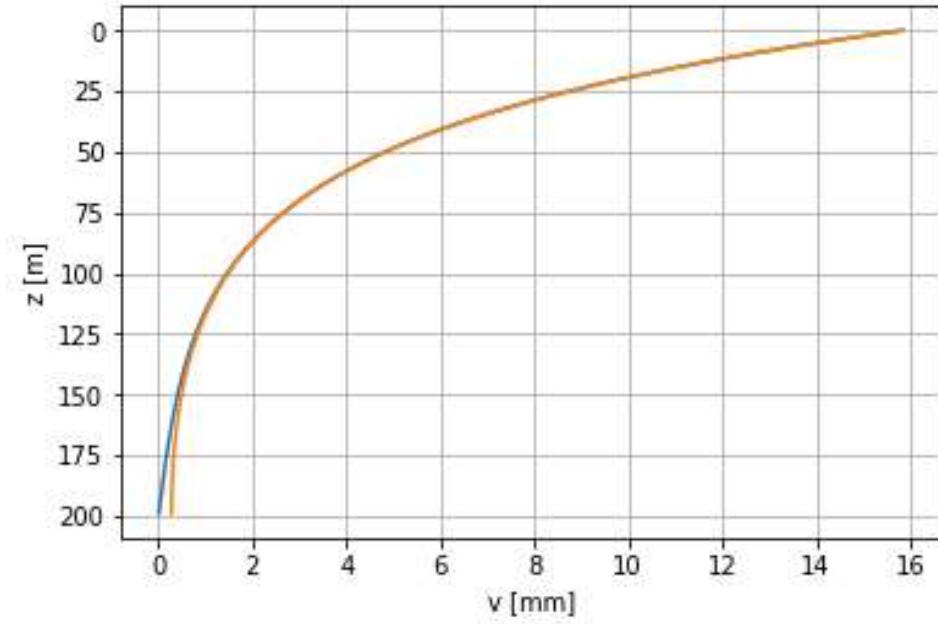
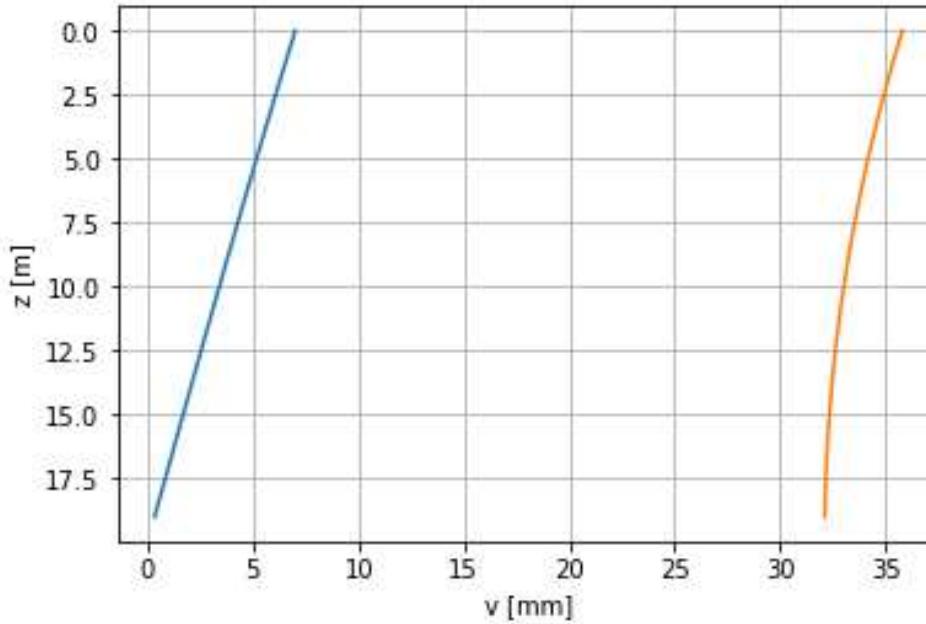
Solución general

$$\bullet \quad v = \frac{P}{E A \beta} \left(\frac{\left(1 - \frac{k_p}{E A \beta}\right) e^{\beta(z-L)} + \left(1 + \frac{k_p}{E A \beta}\right) e^{-\beta(z-L)}}{\left(1 + \frac{k_p}{E A \beta}\right) e^{\beta L} - \left(1 - \frac{k_p}{E A \beta}\right) e^{-\beta L}} \right)$$

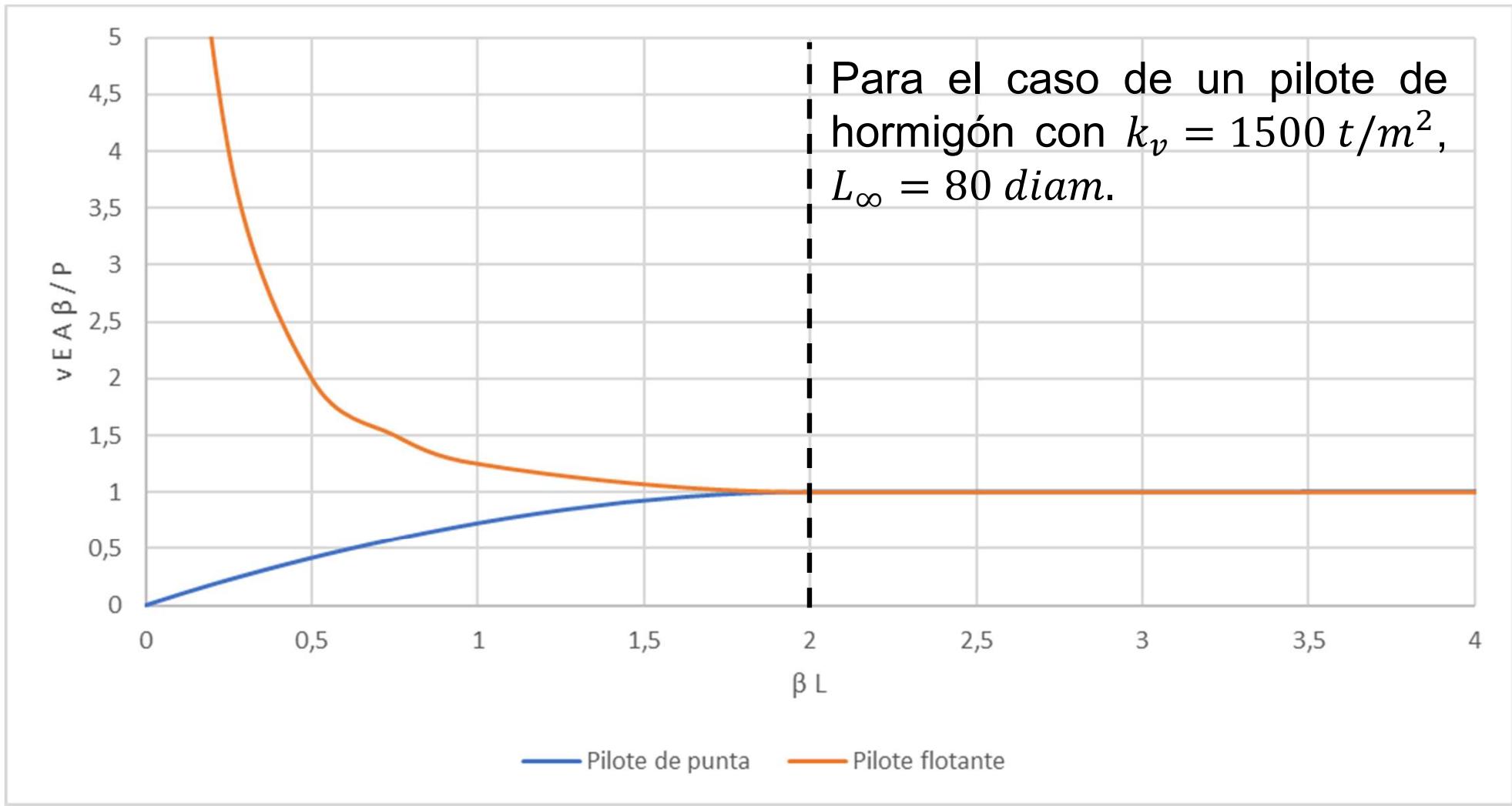


Comportamiento axil elástico de pilotes

- Pilote solo por punta ($k_p = \infty$): $v = \frac{P}{E A \beta} \left(\frac{e^{-\beta(z-L)} - e^{\beta(z-L)}}{e^{-\beta} + e^{\beta L}} \right)$
- Pilote solo por fricción ($k_p = 0$): $v = \frac{P}{E A \beta} \left(\frac{e^{\beta(z-L)} + e^{-\beta(z-L)}}{e^{\beta L} - e^{-\beta L}} \right)$



Comportamiento axil elástico de pilotes

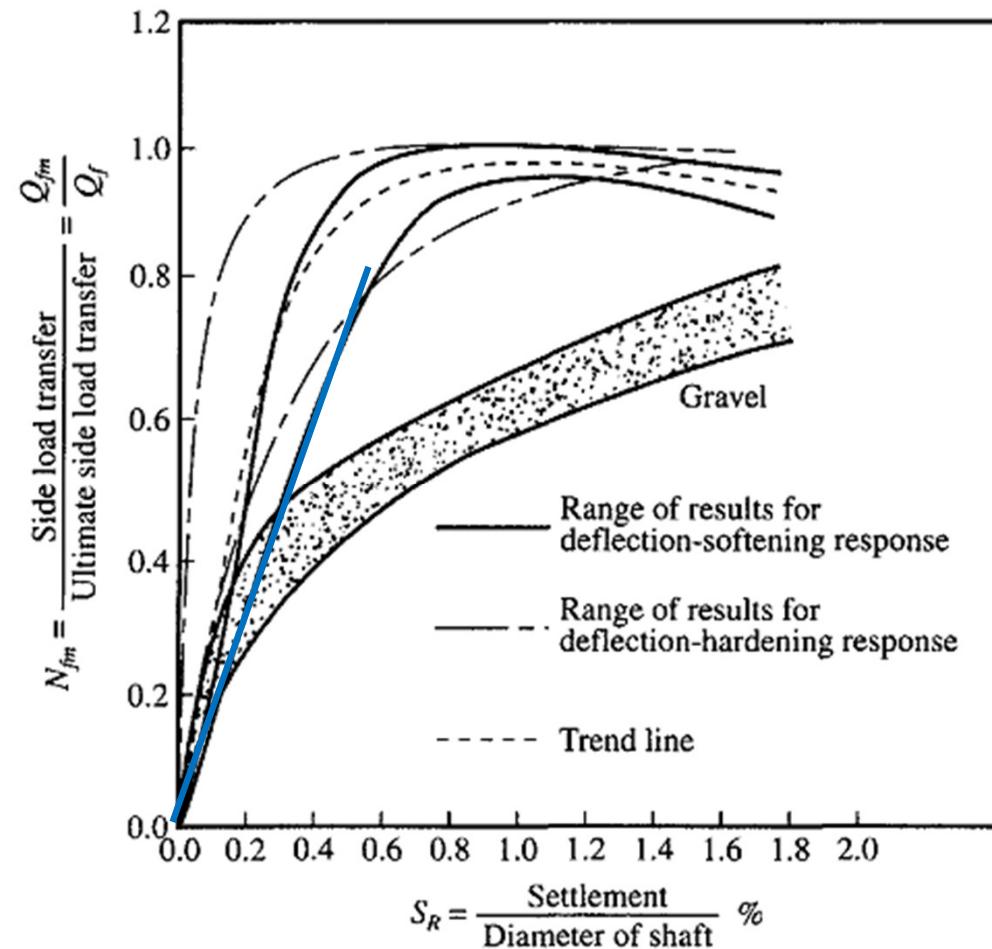


Rigidez en pilotes excavados

Suelo	Fuste	Punta
Cohesivo	250 a 700 f_u	60 a 160 $q_b R$
Granular	450 a 1200 f_u	30 a 70 $q_b R$

Estos valores se han obtenido a partir de ensayos de carga normalizándolos en función de las capacidades últimas (Reese y O'Neill 1999).

El rango inicial puede considerarse de comportamiento lineal.



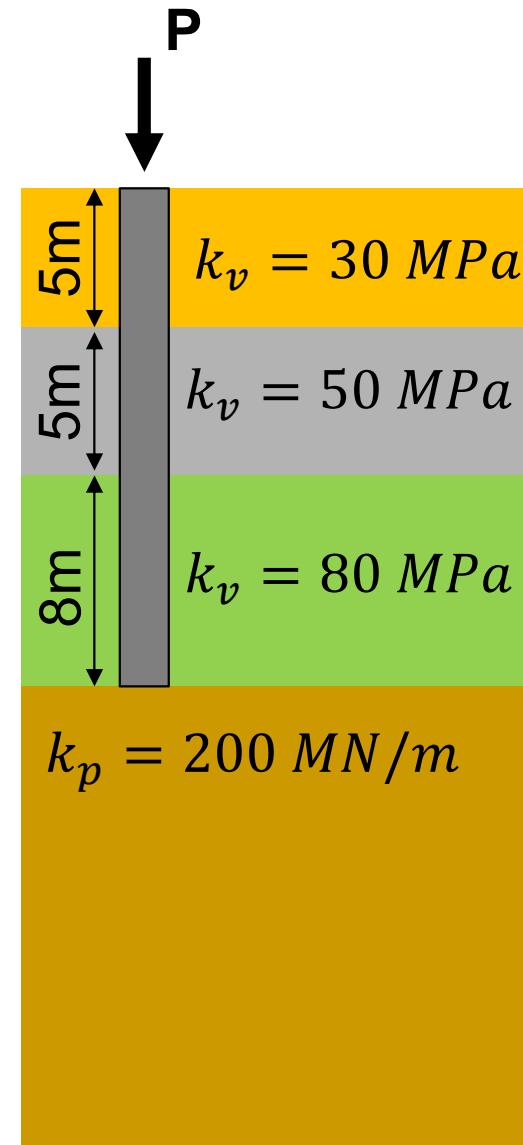
Reese y O'Neill (1999)

Ejercicio (Opcional)

Para el pilote indicado en la figura, en suelos estratificados y sometido a comportamiento axil, se pide:

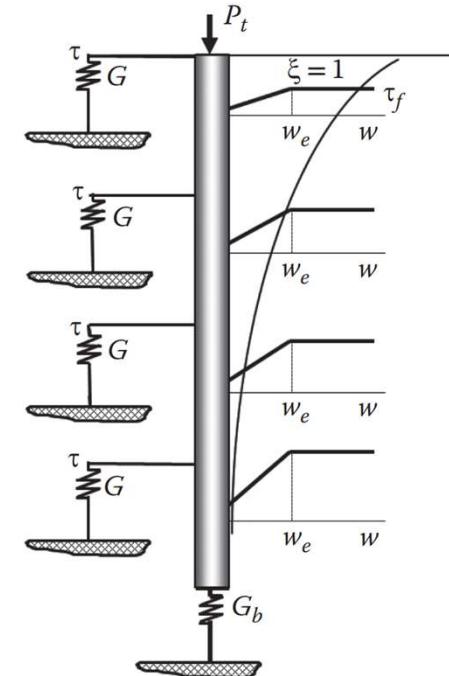
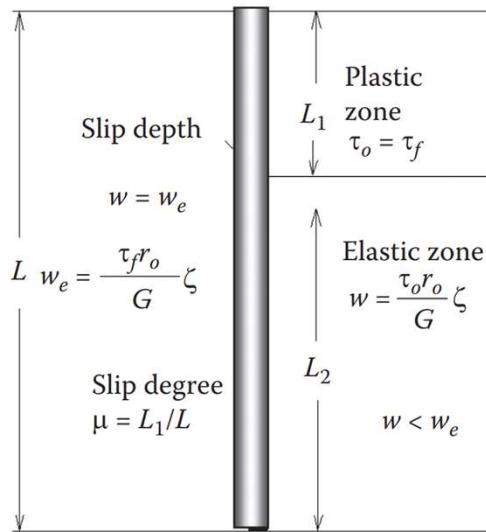
1. Determinar la deformación de la cabeza y la punta para una carga de 250 ton.
2. Obtener la distribución de carga en profundidad.

Nota: Caso particular con ficha igual a cero. No apropiado para el diseño.



Comportamiento elasto-plástico perfecto

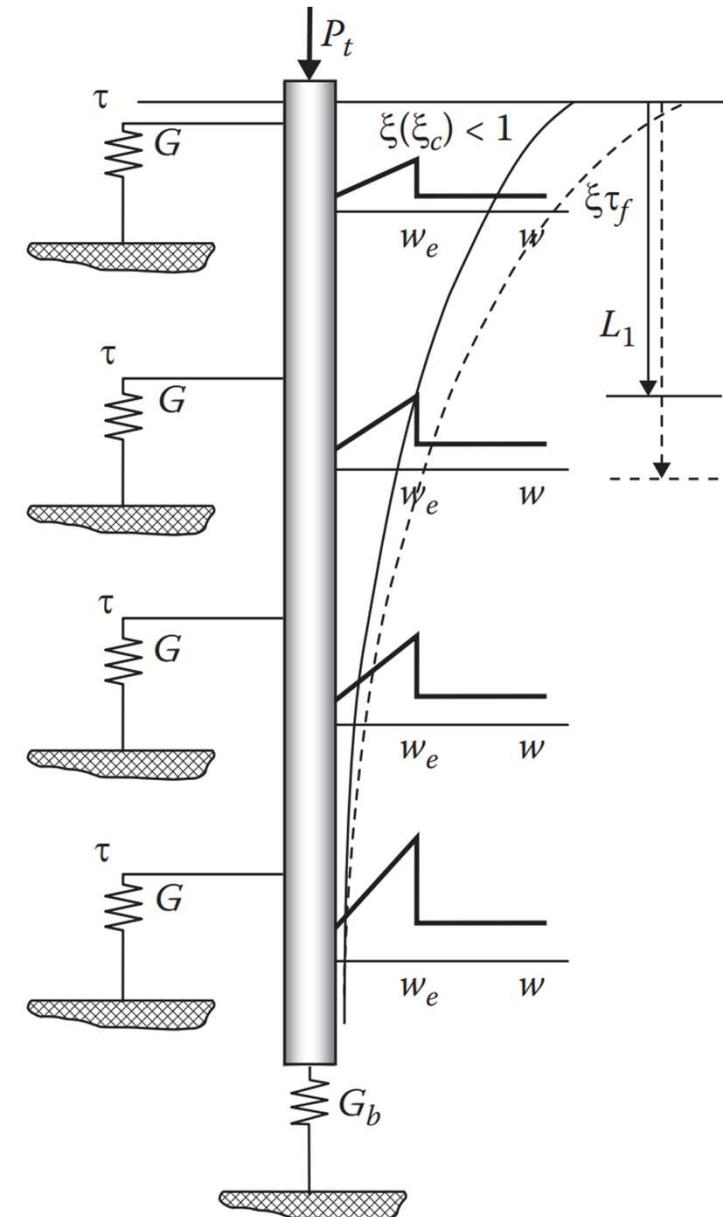
- $G = A_g (\alpha_g + z)^n$
- $\tau_f = A_v (\alpha_v + z)^\theta$



(a)

(b)

Guo (2013)



Guo (2013)

Contenido

- Definición y tipos de fundación profunda
- Métodos de instalación de pilotes
- Diseño para estados límites últimos
- **Diseño para estados límites de servicio**
 - Estimación de asentamientos – Métodos analíticos
 - Problemas de interacción axil lineal
 - **Problemas de interacción axil no lineal**
- Aspectos de diseño

Comportamiento axial no lineal de pilotes

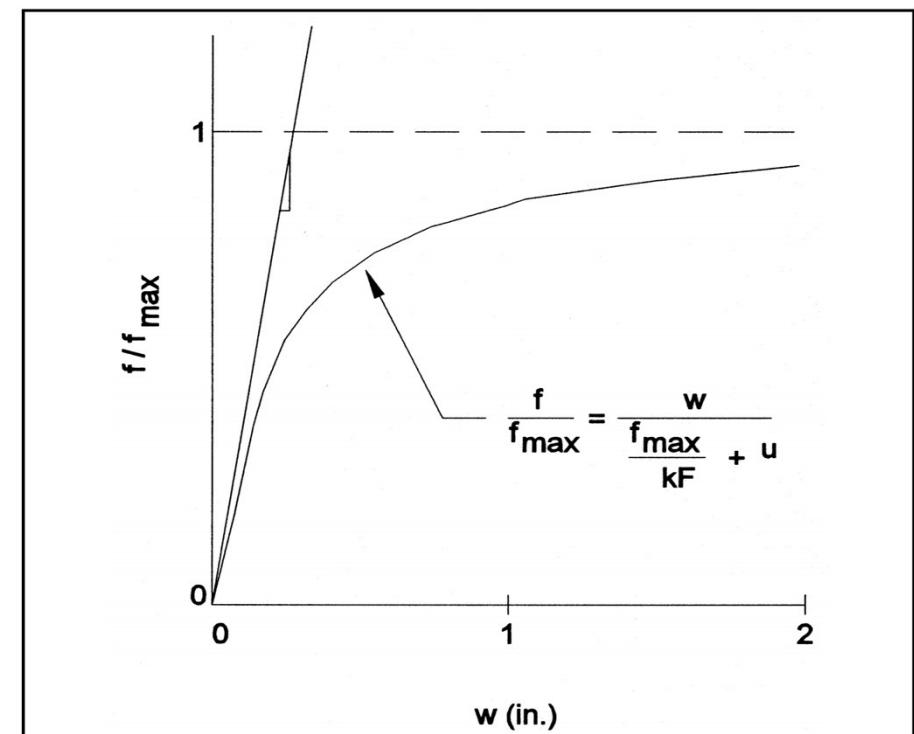
Métodos de análisis

- Interaccion continuo – estructura no lineal:
 - Modelos elastoplásticos
 - Cada vez mas utilizados en la practica
 - Herramientas: Plaxis, Flac, Abaqus
- Columnas sobre resortes no lineales
 - Curvas $p - \delta$ para fricción y punta
 - Modelo famoso: Modelo hiperbólico

Curvas $p - \delta$

Existen numerosas expresiones para determinar curvas $p - \delta$ tanto para fricción como para la punta.

- **Fricción en arenas:**
 - Mosher 1984

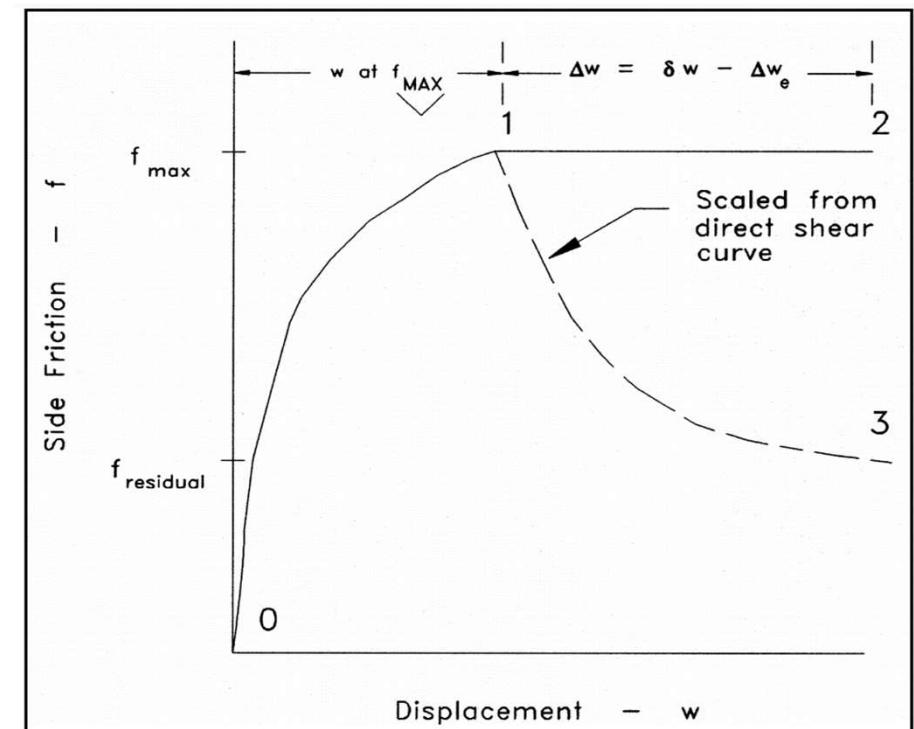


Curvas $p - \delta$

Existen numerosas expresiones para determinar curvas $p - \delta$ tanto para fricción como para la punta.

- **Fricción en arenas:**

- Mosher (1984)
- Kraft, Ray, Kagawa (1981)

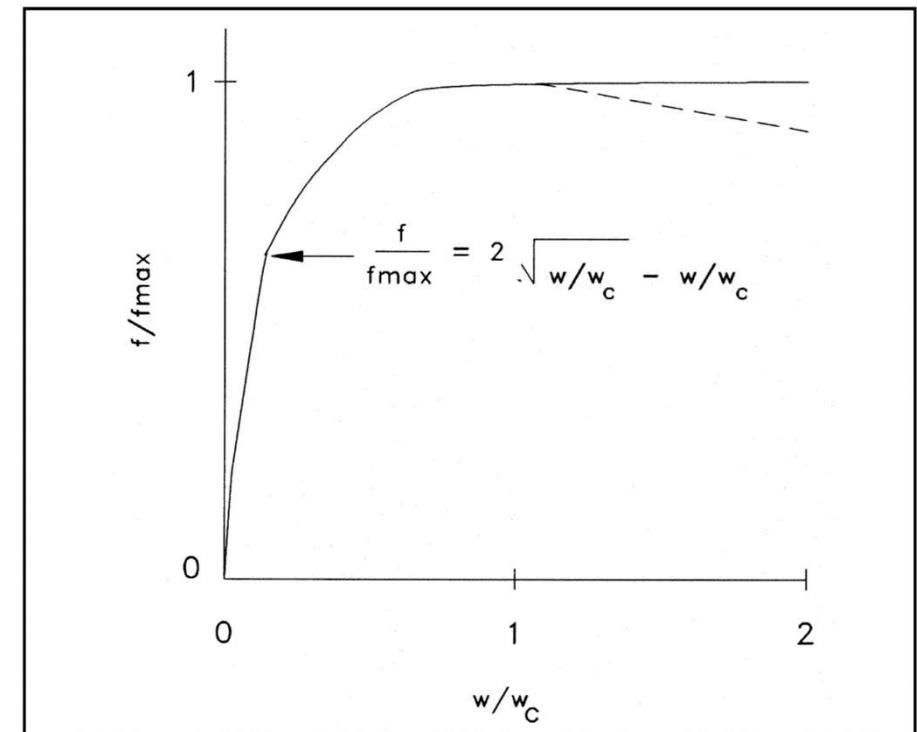


Curvas $p - \delta$

Existen numerosas expresiones para determinar curvas $p - \delta$ tanto para fricción como para la punta.

- **Fricción en arenas:**

- Mosher (1984)
- Kraft, Ray, Kagawa (1981)
- Vijayvergiya (1977)

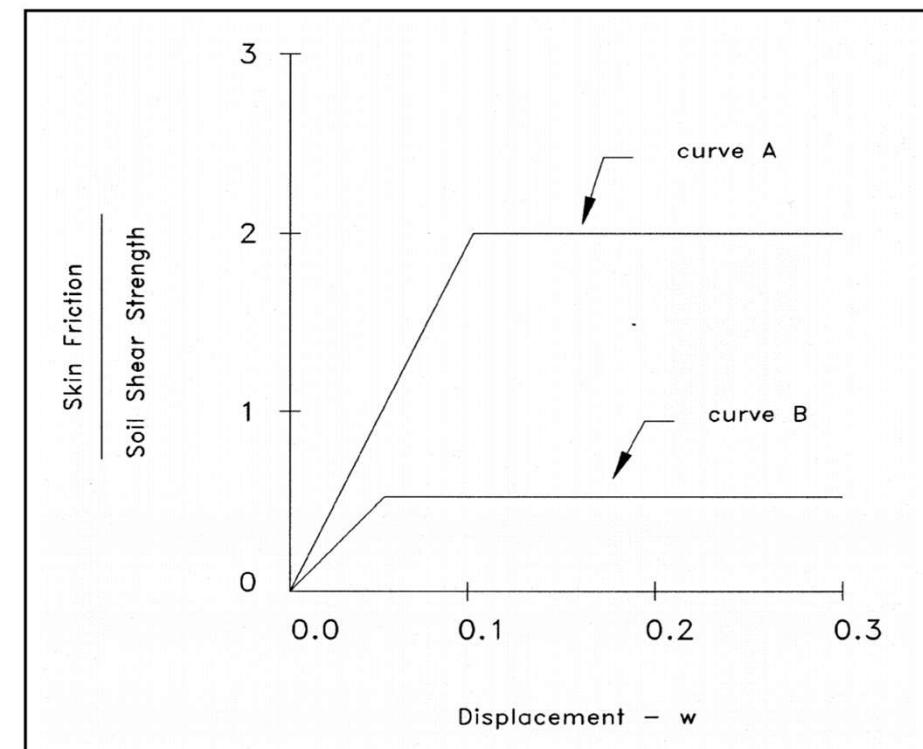


Curvas $p - \delta$

Existen numerosas expresiones para determinar curvas $p - \delta$ tanto para fricción como para la punta.

- **Fricción en arenas:**

- Mosher (1984)
- Kraft, Ray, Kagawa (1981)
- Vijayvergiya (1977)
- Coyle and Sulaiman (1967)

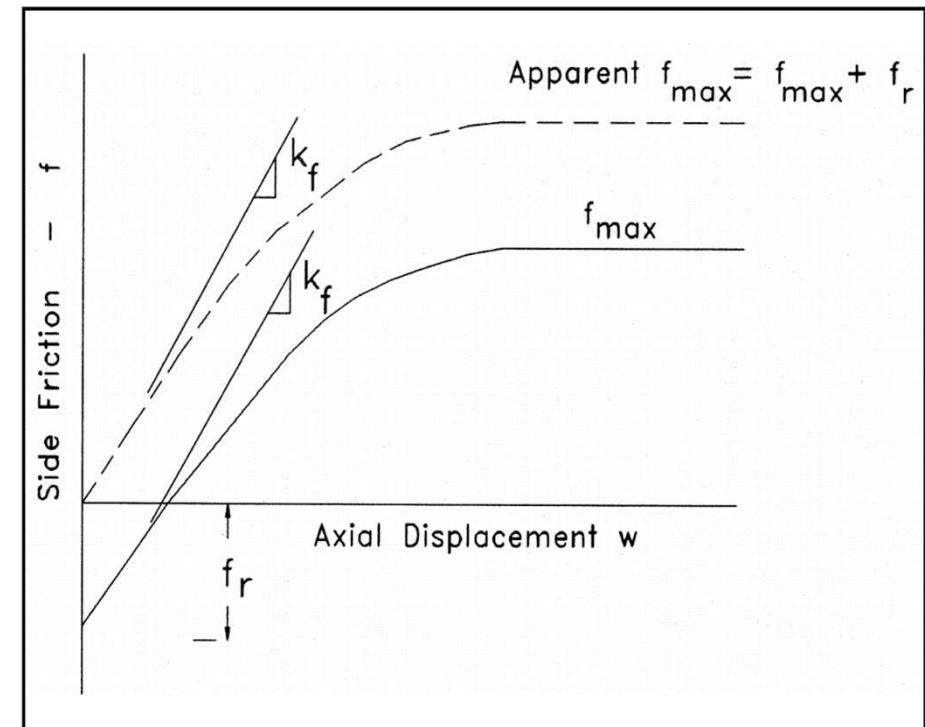


Curvas $p - \delta$

Existen numerosas expresiones para determinar curvas $p - \delta$ tanto para fricción como para la punta.

- **Fricción en arcillas:**

- Coyle and Reese (1966)

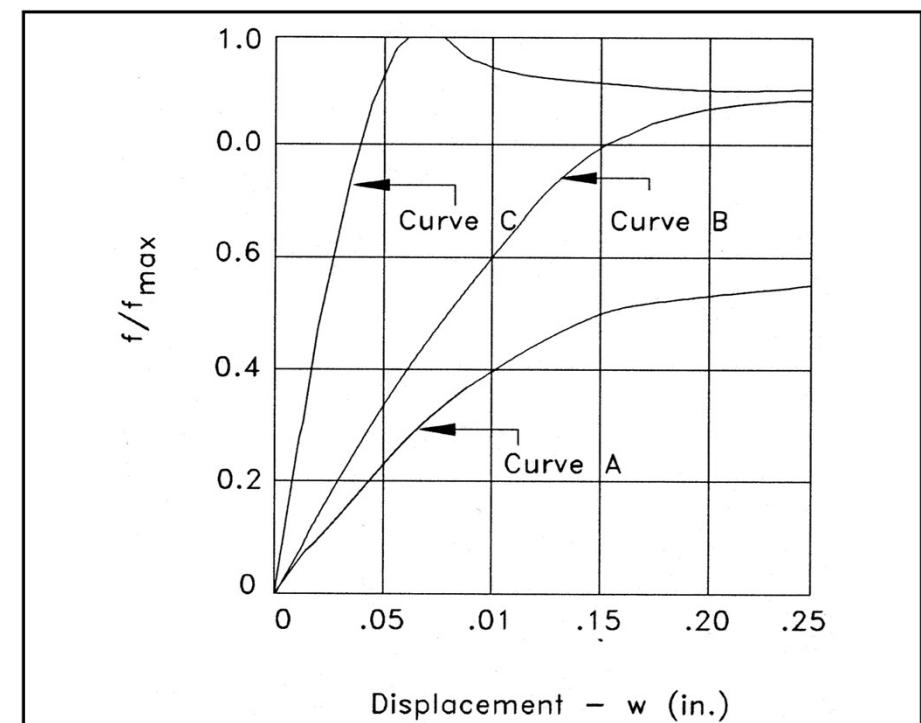


Curvas $p - \delta$

Existen numerosas expresiones para determinar curvas $p - \delta$ tanto para fricción como para la punta.

- **Fricción en arcillas:**

- Coyle and Reese (1966)
- Aschenbrener and Olson (1984)

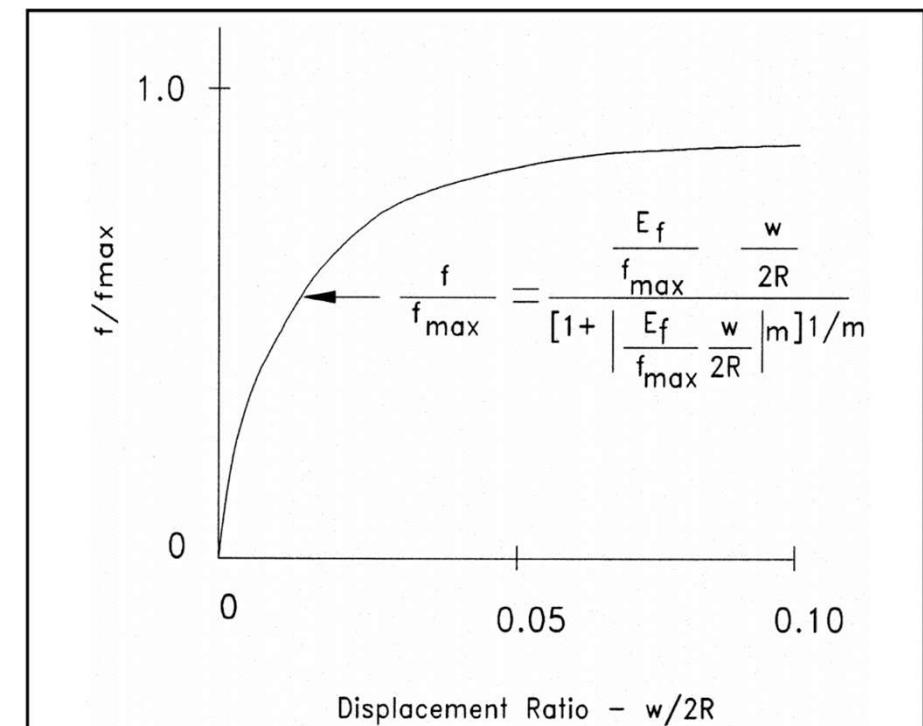


Curvas $p - \delta$

Existen numerosas expresiones para determinar curvas $p - \delta$ tanto para fricción como para la punta.

- **Fricción en arcillas:**

- Coyle and Reese (1966)
- Aschenbrener and Olson (1984)
- Vijayvergiya (1977)



Curvas $p - \delta$

Existen numerosas expresiones para determinar curvas $p - \delta$ tanto para fricción como para la punta.

- **Punta en arena:**

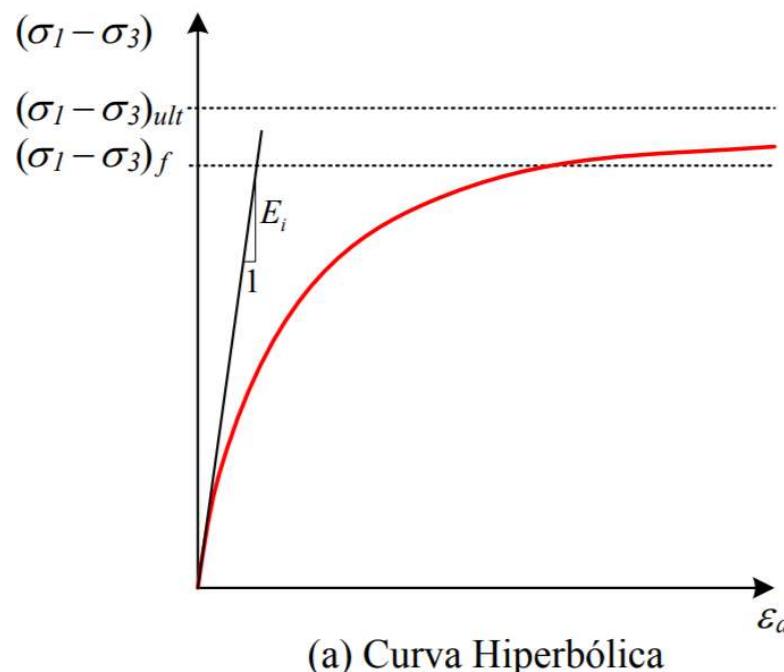
- Mosher (1984)
- Kraft, Ray, and Kagawa (1981)
- Vijayvergiya (1977)
- Briaud and Tucker (1984)
- Coyle and Castello (1981)

- **Punta en arcillas:**

- Aschenbrener and Olson (1984)
- Vijayvergiya (1977)

Modelo hiperbólico de Duncan & Chang

El modelo se basa en que la curva tensión - deformación de una muestra de suelo sometida a un **ensayo triaxial bajo una tensión de confinamiento σ_3 constante** puede ser aproximada a una hipérbola.

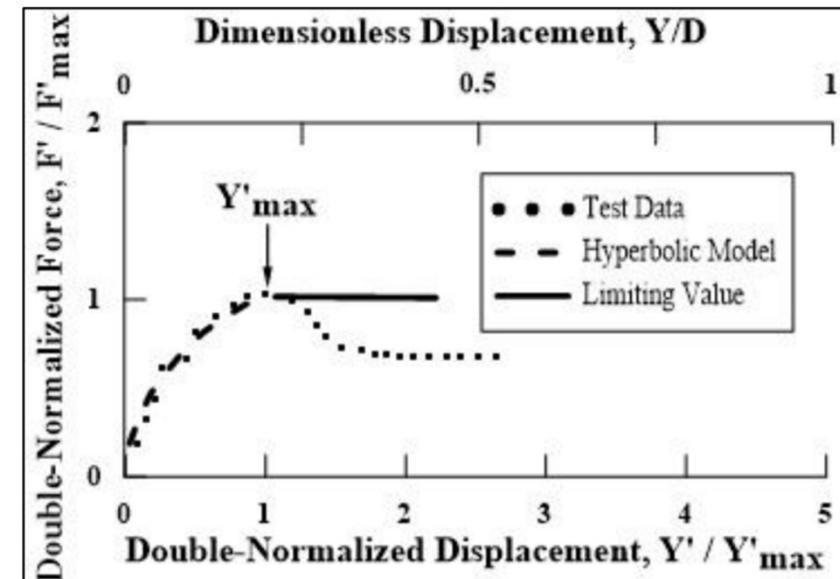


$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\epsilon_a}{\frac{1}{E_i} + \frac{\epsilon_a}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}}$$

Modelo hiperbólico de Duncan & Chang

Debido a que $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ es un parámetro teórico que define la hipérbola, la curva siempre se mantiene por debajo de este límite y, por lo general, la tensión desviadora de falla $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ también. La relación entre ambas tensiones se denomina **razón de falla R_f** y se define como:

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$$



Modelo hiperbólico de Duncan & Chang

El modelo hiperbólico de Duncan y Chang considera que los suelos presentan **curvas tensión-deformación que varían en función del confinamiento**. Janbu 1963:

$$E_i = K p_{atm} \left(\frac{\sigma_3}{p_{atm}} \right)^n$$

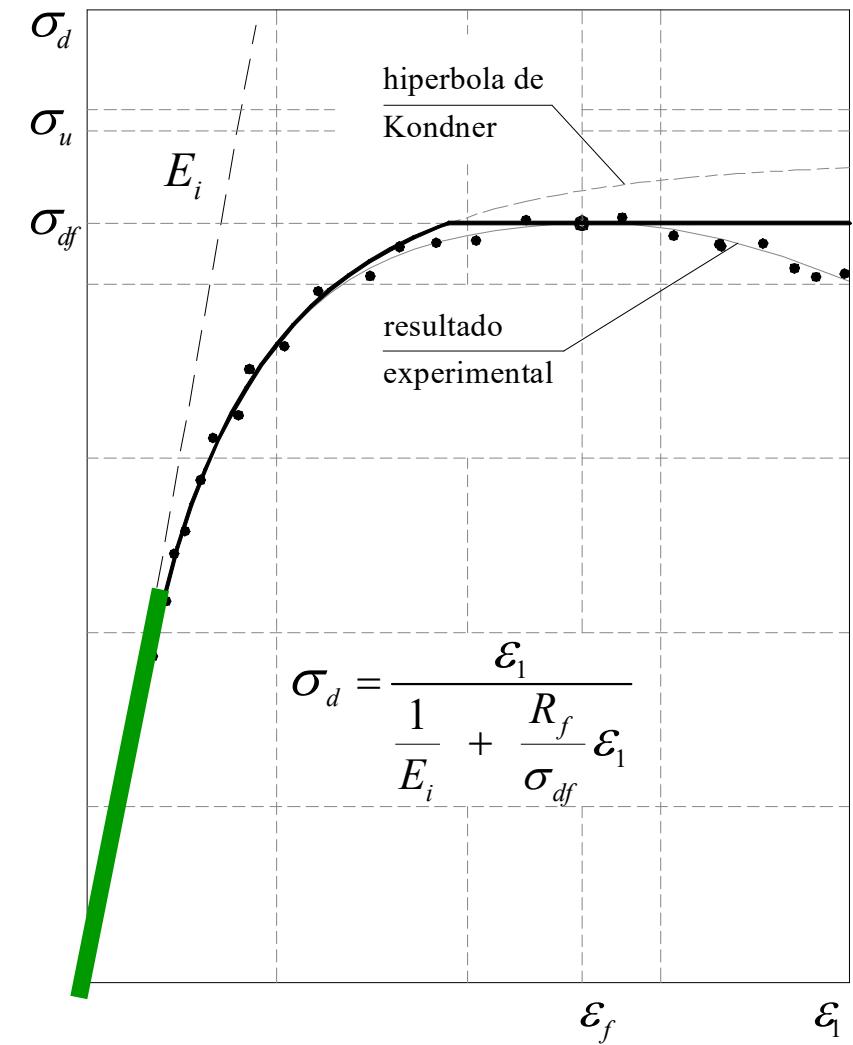
K y **n** son llamados el número y el exponente del módulo y son parámetros adimensionales que deben determinarse para cada tipo de suelo.

Comportamiento de pilotes excavados

Modelo constitutivo hiperbólico

Condiciones necesarias

- Las tensiones inducidas en el terreno son mucho menores a su resistencia (no hay plasticidad por corte)
- Los suelos están sobre-consolidados (no hay plasticidad por compresión)



Comportamiento de pilotes excavados

Modelo constitutivo hiperbólico

Si τ_0 es la tensión de corte actuante en el fuste de un pilote de radio medio R , la tensión de corte τ para un radio $r > R$ y la distorsión γ son:

$$\begin{aligned}\tau &= \tau_0 \frac{R}{r} \\ \gamma &= \tau/G_0\end{aligned}$$

El desplazamiento vertical se obtiene por integración de la distorsión γ en el eje radial. Queda

$$\delta = \int_R^{r_m} \frac{\tau_0 R}{G_0 r} dr = \frac{\tau_0 R}{G_0} \log \left[\frac{r_m}{R} \right]$$

Donde r_m es la distancia donde $\gamma = 0$ ($r_m = 2 L (1 - \nu)$).
 L es la longitud del pilote.

Comportamiento de pilotes excavados

Modelo constitutivo hiperbólico

Podemos definir la rigidez inicial del fuste como:

$$K_{Fi} = \frac{G_{0i}}{R \log(r_m/R)} L_i \text{ Perim.}$$

La relación entre la reacción del fuste y desplazamiento vertical (para cada estrato) se aproxima mediante (Modelo hiperbólico):

$$P_F[\delta] = \frac{\delta}{1/K_{Fi} + R_f \delta/f_i}$$

donde h_j es la altura de cada estrato y f_j es la fricción última del estrato.

Comportamiento de pilotes excavados

Modelo constitutivo hiperbólico

La rigidez inicial de la punta se calcula a partir de la solución de punzonado rígido elástico:

$$K_P = \frac{2 \pi G_0}{(1 - \nu)} R$$

La relación entre carga y desplazamiento se aproxima como:

$$P_P[\delta] = \frac{\delta}{1/K_p + R_f \delta/Q_{Pu}}$$

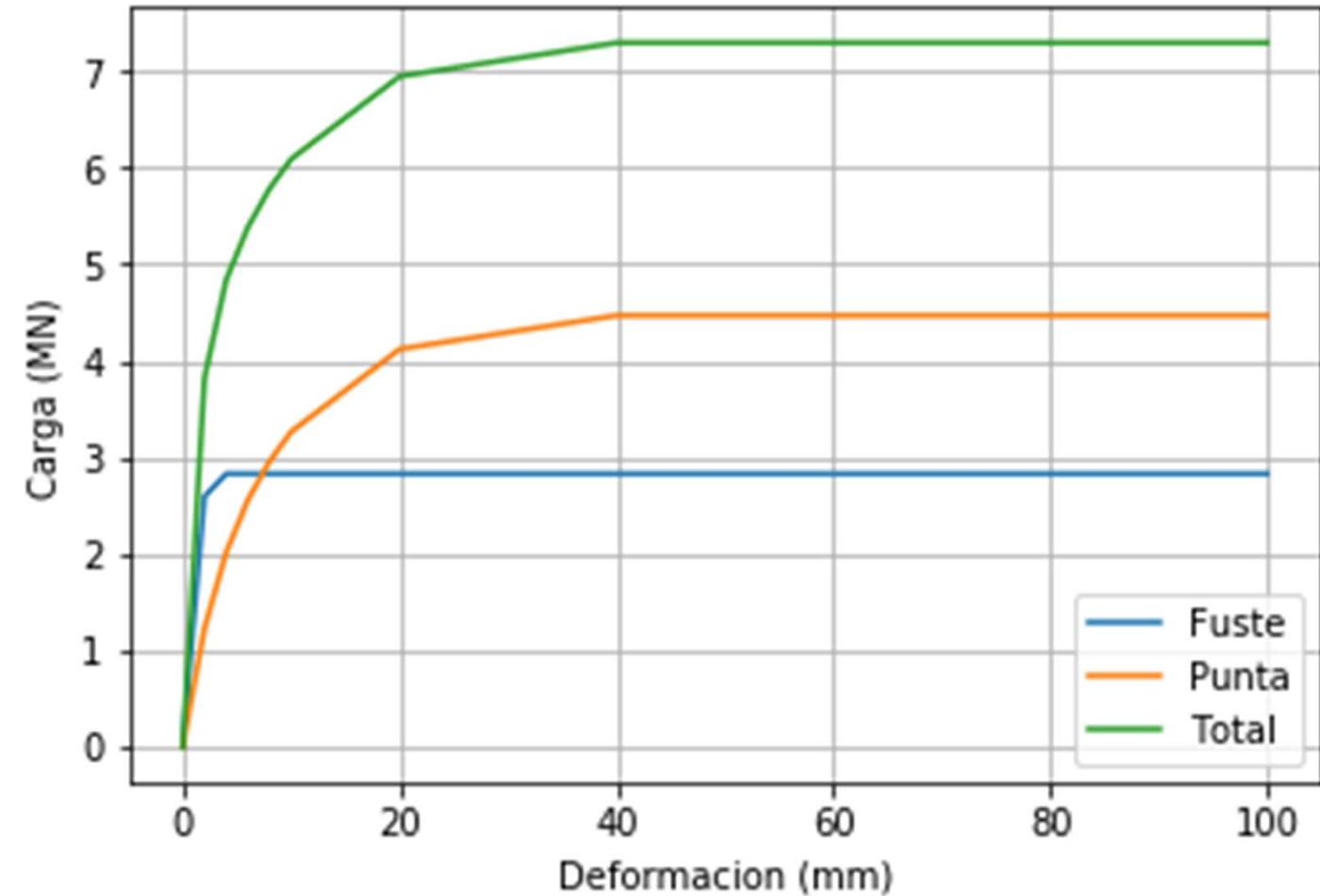
Finalmente,

$$P[\delta] = P_P[\delta] + P_F[\delta]$$

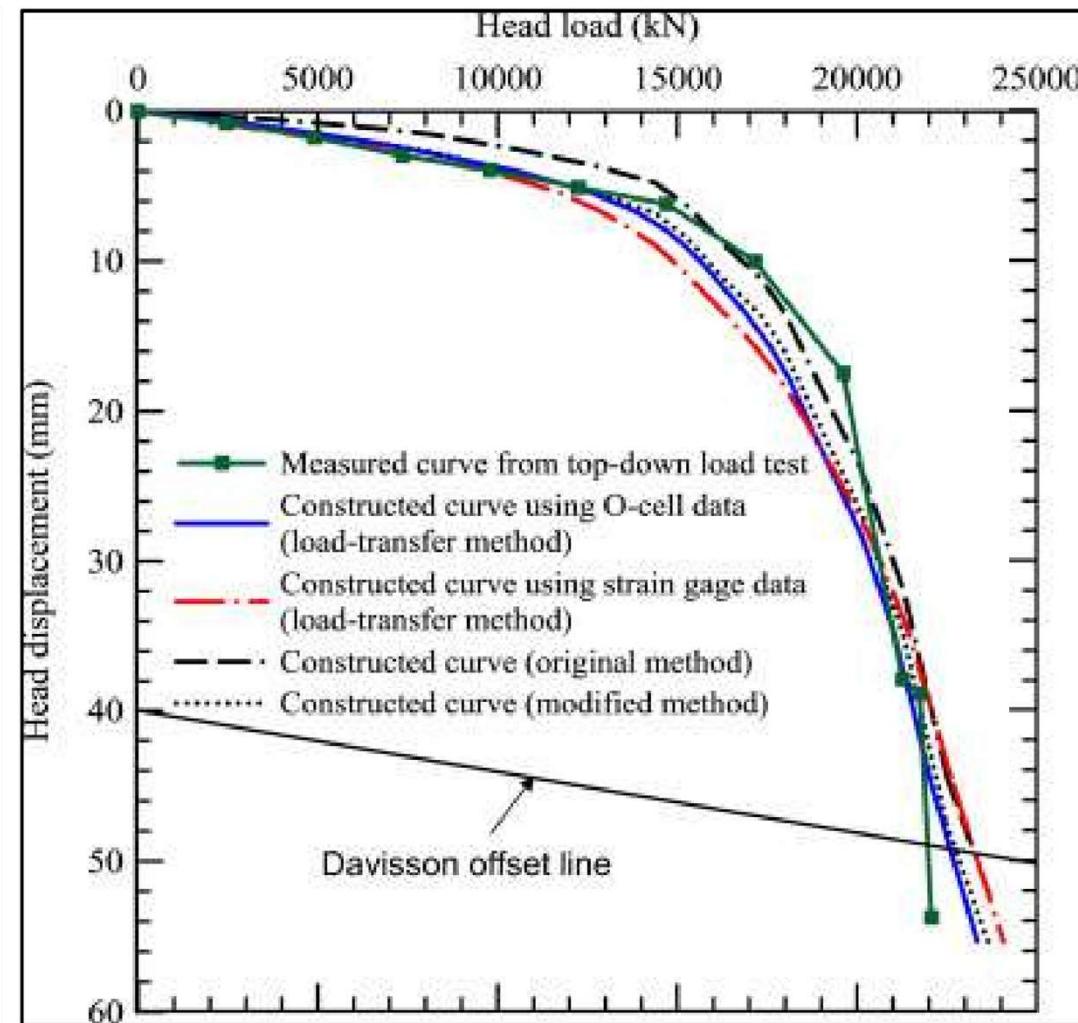
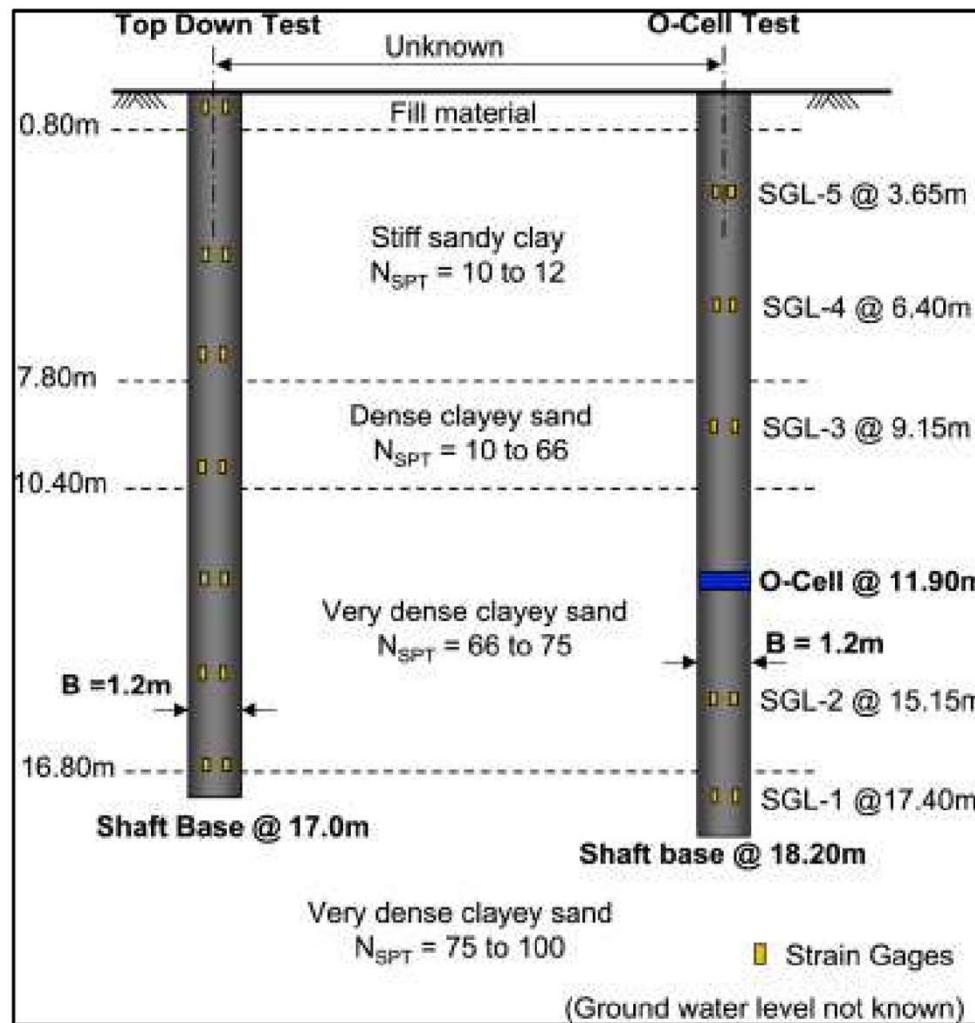
Comportamiento de pilotes excavados

Modelo constitutivo hiperbólico

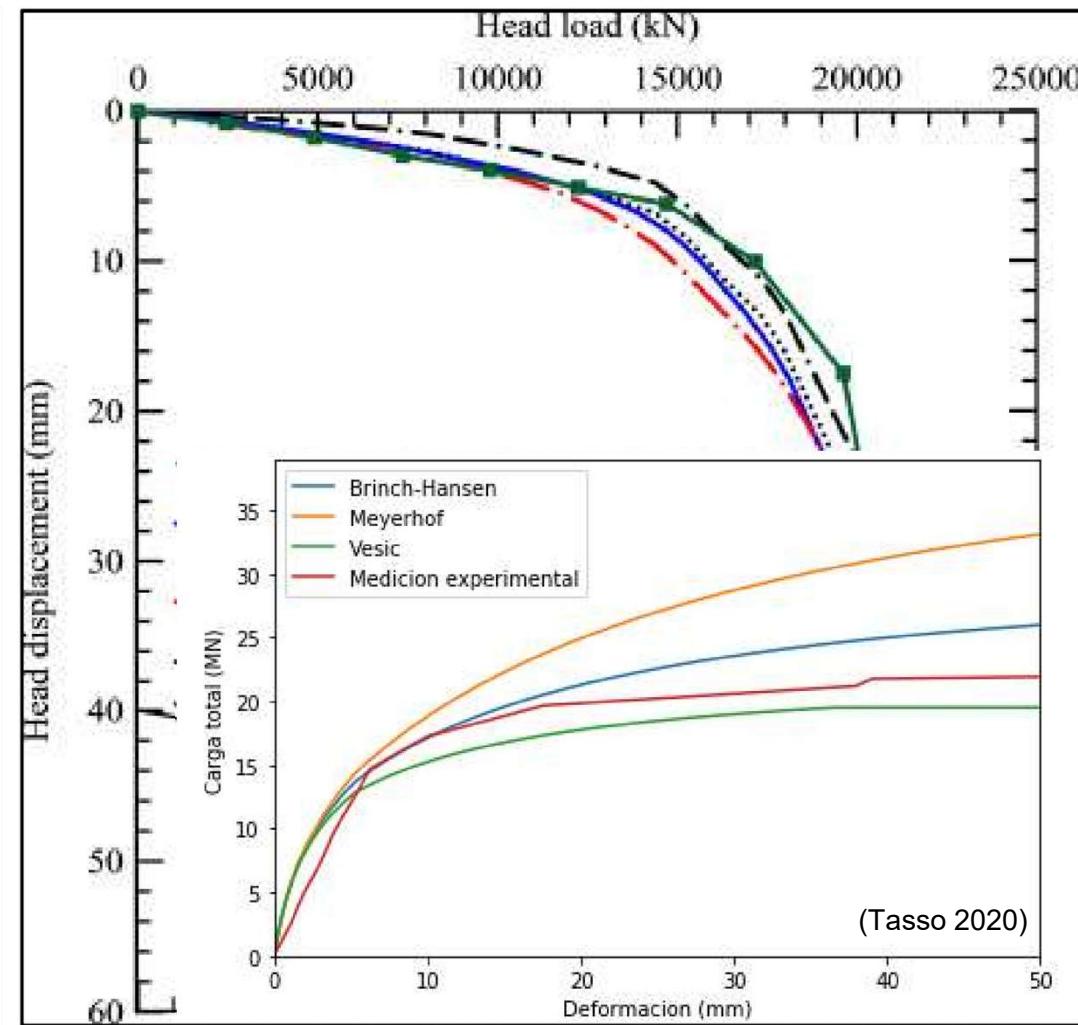
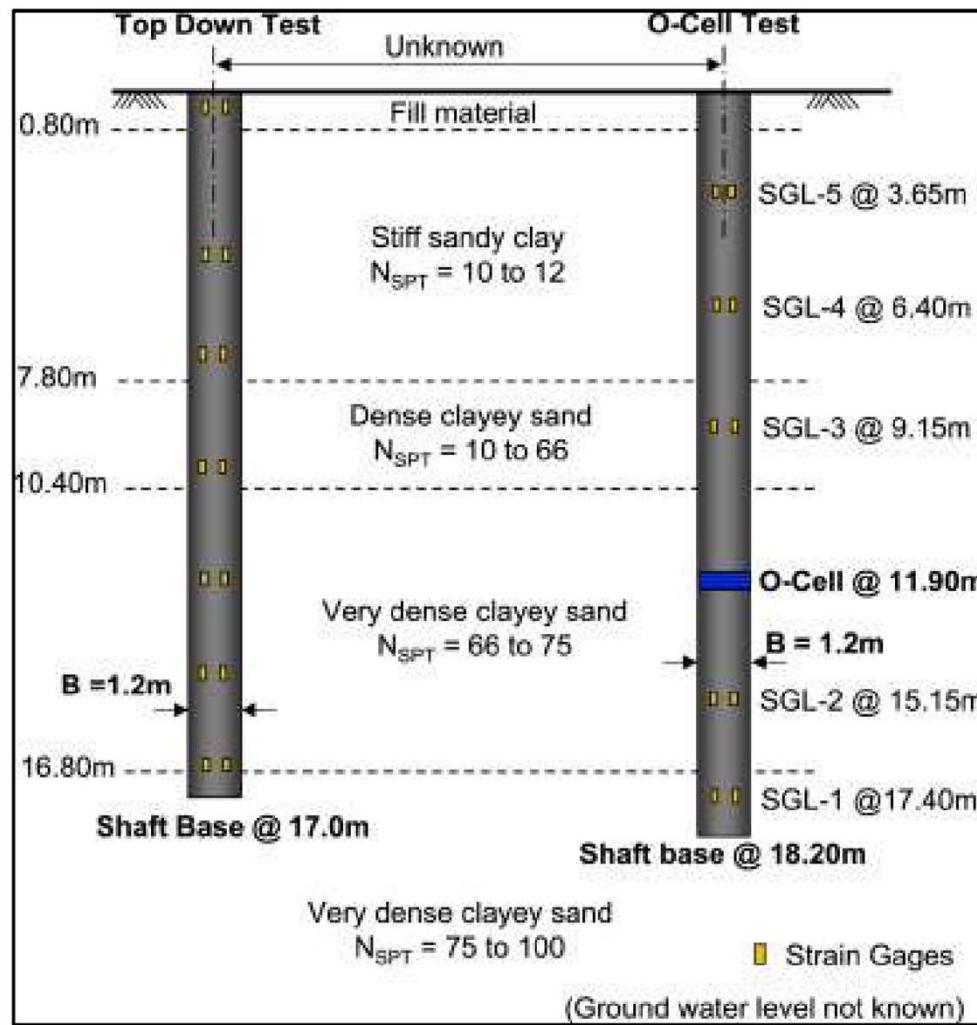
- $d = 1 \text{ m}$
- $L = 15 \text{ m}$
- $G_0 = 200 \text{ MPa}$
- $\nu = 0.2$
- $q_{pu} = 5.69 \text{ MPa}$
- $q_{fu} = 0.06 \text{ MPa}$
- $R_f = 0.80$



Ejemplo de aplicación (Hoyoung Seo, 2016)

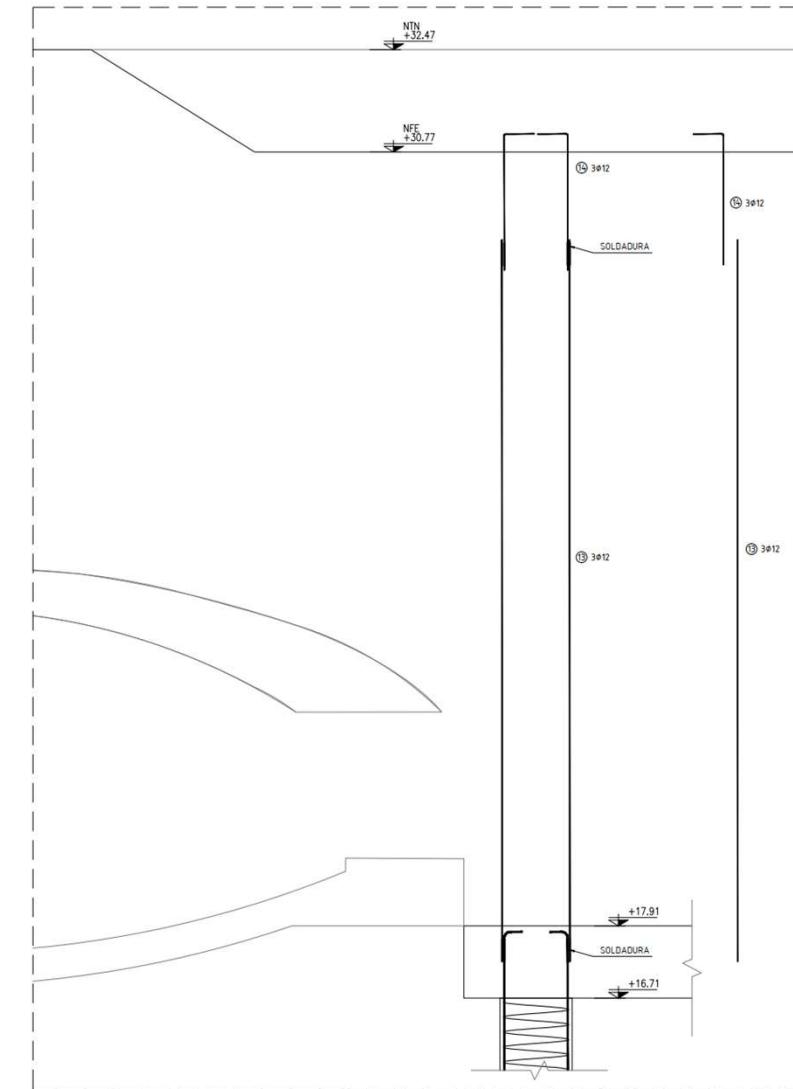


Ejemplo de aplicación (Hoyoung Seo, 2016)



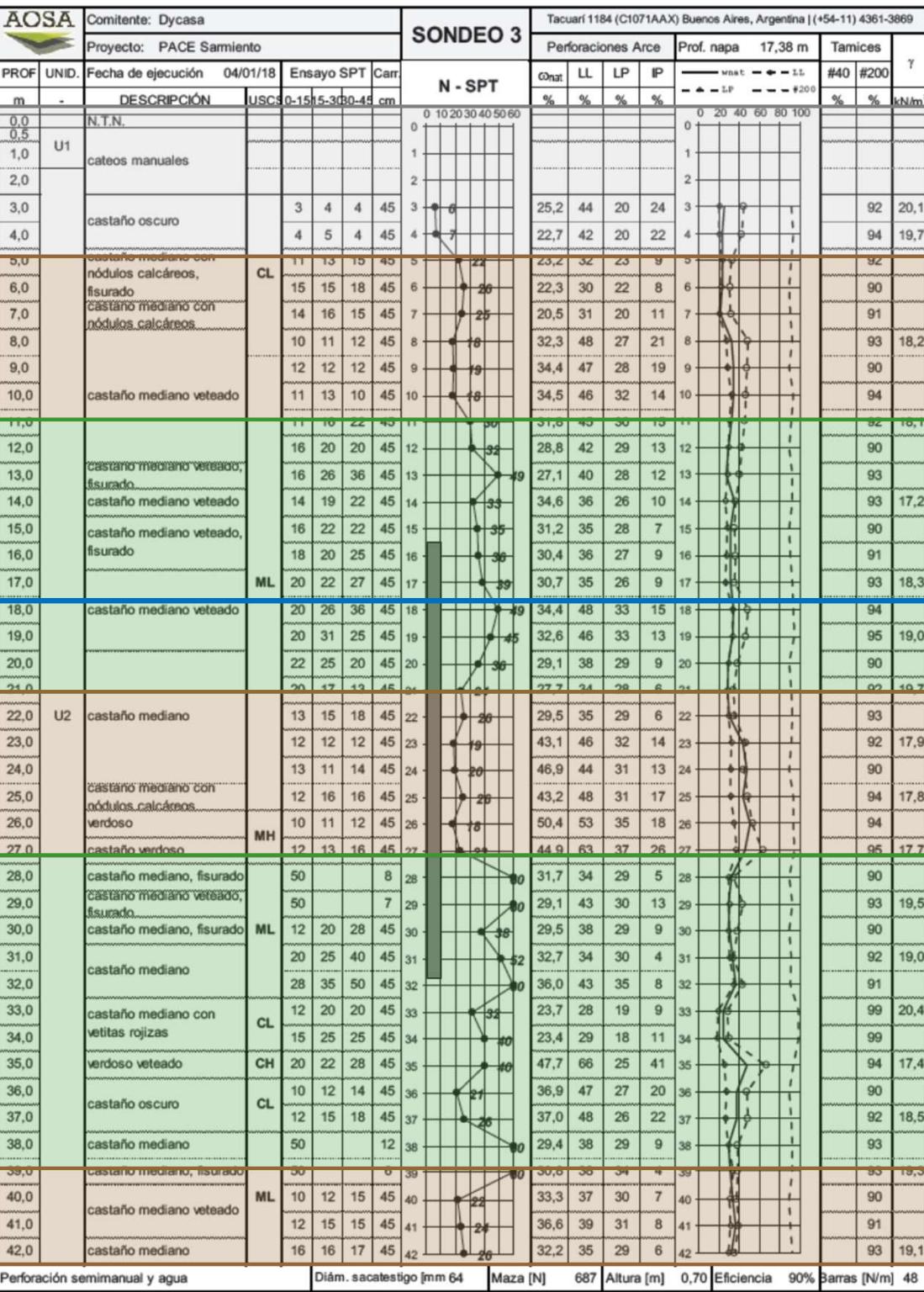
Ejemplo de pilote perforado en la Formación Pampeano

- Nivel de terreno: +32.50
- Cota superior del pilote: +16.70
- Longitud del pilote: 15.0 m
- Diámetro del pilote: 1.20 m



Formación Pampeano

- U1: ML, CL (N_{SPT} : 10-15)
- U2: ML, CL (N_{SPT} : 15-30)
- U3: ML, CL (N_{SPT} : 30-60)
- Prof. Napa: 17.5m



Correlación entre SPT y la rigidez del terreno. Existe?

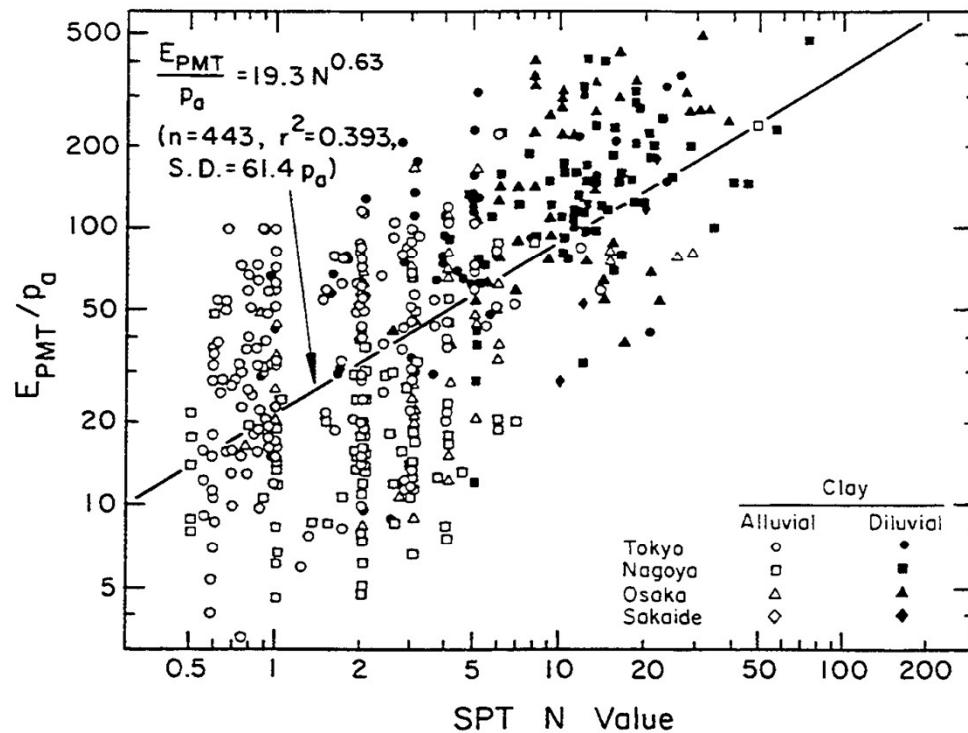


Figure 5-8. PMT Modulus of Clay versus N Value

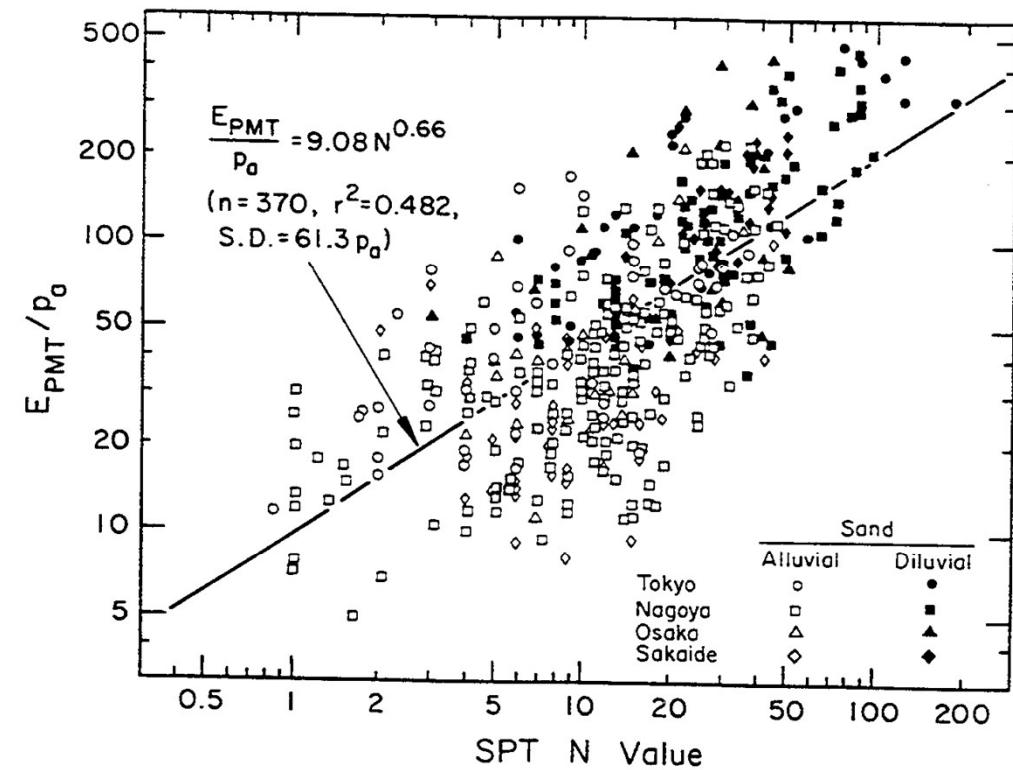


Figure 5-14. PMT Modulus of Sand versus N Value

(EPRI 1990)

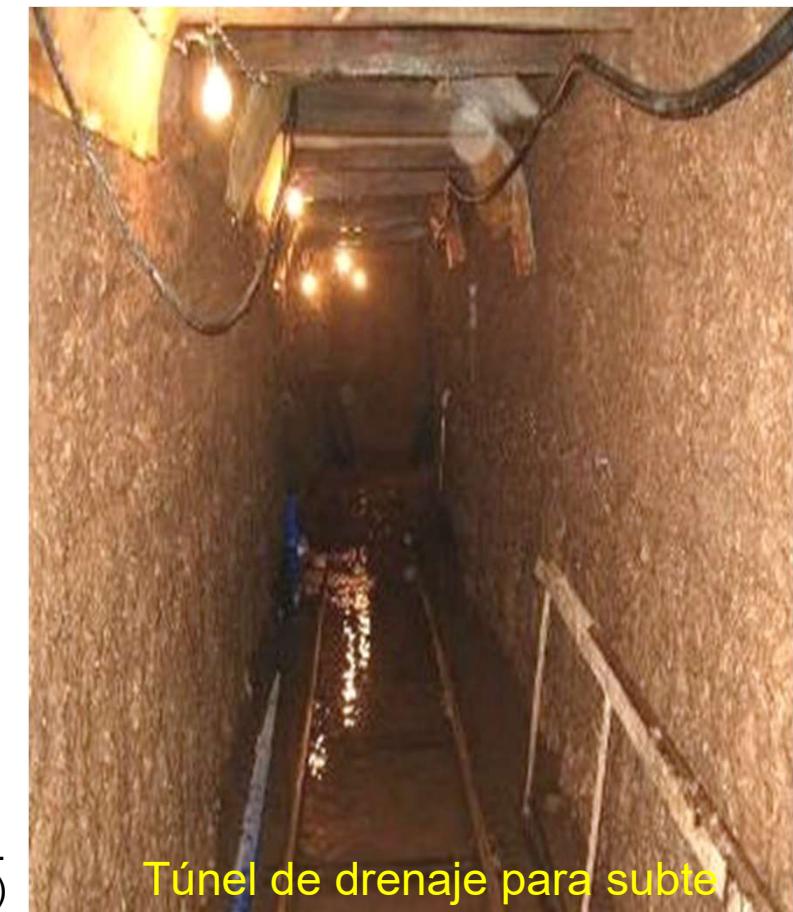
Fm. Pampeano. Parámetros medios

Parámetros usados para la modelización de túneles y obras subterráneas en Buenos Aires

Parameter	Unit	Upper	Middle	Lower
c_u	kPa	50-100	110-220	40-120
ϕ_u	°	10-20	0-10	0
c'	kPa	10-25	25-50	15-30
ϕ'	°	30-32	30-34	29-32
ψ	°	0-3	0-6	0-3
E_0	MPa	120-200	150-250	90-140
E_{50}	MPa	60-100	70-150	60-90
E_{ur}	MPa	150-250	180-300	140-220
m	-	0.0-0.4	0.0-0.4	0.0-0.4
v	-	0.20-0.30	0.20-0.30	0.20-0.30
R_f	-	0.80-0.90	0.80-0.90	0.80-0.90

(Codevilla & Sfriso 2011)

(Bolognesi&Moretto 1957, 1961. Núñez 1986, 1986b, 2007.
Sfriso 2006, 2008a, 2008b. Codevilla&Sfriso 2010)



Túnel de drenaje para subte

Ejercicio

1. Estimar los parámetros de resistencia y rigidez del terreno.

$$\gamma = 19 \pm 1 \text{ kN/m}^3, G_i = 105 \pm 30 \text{ MPa}, \phi'_{max} = 36 \pm 3^\circ$$

$$c' = 35 \pm 5 \text{ kPa}, R_f = 0.80$$

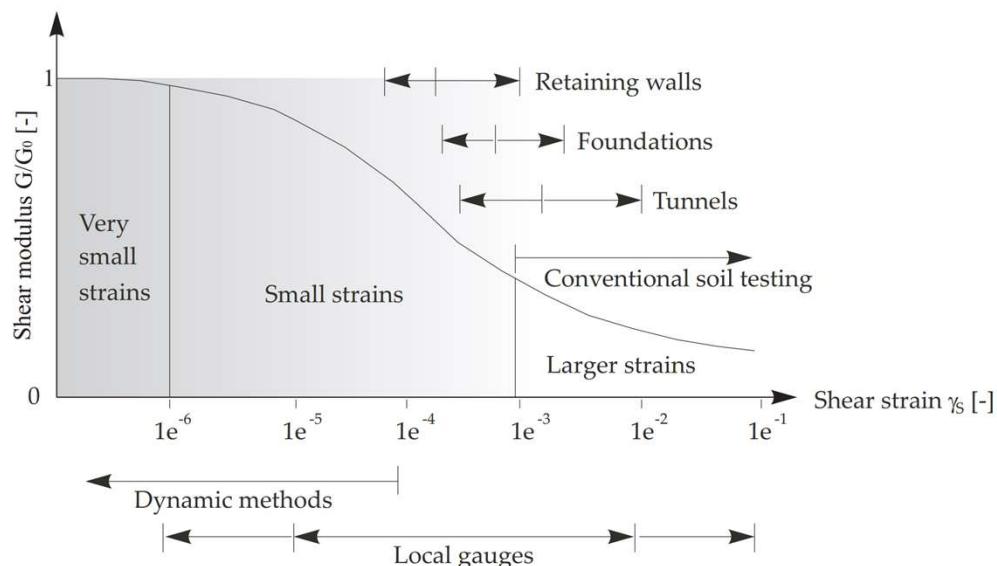


Figure 7.1 Characteristic stiffness-strain behaviour of soil with typical strain ranges for laboratory tests and structures (after Atkinson & Sallfors (1991))

$$G_0 = G_0^{ref} \left(\frac{c \cos \phi + p \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)$$

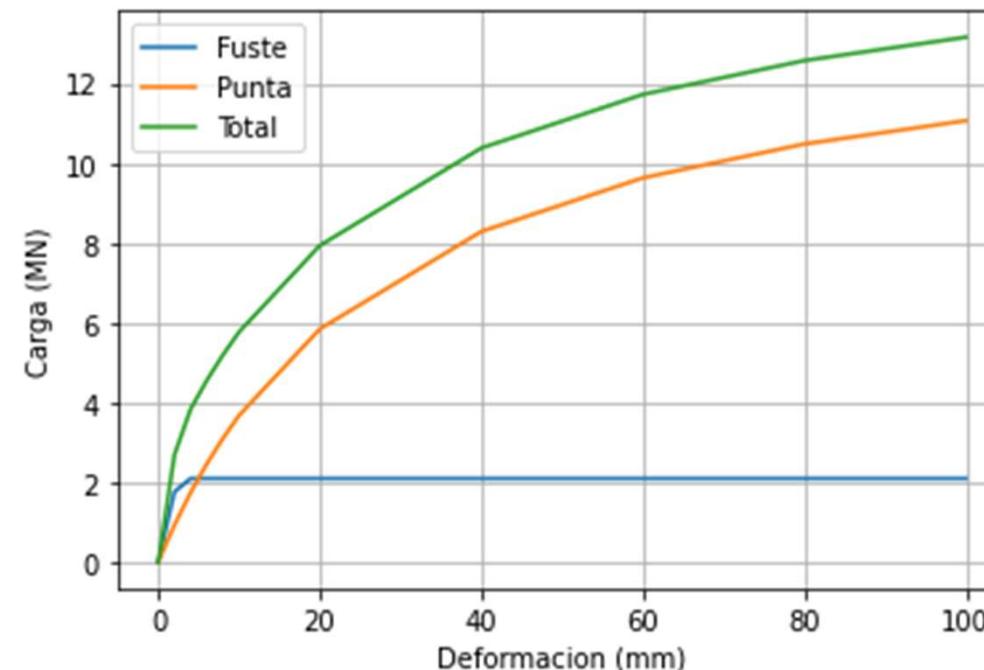
$$G_S = G_0 \left[\frac{1}{1 + 0.385 (\gamma_s / \gamma_{07})} \right]$$

$$E_S = 2 G_S (1 + \nu)$$

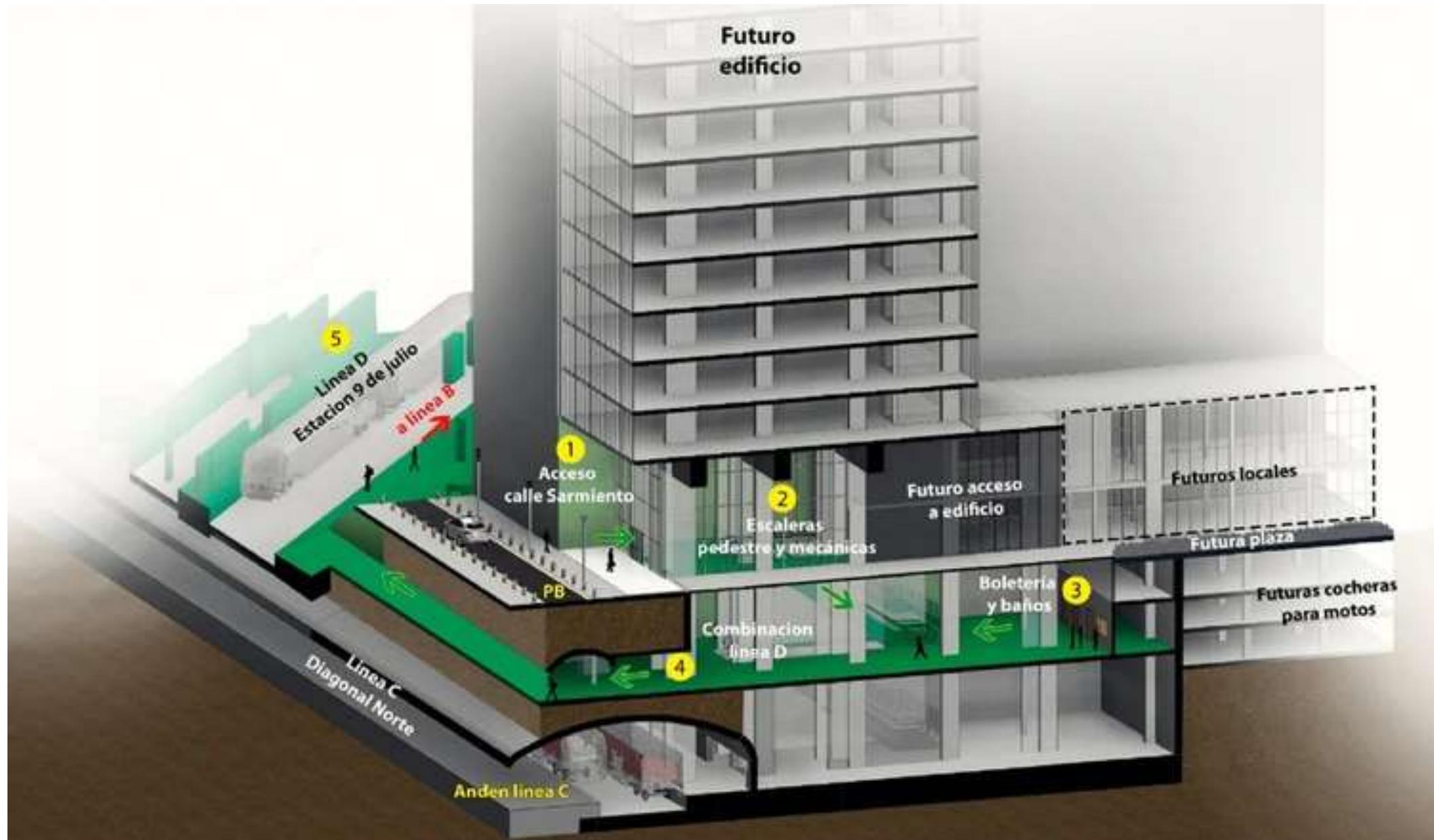
$$E_0 \approx 3 E_{ur}$$

Ejercicio

1. Estimar los parámetros de resistencia y rigidez del terreno.
2. Determinación de la capacidad de carga. Valores medios.
 $q_{u.p} \approx 10.08 \text{ MPa}$, $q_{u.f} = 0.037 \text{ MPa}$
3. Determinación de la curva $p - \delta$.

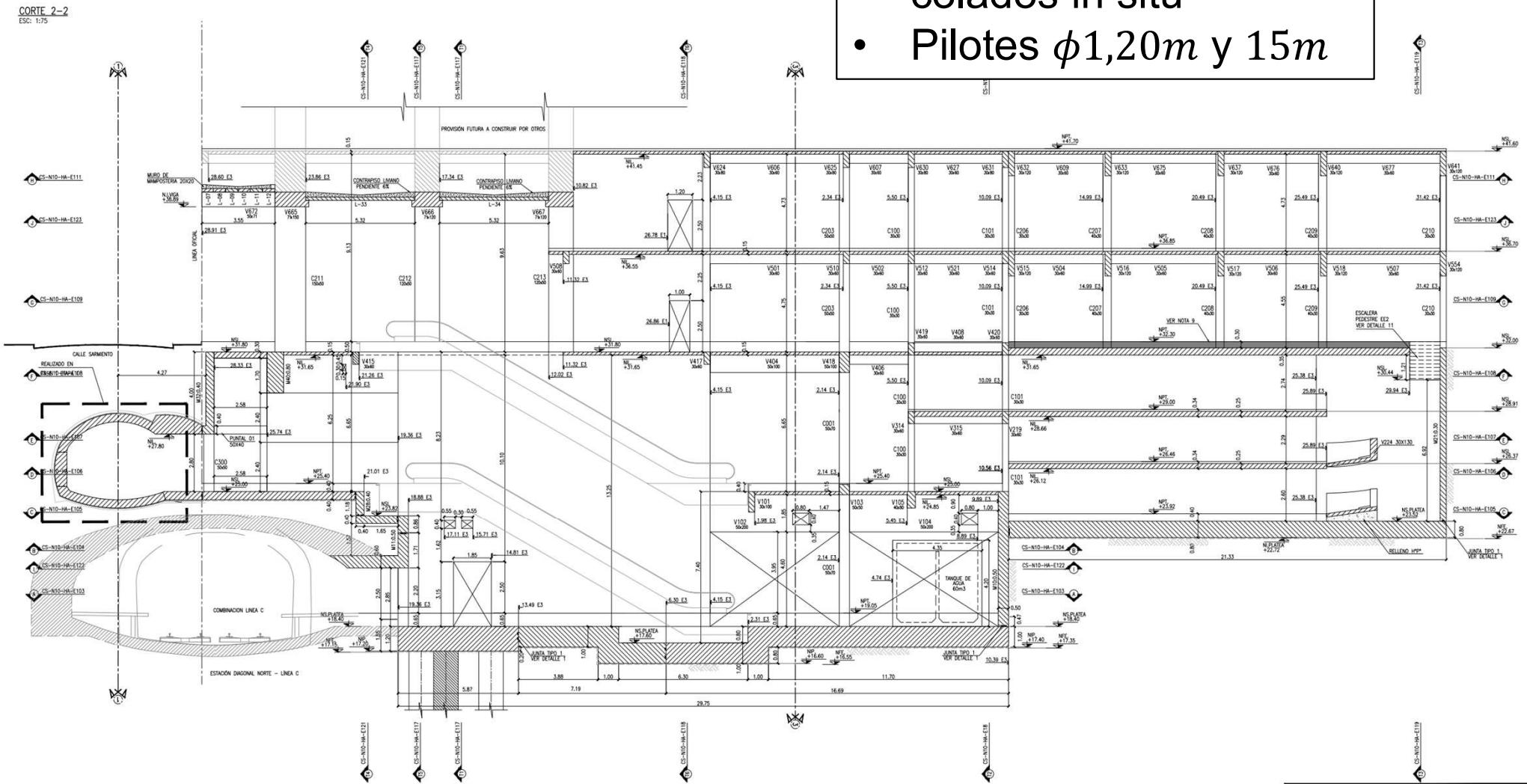


Proyecto Nodo Obelisco



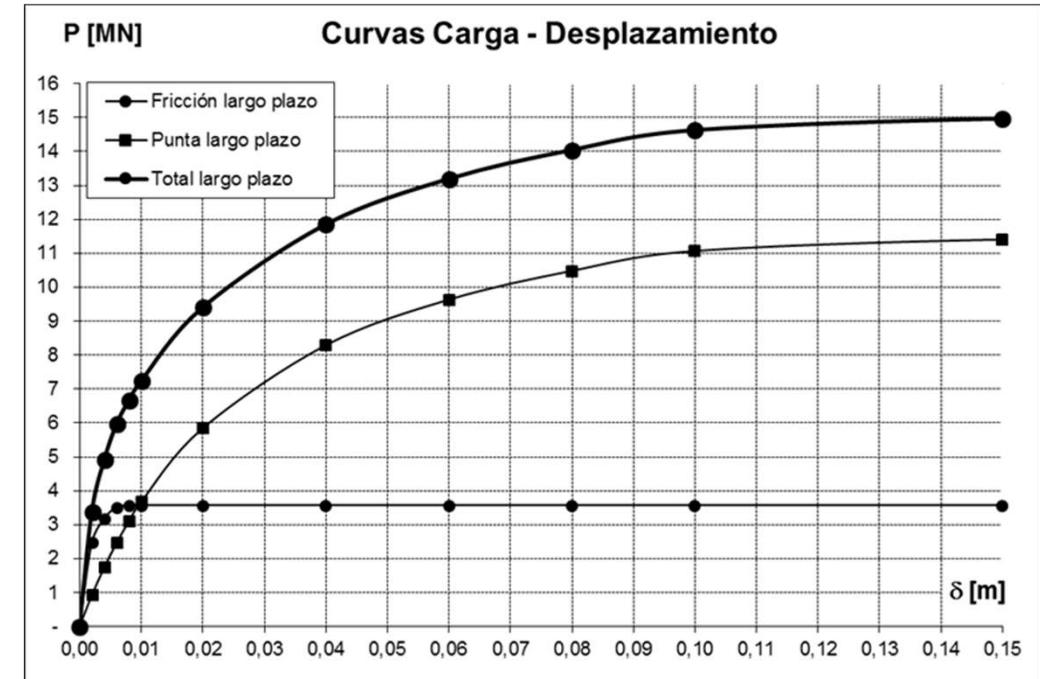
Sistema de fundación Platea + pilotes

- Platea de 1m
 - Pilotes perforados colados in situ
 - Pilotes $\phi 1,20m$ y $15m$

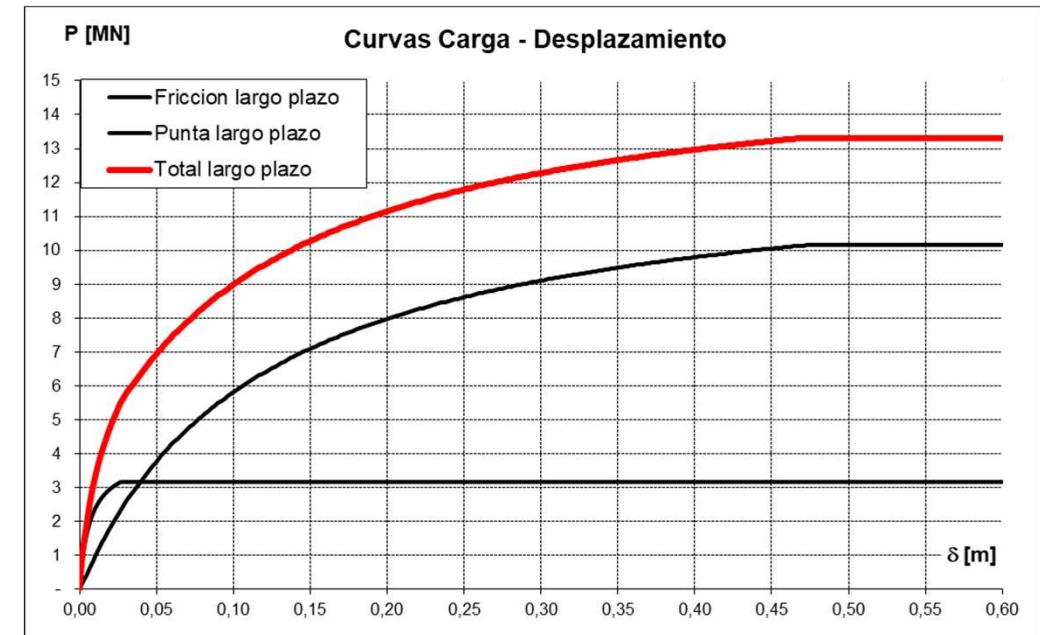


Pilotes (Modelo hiperbólico)

1. Comportamiento individual
2. Comportamiento considerando efecto grupo (Capacidad de carga)
3. Comportamiento considerando efecto grupo (Capacidad de carga y rigidez)



Pilote individual

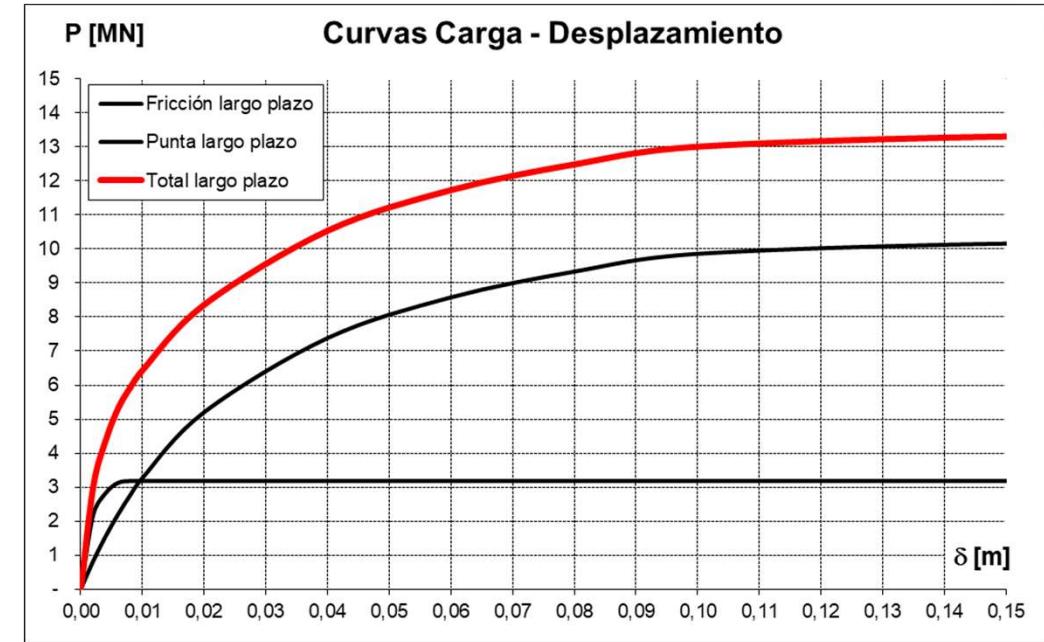


Efecto grupo (Cap. Carga)

Efecto grupo (Cap. Carga + rigidez)

Pilotes (Modelo hiperbólico)

1. Comportamiento individual
2. Comportamiento considerando efecto grupo (Capacidad de carga)
3. Comportamiento considerando efecto grupo (Capacidad de carga y rigidez)



Pilote

Curvas Carga - Desplazamiento

Efecto grupo (Capacidad de carga y rigidez)

SAP2000 v20.2.0 Ultimate 64-bit - Modelo resortes

3-D View

Link/Support Property Data

Link/Support Type: MultiLinear Elastic
Property Name: Pilote
Property Notes:
Total Mass and Weight:
Mass: 0.
Weight: 0.
Rotational Inertia 1: 0.
Rotational Inertia 2: 0.
Rotational Inertia 3: 0.
Factors For Line, Area and Solid Springs:
Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.
Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.
Directional Properties:
Direction: U1
Fixed:
NonLinear:
Properties: Modify/Show for U1...
U2:
U3:
R1:
R2:
R3:
P-Delta Parameters: Advanced...
OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Edit

Identification:
Property Name: Pilote
Direction: U1
Type: MultiLinear Elastic
NonLinear: Yes
Properties Used For Linear Analysis Cases:
Effective Stiffness: 0.
Effective Damping: 0.
Multi-Linear Force-Deformation Definition:

Displ	Force
1	-0,816
2	-0,8139
3	-0,8119
4	-0,8098

Order Rows Delete Row Add Row 403 OK Cancel

3-D View

GLOBAL KN, m, C

The SAP2000 interface shows a 3D view of a building foundation. The foundation consists of a central vertical column supported by multiple horizontal piles, all represented by red wireframe models. The surrounding soil is also depicted in red.

Modelo estructural Resultados

Pilotes con modelo hiperbólico y platea apoyada sobre medio elástico:

- Pilotes con carga entre 3100 y 3900 kN.
- Platea con descensor máximos de 18mm

→ 3993,8

→ 3472,94

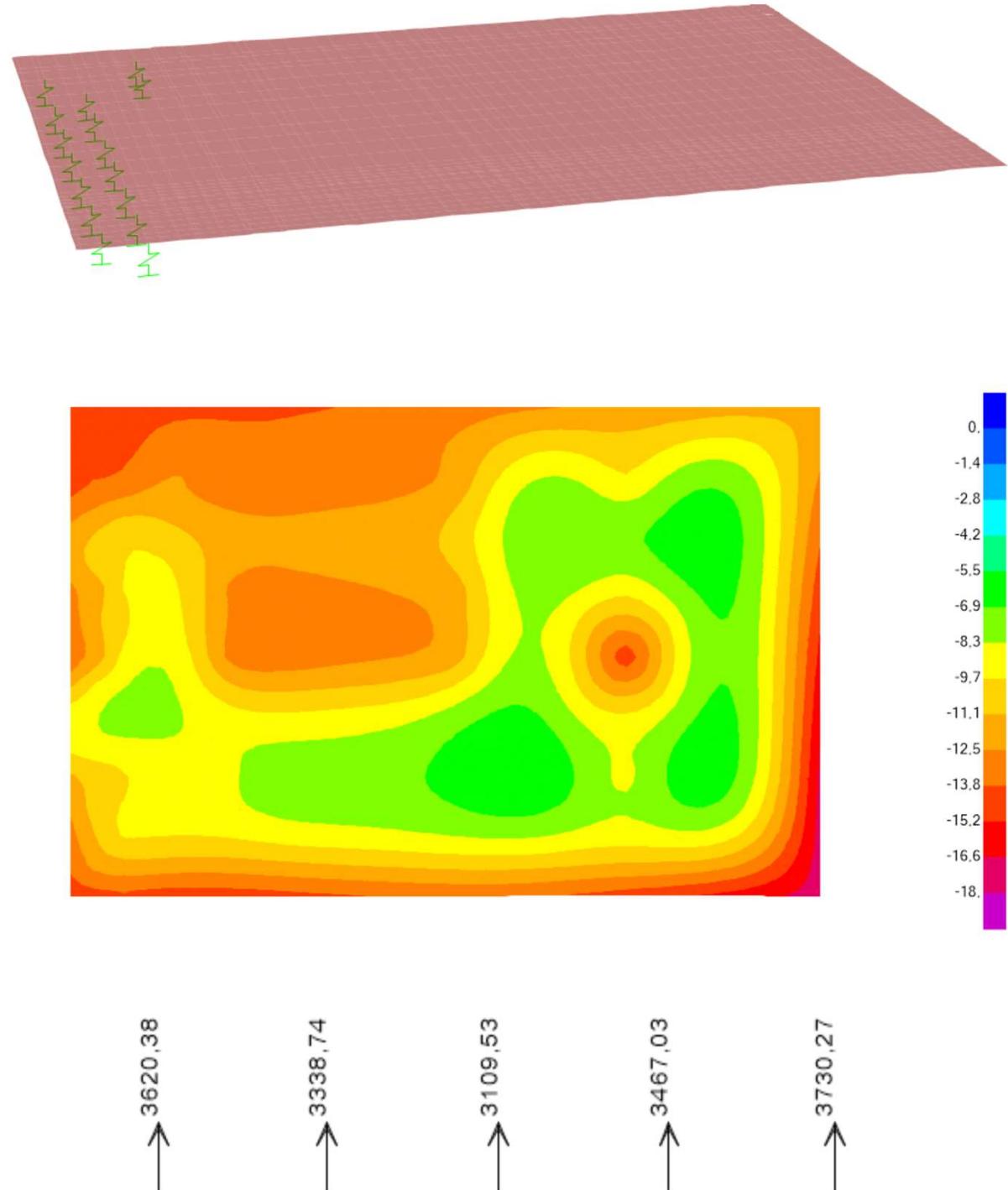
→ 3620,38

→ 3338,74

→ 3109,53

→ 3467,03

→ 3730,27



Modelo estructural Resultados

Pilotes con apoyos fijos
y platea apoyada sobre
medio elástico:

- Pilotes con carga entre 400.000 y 1.000.000 kN.
- Platea con descensor máximos de 18mm

