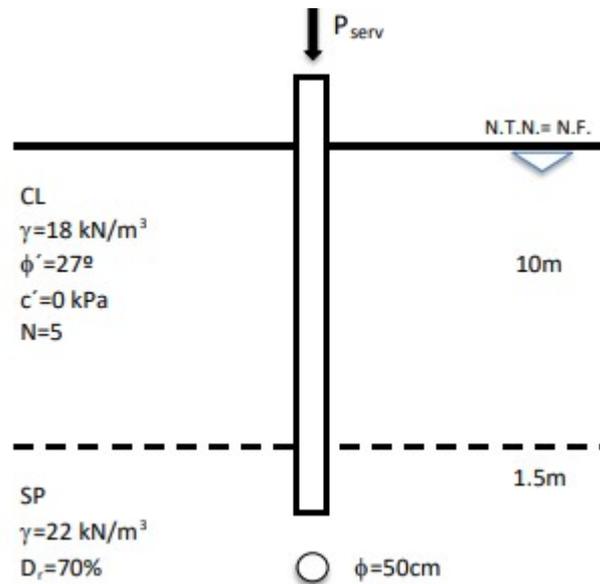


# MECÁNICA DE SUELOS Y GEOLOGIA

## EJERCICIO 5.12 (Levemente cambiado)

Para un pilote circular de hormigón armado fabricado in situ en el perfil geotécnico que se indica en la figura, se pide calcular:

1. Cargas última a corto y largo plazo.
2. Cargas de servicio a corto plazo y largo plazo, en condición extraordinaria.
3. Cargas de servicio considerando que el pilote trabaja a tracción.
4. Cargas de servicio considerando que el pilote es prefabricado.



### Definición de parámetros

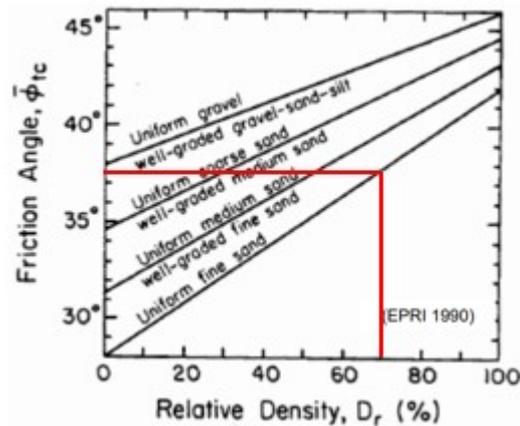
$\gamma_1 := 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Peso unitario saturado del estrato 1
$\phi_1 := 27 \text{deg}$	Ángulo de fricción interna efectivo del estrato 1
$c_1 := 0 \text{kPa}$	Cohesión efectiva del estrato 1
$N_{SPT} := 5$	Número de golpes SPT del estrato 1
$h_1 := 10 \text{m}$	Espesor del estrato 1
$\gamma_2 := 22 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Peso unitario saturado del estrato 2
$D_{r2} := 70\%$	Densidad relativa del estrato 2
$\phi_p := 50 \text{cm}$	Diámetro del pilote
$\gamma_w := 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Peso unitario del agua
$h_2 := 1.5 \text{m}$	Profundidad del pilote enterrado en el estrato 2

## Consideraciones adicionales

Como se requiere calcular la capacidad de carga a corto plazo, se necesitará la resistencia al corte no drenado del estrato 1. Esta resistencia se puede estimar a partir del  $N_{spt}$ , considerando que corresponde al  $(N1)60$ .

$$s_{u1} := 7 \cdot N_{SPT} \cdot \text{kPa} = 35 \cdot \text{kPa} \quad \text{Resistencia al corte no drenado del estrato 1}$$

El ángulo de fricción interna pico del estrato 2 puede estimarse a partir de la densidad relativa utilizando la siguiente correlación (EPRI - Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design - Figure 4-7)



$$\phi_2 := 37 \text{deg} \quad \text{Ángulo de fricción interna pico del estrato 2}$$

## 1. Cargas últimas a corto y largo plazo

La capacidad de carga última se calcula como la suma entre la capacidad por punta y la capacidad por fricción.

$$Q_{ult} = Q_{punta} + Q_{friccion}$$

La capacidad de carga última por punta se puede calcular a partir de la fórmula de terzaghi. El término asociado al  $N_y$  suele despreciarse, ya que suele ser menor al 10% (Guo - Theory and Practice of Pile Foundations)

$$Q_{punta} = A_p \cdot (c \cdot N_c \cdot d_c + \eta \cdot q \cdot N_q \cdot d_q)$$

Se recomienda tomar la capacidad de punta como la mínima entre la asociada a dos mecanismos:

- Mecanismo Rígido-plástico - Fórmula de Brinch-Hansen.
- Mecanismo de expansión de cavidad esférica - Fórmula de vesic

La capacidad de carga última por fricción se calcula como el producto entre la fricción y el área superficial del pilote que actúa. En caso de tener más de un estrato, corresponderá una

sumatoria:

$$Q_{\text{friccion}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{estratos}}} (A_{si} \cdot f_{si})$$

Existen diversas teorías para calcular la fricción fs en función del tipo de suelo.

## 1.1 Carga última por punta

La punta del pilote se encuentra dentro de un estrato arenoso. Se considera que este estrato siempre tendrá un comportamiento no drenado, y que la capacidad a corto plazo solo cambiará en la fricción producida por la arcilla superior. La capacidad última por punta se tomará como la menor entre la calculada por Brinch-Hansen y Vesic:

$$Q_{\text{punta}} = \min(Q_{\text{pvesic}}, Q_{\text{pBH}})$$

### 1.1.1 Capacidad por punta - Brinch-Hansen

$$A_p := \frac{\pi \cdot \phi_p^2}{4} = 0.196 \text{ m}^2$$

Sección del pilote

$$c := 0 \text{ kPa}$$

Cohesión del estrato 2

$$N_q := e^{\pi \cdot \tan(\phi_2)} \cdot \left( \tan\left(45\text{deg} + \frac{\phi_2}{2}\right) \right)^2 = 42.92$$

Factor de capacidad de carga

$$N_c := \frac{(N_q - 1)}{\tan(\phi_2)} = 55.63$$

Factor de capacidad de carga por cohesión.

$$B := \phi_p$$

Ancho del pilote (se considera el diámetro)

$$L := h_1 + h_2$$

Profundidad del pilote.

$$d_c := 1 + 0.4 \cdot \text{atan}\left(\frac{L}{B}\right) = 1.611$$

Factor asociado al Nc por profundidad. Para fundaciones profundas se modifica y se indican las dimensiones del pilote (Ver Bowles - Foundation Analysis and Design - Capítulo 16)

$$\eta := 1$$

Factor asociado a las tensiones. Este valor es unitario en todos los métodos salvo Vesic

$$q := (\gamma_1 - \gamma_w) \cdot h_1 + (\gamma_2 - \gamma_w) \cdot h_2 = 98 \cdot \text{kPa}$$

Tensión efectiva vertical en la punta del pilote

$$d_q := 1 + 2 \cdot \tan(\phi_2) \cdot (1 - \sin(\phi_2))^2 \cdot \text{atan}\left(\frac{L}{B}\right) = 1.365$$

Factor asociado al Nq por profundidad. Para fundaciones profundas se modifica y se indican las dimensiones del pilote (Ver Bowles - Foundation Analysis and Design - Capítulo 16)

$$Q_{\text{pBH}} := A_p \cdot (c \cdot N_c \cdot d_c + \eta \cdot q \cdot N_q \cdot d_q) = 1.127 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Capacidad de carga última por punta calculada por Brinch-Hansen

### 1.1.2 Capacidad por punta - Vesic

$$K_0 := 1 - \sin(\phi_2) = 0.398$$

Módulo de reacción horizontal

$$\eta := \frac{1 + 2K_0}{3} = 0.599$$

Vesic está definido con las tensiones promedio efectivas. Este coeficiente transforma las tensiones efectivas verticales en promedio.

$$I_r := 100$$

Índice de rigidez. Depende de los parámetros de rigidez, pero también se puede estimar un rango en función del tipo de suelo (Ver Bowles - Foundation Analysis and Design - Capítulo 16)

$$\varepsilon_v := 0$$

Deformación volumétrica en la falla. Si la arena es densa, se recomienda tomar 0 (Ver Bowles - Foundation Analysis and Design - Capítulo 16)

$$I_{rr} := \frac{I_r}{1 + \varepsilon_v \cdot I_r} = 100$$

Índice de rigidez reducido

$$N_{qv} := \frac{3}{3 - \sin(\phi_2)} \left[ e^{\left(\frac{\pi}{2} - \phi_2\right) \cdot \tan(\phi_2)} \cdot \left(\tan\left(45\text{deg} + \frac{\phi_2}{2}\right)\right)^2 \cdot \frac{1.333 \cdot \sin(\phi_2)}{1 + \sin(\phi_2)} \right] \cdot I_{rr}$$

Factor de capacidad de carga

$$N_{cs} := \frac{(N_q - 1)}{\tan(\phi_2)} = 133.264$$

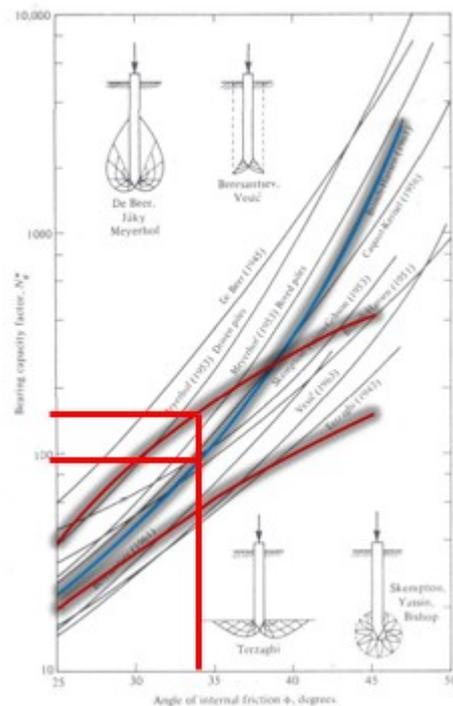
Factor de capacidad de carga por cohesión

$$Q_{pvesic} := A_p \cdot (c \cdot N_c \cdot d_c + \eta \cdot q \cdot N_q \cdot d_q) = 1.595 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Capacidad de carga última por punta calculada por Vesic

La capacidad por punta será la mínima entre Vesic y Brinch-Hansen:

$$Q_{punta} := \min(Q_{pvesic}, Q_{pBH}) = 1.127 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$



## 1.2 Carga última por fricción

La capacidad última por fricción se calcula como la suma de la fricción última de cada uno de los estratos del ejercicio:

$$Q_{\text{friccion}} = A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2}$$

Se utilizará el método  $\alpha$  para calcular la fricción de la arcilla en condición no drenada.

### 1.2.1 Capacidad a corto plazo

$$\alpha_1 := \min\left(1, 0.21 + \frac{26 \text{ kPa}}{s_{u1}}\right) = 0.953 \quad \text{Coeficiente } \alpha \text{ - estrato 1}$$

$$f_{s1} := \alpha_1 \cdot s_{u1} = 33.35 \text{ kPa} \quad \text{Fricción media - estrato 1}$$

$$A_{s1} := h_1 \cdot \pi \cdot \phi_p = 15.708 \text{ m}^2 \quad \text{Area de influencia - estrato 1}$$

$$K_{02} := 1.50 \quad \text{Coeficiente de empuje lateral suelo-pilote - estrato 2. Se considera el valor recomendado por USACE - Design of Pile Foundations - Tabla 4-5.}$$

$$\delta_2 := \frac{3}{4} \phi_2 \quad \text{Ángulo de fricción suelo-pilote - estrato 2}$$

$$\sigma_{vmed2} := (\gamma_1 - \gamma_w) \cdot h_1 + \frac{h_2}{2} \cdot (\gamma_2 - \gamma_w) = 89 \text{ kPa} \quad \text{Tension vertical efectiva media - estrato 2}$$

$$f_{s2} := K_{02} \cdot \tan(\delta_2) \cdot \sigma_{vmed2} = 70.238 \text{ kPa} \quad \text{Friccion media - estrato 2}$$

$$A_{s2} := h_2 \cdot \pi \cdot \phi_p = 2.356 \text{ m}^2 \quad \text{Area de influencia - estrato 2}$$

$$Q_{\text{friccion.U}} := A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2} = 689.354 \text{ kN} \quad \text{Carga ultima por fricción a corto plazo}$$

### 1.2.2 Capacidad a largo plazo

$$K_{01} := 1 \quad \text{Coeficiente de empuje lateral suelo-pilote - estrato 1. Se considera el valor recomendado por USACE - Design of Pile Foundations - Tabla 4-5.}$$

$$\sigma_{vmed1} := (\gamma_1 - \gamma_w) \cdot \frac{h_1}{2} = 40 \text{ kPa} \quad \text{Tension vertical efectiva media - estrato 1}$$

$$\delta_1 := \frac{3}{4} \cdot \phi_1 = 20.25 \text{ deg} \quad \text{Angulo de fricción suelo-pilote - estrato 1}$$

$$f_{s1} := K_{01} \cdot \tan(\delta_1) \cdot \sigma_{vmed1} = 14.757 \text{ kPa} \quad \text{Fricción media - estrato 1}$$

$$A_{s1} := h_1 \cdot \pi \cdot \phi_p = 15.708 \text{ m}^2 \quad \text{Area de influencia - estrato 1}$$

$$K_{02} := 1.5 \quad \text{Coeficiente de empuje lateral suelo-pilote - estrato 2. Se considera el valor recomendado por USACE - Design of Pile Foundations - Tabla 4-5.}$$

$$\delta_2 := \frac{3}{4} \phi_2 \quad \text{Angulo de fricción suelo-pilote - estrato 2}$$

$$\sigma_{vmed2} := (\gamma_1 - \gamma_w) \cdot h_1 + \frac{h_2}{2} \cdot (\gamma_2 - \gamma_w) = 89 \text{ kPa} \quad \text{Tension vertical efectiva media - estrato 2}$$

$$f_{s2} := K_{02} \cdot \tan(\delta_2) \cdot \sigma_{vmed2} = 70.238 \text{ kPa} \quad \text{Fricción media - estrato 2}$$

$$A_{s2} := h_2 \cdot \pi \cdot \phi_p = 2.356 \text{ m}^2$$

Area de influencia - estrato 2

$$Q_{\text{friccion.D}} := A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2} = 397.293 \cdot \text{kN}$$

Carga ultima por fricción a largo plazo

### 1.3 Resumen cargas últimas

$$Q_{\text{ultD}} := Q_{\text{punta}} + Q_{\text{friccion.D}} = 1.525 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Capacidad de carga última a largo plazo

$$Q_{\text{ultU}} := Q_{\text{punta}} + Q_{\text{friccion.U}} = 1.817 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Capacidad de carga última a corto plazo

## 2 Cargas de servicio extraordinarias

$$FS_{\text{extremo}} := 1.7$$

Factor de seguridad asociado a eventos extremos. USACE - Design of Pile Foundations - Table 4-5.

$$Q_{\text{servD}} := \frac{Q_{\text{ultD}}}{FS_{\text{extremo}}} = 896.814 \cdot \text{kN}$$

Carga de servicio asociada a un evento extremo y a largo plazo

$$Q_{\text{servU}} := \frac{Q_{\text{ultU}}}{FS_{\text{extremo}}} = 1.069 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Carga de servicio asociada a un evento extremo y a corto plazo

## 3 Cargas de servicio a traccion

### 3.1 Carga a corto plazo

$$\alpha_1 := \min\left(1, 0.21 + \frac{26 \text{ kPa}}{s_{u1}}\right) = 0.953$$

Coefficiente  $\alpha$  - estrato 1

$$f_{s1} := \alpha_1 \cdot s_{u1} = 33.35 \cdot \text{kPa}$$

Fricción media - estrato 1

$$A_{s1} := h_1 \cdot \pi \cdot \phi_p = 15.708 \text{ m}^2$$

Area de influencia - estrato 1

$$K_{02} := 0.50$$

Coefficiente de empuje lateral suelo-pilote - estrato 2. Se considera el valor recomendado por USACE - Design of Pile Foundations - Tabla 4-5.

$$\delta_2 := \frac{3}{4} \phi_2$$

Ángulo de fricción suelo-pilote - estrato 2

$$\sigma_{\text{vmed2}} := (\gamma_1 - \gamma_w) \cdot h_1 + \frac{h_2}{2} \cdot (\gamma_2 - \gamma_w) = 89 \cdot \text{kPa}$$

Tension vertical efectiva media - estrato 2

$$f_{s2} := K_{02} \cdot \tan(\delta_2) \cdot \sigma_{\text{vmed2}} = 23.413 \cdot \text{kPa}$$

Friccion media - estrato 2

$$A_{s2} := h_2 \cdot \pi \cdot \phi_p = 2.356 \text{ m}^2$$

Area de influencia - estrato 2

$$Q_{\text{friccion.U}} := A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2} = 579.025 \cdot \text{kN}$$

Carga ultima por fricción a corto plazo

$$Q_{\text{trac.ultU}} := Q_{\text{friccion.U}} = 579.025 \cdot \text{kN}$$

Capacidad de carga última a tracción y a corto plazo

$$FStrac_{usual} := 3$$

Factor de seguridad asociado a un evento usual

$$Qtrac_{servU} := \frac{Qtrac_{ultU}}{FStrac_{usual}} = 193.008 \cdot \text{kN}$$

Carga de servicio a tracción asociada a un evento usual y a corto plazo

### 3.2 Carga a largo plazo

$$K_{01} := 0.7$$

Coefficiente de empuje lateral suelo-pilote - estrato 1.  
Se considera el valor recomendado por USACE - Design of Pile Foundations - Tabla 4-5.

$$\sigma_{vmed1} := (\gamma_1 - \gamma_w) \cdot \frac{h_1}{2} = 40 \cdot \text{kPa}$$

Tension vertical efectiva media - estrato 1

$$\delta_1 := \frac{3}{4} \cdot \phi_1 = 20.25 \cdot \text{deg}$$

Angulo de fricción suelo-pilote - estrato 1

$$f_{s1} := K_{01} \cdot \tan(\delta_1) \cdot \sigma_{vmed1} = 10.33 \cdot \text{kPa}$$

Fricción media - estrato 1

$$A_{s1} := h_1 \cdot \pi \cdot \phi_p = 15.708 \text{ m}^2$$

Area de influencia - estrato 1

$$K_{02} := 0.5$$

Coefficiente de empuje lateral suelo-pilote - estrato 2.  
Se considera el valor recomendado por USACE - Design of Pile Foundations - Tabla 4-5.

$$\delta_2 := \frac{3}{4} \phi_2$$

Angulo de fricción suelo-pilote - estrato 2

$$\sigma_{vmed2} := (\gamma_1 - \gamma_w) \cdot h_1 + \frac{h_2}{2} \cdot (\gamma_2 - \gamma_w) = 89 \cdot \text{kPa}$$

Tension vertical efectiva media - estrato 2

$$f_{s2} := K_{02} \cdot \tan(\delta_2) \cdot \sigma_{vmed2} = 23.413 \cdot \text{kPa}$$

Fricción media - estrato 2

$$A_{s2} := h_2 \cdot \pi \cdot \phi_p = 2.356 \text{ m}^2$$

Area de influencia - estrato 2

$$Q_{friccion.D} := A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2} = 217.424 \cdot \text{kN}$$

Carga ultima por fricción a largo plazo

$$Qtrac_{ultD} := Q_{friccion.D} = 217.424 \cdot \text{kN}$$

Capacidad de carga a tracción y a largo plazo

$$Qtrac_{servD} := \frac{Qtrac_{ultD}}{FStrac_{usual}} = 72.475 \cdot \text{kN}$$

Carga de servicio a tracción asociada a un evento usual y a largo plazo

## 4 Cargas de servicio considerando que es prefabricado

### 4.1 Capacidad a corto plazo

$$\alpha_1 := \min\left(1, 0.21 + \frac{26 \text{ kPa}}{s_{u1}}\right) = 0.953$$

Coefficiente  $\alpha$  - estrato 1

$$f_{s1} := \alpha_1 \cdot s_{u1} = 33.35 \cdot \text{kPa}$$

Fricción media - estrato 1

$A_{s1} := h_1 \cdot \pi \cdot \phi_p = 15.708 \text{ m}^2$	Area de influencia - estrato 1
$K_{02} := 2$	Coefficiente de empuje lateral suelo-pilote - estrato 2. Se considera el valor recomendado por USACE - Design of Pile Foundations - Tabla 4-5.
$\delta_2 := \frac{3}{4} \phi_2$	Ángulo de fricción suelo-pilote - estrato 2
$\sigma_{vmed2} := (\gamma_1 - \gamma_w) \cdot h_1 + \frac{h_2}{2} \cdot (\gamma_2 - \gamma_w) = 89 \cdot \text{kPa}$	Tension vertical efectiva media - estrato 2
$f_{s2} := K_{02} \cdot \tan(\delta_2) \cdot \sigma_{vmed2} = 93.65 \cdot \text{kPa}$	Friccion media - estrato 2
$A_{s2} := h_2 \cdot \pi \cdot \phi_p = 2.356 \text{ m}^2$	Area de influencia - estrato 2
$Q_{friccion.U} := A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2} = 744.519 \cdot \text{kN}$	Carga ultima por fricción a corto plazo
$FS_{usual} := 3$	Factor de seguridad asociado a un evento usual
$Q_{ult.pref.U} := Q_{punta} + Q_{friccion.U}$	Carga última asociado a un evento usual, a corto plazo y considerando un pilote prefabricado
$Q_{serv.pref.U} := \frac{Q_{ult.pref.U}}{FS_{usual}} = 623.937 \cdot \text{kN}$	Carga de servicio asociado a un evento usual, a corto plazo y considerando un pilote prefabricado
$\frac{Q_{ult.pref.U}}{Q_{ultU}} = 1.03$	Incremento respecto del pilote perforado

### 1.2.2 Capacidad a largo plazo

$K_{01} := 1.25$	Coefficiente de empuje lateral suelo-pilote - estrato 1. Se considera el valor recomendado por USACE - Design of Pile Foundations - Tabla 4-5.
$\sigma_{vmed1} := (\gamma_1 - \gamma_w) \cdot \frac{h_1}{2} = 40 \cdot \text{kPa}$	Tension vertical efectiva media - estrato 1
$\delta_1 := \frac{3}{4} \cdot \phi_1 = 20.25 \cdot \text{deg}$	Angulo de fricción suelo-pilote - estrato 1
$f_{s1} := K_{01} \cdot \tan(\delta_1) \cdot \sigma_{vmed1} = 18.446 \cdot \text{kPa}$	Fricción media - estrato 1
$A_{s1} := h_1 \cdot \pi \cdot \phi_p = 15.708 \text{ m}^2$	Area de influencia - estrato 1
$K_{02} := 2$	Coefficiente de empuje lateral suelo-pilote - estrato 2. Se considera el valor recomendado por USACE - Design of Pile Foundations - Tabla 4-5.
$\delta_2 := \frac{3}{4} \phi_2$	Angulo de fricción suelo-pilote - estrato 2
$\sigma_{vmed2} := (\gamma_1 - \gamma_w) \cdot h_1 + \frac{h_2}{2} \cdot (\gamma_2 - \gamma_w) = 89 \cdot \text{kPa}$	Tension vertical efectiva media - estrato 2
$f_{s2} := K_{02} \cdot \tan(\delta_2) \cdot \sigma_{vmed2} = 93.65 \cdot \text{kPa}$	Fricción media - estrato 2

$$A_{s2} := h_2 \cdot \pi \cdot \phi_p = 2.356 \text{ m}^2$$

Area de influencia - estrato 2

$$Q_{\text{friccion.D}} := A_{s1} \cdot f_{s1} + A_{s2} \cdot f_{s2} = 510.407 \cdot \text{kN}$$

Carga ultima por fricción a largo plazo

$$Q_{\text{ult.pref.D}} := Q_{\text{punta}} + Q_{\text{friccion.D}}$$

Carga última asociado a un evento usual, a corto plazo y considerando un pilote prefabricado

$$Q_{\text{serv.pref.D}} := \frac{Q_{\text{ult.pref.D}}}{FS_{\text{usual}}} = 545.9 \cdot \text{kN}$$

Carga de servicio asociado a un evento usual, a corto plazo y considerando un pilote prefabricado

$$\frac{Q_{\text{ult.pref.D}}}{Q_{\text{ultD}}} = 1.074$$

Incremento respecto del pilote perforado