

# Diseño de pilotes hincados Parte 2

Ing. Jhomayra Herrera Villa



U.S. Department of Transportation  
Federal Highway Administration

Publication No. FHWA-NHI-16-009  
FHWA GEC 012 – Volume I  
July 2016

**NHI Courses No. 132021 and 132022**

## Design and Construction of Driven Pile Foundations – Volume I

Developed following:

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 7<sup>th</sup> Edition, 2014, with 2015 Interim.

AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, 3<sup>rd</sup> Edition, 2010, with '11, '12, '13, '14, and '15 Interims.



NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE  
Training Solutions for Transportation Excellence

# Contenido

- 01. Capacidad estática en tracción en pilotes aislados
- 02. Capacidad estática en tracción en grupo de pilotes
- 03. Diseño a carga lateral
  - 03.01 Método de Broms
  - 03.02 Método p-y

# **01. Capacidad estática en tracción en pilotes aislados**

# Capacidad estática en tracción

- En suelos cohesivos, cuando la carga es asumida que ocurre en condiciones no drenadas, la resistencia del fuste del pilote es generalmente considerada igual en compresión y en tracción.
- En suelos granulares o suelos con drenaje libre, la resistencia al levantamiento en pilotes ha sido mas controversial. De Nicola y Randolph (1993) indica que ha sido costumbre asumir una resistencia en fuste por carga axial en tracción igual al 70% de la resistencia a compresión. Contrariamente, la API (1993) recomienda considerar que la resistencia en fuste en compresión y tracción son iguales. Así mismo, Altaee et al. (1992) presento un caso de un pilote instrumentado en arena donde la resistencia en fuste fue aproximadamente igual compresión y tracción cuando se consideran los esfuerzos residuales

# Capacidad estática en tracción

Table 7-1 Resistance Factors for Static Analysis Methods Presented in this Manual (modified from AASHTO 2014)

Condition	Resistance Determination Method	Resistance Factor
Nominal Geotechnical Resistance of Single Piles in Compression - Static Analysis Methods, $\phi_{stat}$	Shaft Resistance and Toe Resistance: Clay and Mixed Soils $\alpha$ -method $\beta$ -method (1991) Brown (2001) API RP2A (1993) Elsami and Fellenius Schmertmann (1975)	0.35 Differs in Manual <sup>1</sup> not in AASHTO not in AASHTO not in AASHTO 0.50
	Shaft Resistance and Toe Resistance: Sand Nordlund Method	0.45
Block Failure, $\phi_{bl}$	Cohesive	0.60
Nominal Geotechnical Resistance of Single Piles in Tension, $\phi_{up}$	Nordlund Method	0.35
	$\alpha$ -method	0.25
	$\beta$ -method (1991)	0.20
	$\lambda$ -method	0.30
	SPT-method	0.25
	CPT-method	0.40
Group Uplift Resistance, $\phi_{ug}$	Sand and Clay	0.50
Lateral Geotechnical Resistance of Single Pile or Pile Group	All Soils and Rock	1.0

Note: 1 – AASHTO based on Skempton (1951), manual based on Fellenius (1991).

El factor de reducción es reducido en 20% aproximadamente, por lo que, no se debe hacer alguna reducción a la resistencia nominal para los cálculos.

$$R_r = \phi R_n = \phi_{up} R_s$$

R<sub>r</sub>: Resistencia reducida

$\phi_{up}$ : factor de reducción para tracción o levantamiento de acuerdo a tabla

R<sub>s</sub>: resistencia nominal en fuste

# Capacidad estática en tracción

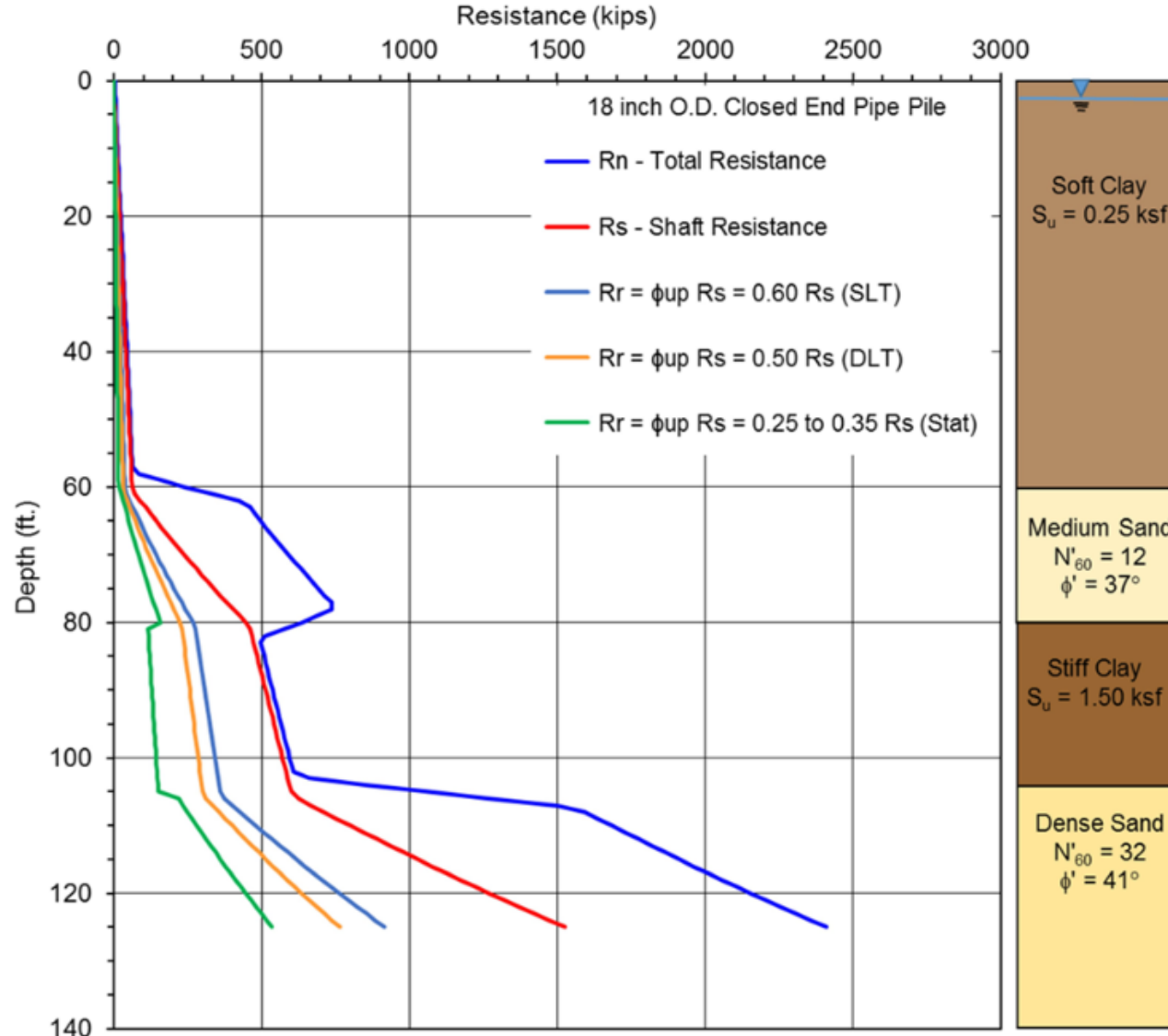


Figure 7-32 Design chart for nominal and factored resistance in axial tension.

Table 7-2 Resistance Factors for Field Determination Methods (after AASHTO 2014)

Condition	Resistance Determination Method	Resistance Factor
Nominal Geotechnical Resistance of Single Pile in Compression	Driving criteria established by successful static load test of at least one pile per site condition and dynamic testing* of at least two piles per site condition, but no less than 2% of the production piles.	0.80
Dynamic Analysis and Static Load Test Methods, $\phi_{dyn}$	Driving criteria established by successful static load test of at least one pile per site condition without dynamic testing.	0.75
	Driving criteria established by dynamic testing* conducted on 100% of production piles.	0.75
	Driving criteria established by dynamic testing,*quality control by dynamic testing* of at least two piles per site condition, but no less than 2% of the production piles.	0.65
	Wave equation analysis, without pile dynamic measurements or load test, at End of Drive conditions only.	0.50
	FHWA Modified Gates dynamic pile formula (End of Drive condition only).	0.40
	Engineering News (as defined in AASHTO) dynamic pile formula (End of Drive condition only).	0.10
Nominal Geotechnical Resistance of Single Pile in Tension, $\phi_{dyn}$	Static load test.	0.60
	Dynamic testing* with signal matching.	0.50

## **02. Capacidad estática en tracción en grupo de pilotes**

# Capacidad estática en tracción de un grupo de pilotes

AASHTO Bridge (2014) limita la resistencia a tracción o levantamiento de un grupo de pilotes al menor de:

- La suma individual de la resistencia axial.

- La resistencia axial en tracción de un grupo de pilotes considerada como bloque.

$$R_r = \phi R_n = \phi_{ug} R_{ug}$$

$R_{ug}$ : Resistencia nominal en tracción de un grupo de pilotes

$\phi_{ug}$ : Factor de reducción por resistencia en tracción.

## Factor de resistencia

Group Uplift Resistance, $\phi_{ug}$	Sand and Clay	0.50
--------------------------------------	---------------	------



# Resistencia axial en tracción en grupo – Suelo granular

Suma como aportes de pilotes individuales:

$$R_r = \phi R_{ug} = \phi_{up} R_s n$$

$R_{ug}$ : Resistencia nominal en tracción de un grupo de pilotes

$R_s$ : Resistencia nominal de fuste

$\phi_{up}$ : factor de reducción para tracción o levantamiento

$n$ : número de pilotes

Bloque

$$R_r = \phi R_n = \phi_{ug} R_{ug}$$

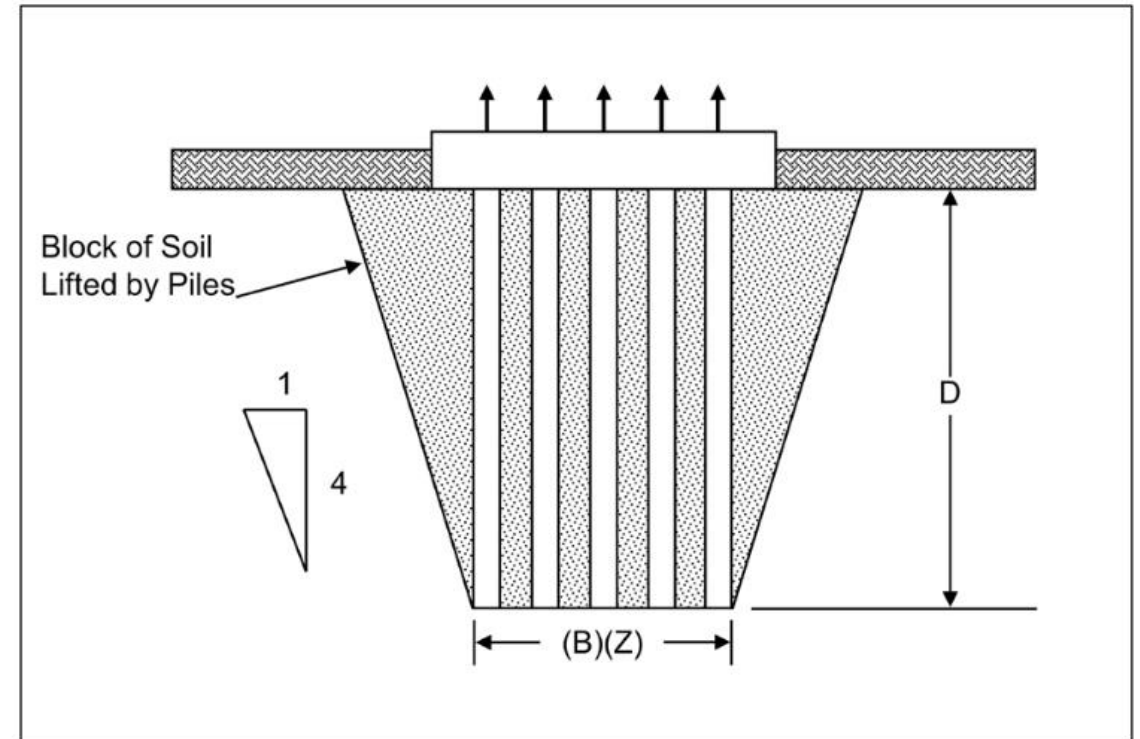


Figure 7-33 Uplift of pile group in cohesionless soil (after Tomlinson 1994).

La resistencia del grupo de pilotes en suelo granular es el peso dentro del bloque. Por simplicidad el peso de los pilotes puede igual al que sería ocupado por el suelo.

# Resistencia axial en tracción en grupo – Suelo cohesivo

Suma como aportes de pilotes individuales:

$$R_r = \phi R_{ug} = \phi_{up} R_s n$$

$R_{ug}$ : Resistencia nominal en tracción de un grupo de pilotes

$B, Z$ : dimensiones del grupo de pilote

$D$ : longitud de pilote embebida

$S_u$ : resistencia al corte sin drenaje ponderado en toda la altura y perímetro del grupo de pilotes

$W_g$ : Peso efectivo del bloque pilote/suelo incluyendo el peso del bloque cabezal

Bloque

$$R_n = R_{ug} = 2D(B + Z)s_u + W_g$$

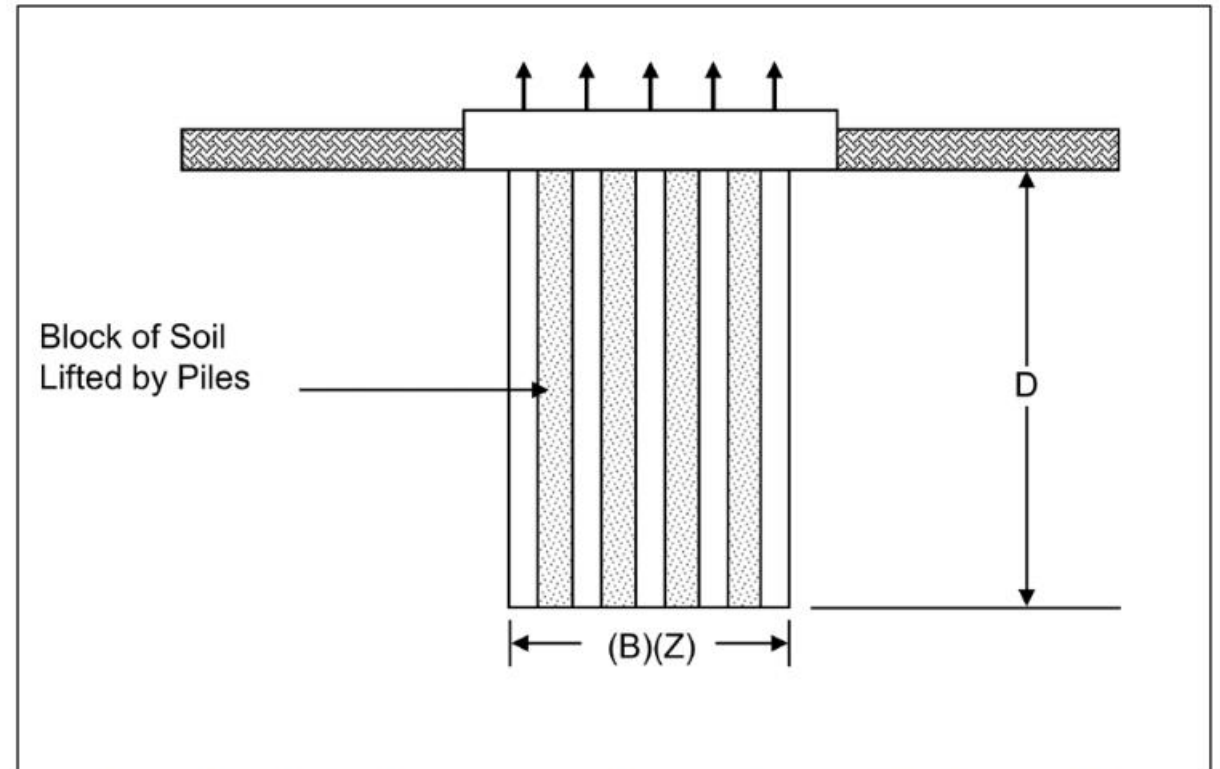


Figure 7-34 Uplift of pile group in cohesive soils (after Tomlinson 1994).

## 03. Diseño a carga lateral

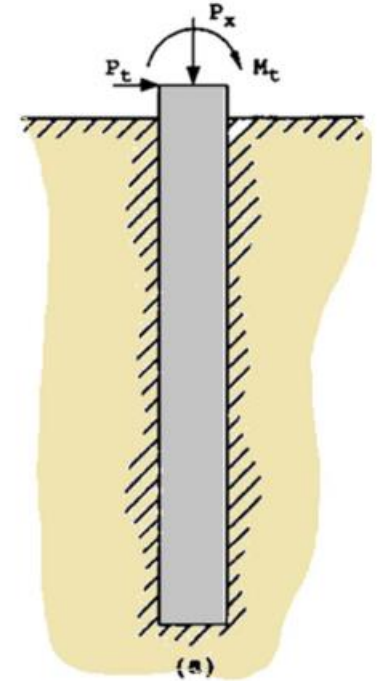
# Métodos de diseño de carga lateral

## Métodos analíticos

Los métodos analíticos están basados en teoría y data experimental. Dos enfoques comunes hay: método de cálculo Broms (1964) y método numérico de Reese (1984). Ambos métodos consideran al pilote como elemento elástico.

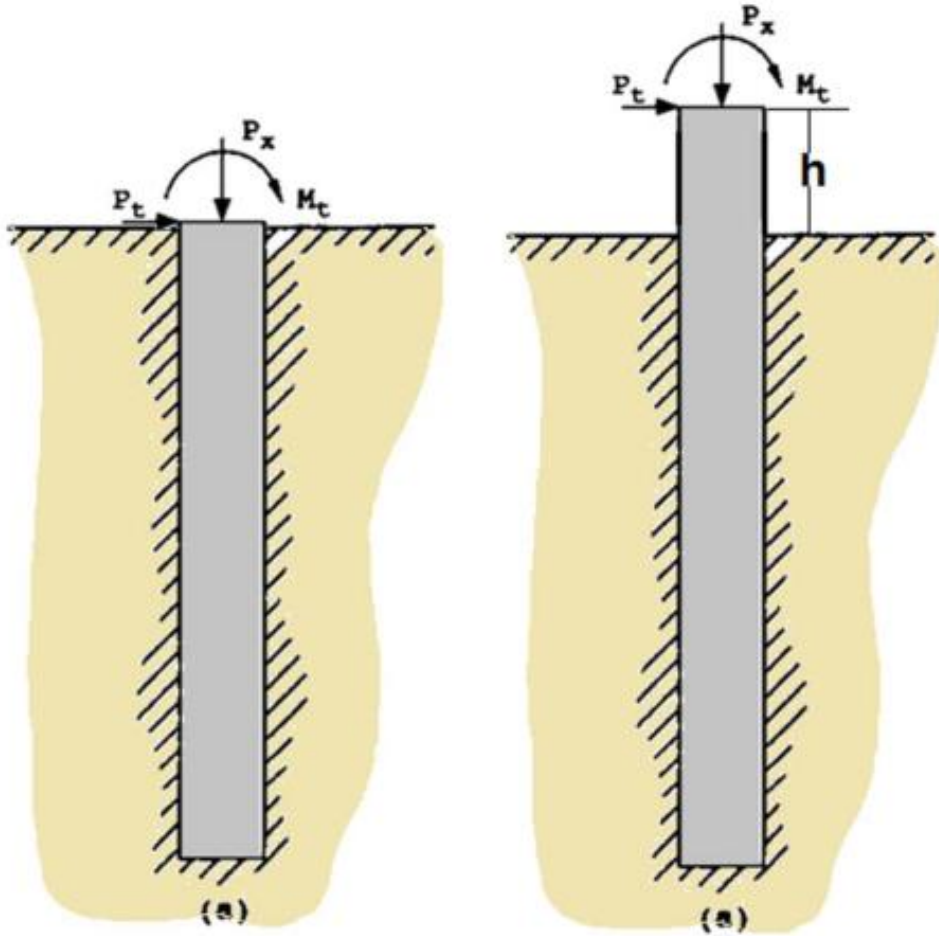
El método de Broms proporciona un procedimiento de calculo mas sencillo para determinar las cargas laterales y deflexiones del pilote. El método también ignora la carga axial del pilote.

El método p-y de Reese es un análisis mas riguroso que está incorporado en programas como LPILE. A partir del método se obtiene distribución del momento, cortante, modulo suelo-pilote y resistencia en toda la extensión del pilote.



## 03.1. Método de Broms

# Método de Broms



Las solicitaciones en la cabeza del pilo producen deformación lateral del suelo y del pilote.

El suelo y el pilote se oponen al movimiento.

El diseño consiste en:

- Limitar los esfuerzos en el suelo
- Limitar los esfuerzos en el pilotes
- Limitar las deformaciones

El método de Broms es un cálculo en rotura (ya sea por rotura del suelo o formación de rotula plastia del pilote)

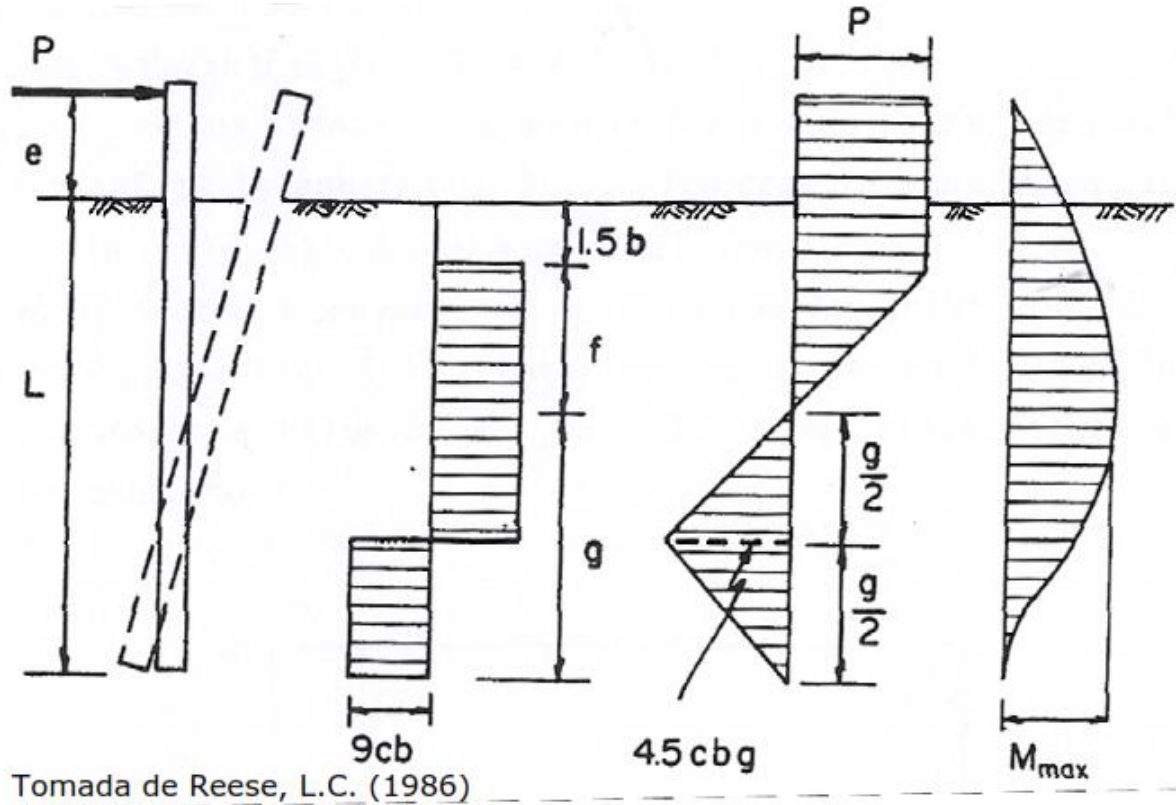
# Método de Broms

Broms analizó la condición límite en que el terreno ha llegado a plastificar, movilizand su resistencia al corte. Adoptó distribuciones teóricas de las presiones ejercidas por el terreno en estas condiciones.

Se presentan diversas condiciones de pilote y suelo:

- Pilote corto en suelo cohesivo – pilote libre en cabeza
- Pilote largo en suelo cohesivo – pilote libre en cabeza
  
- Pilote corto en suelo cohesivo – pilote empotrado en cabeza
- Pilote intermedio en suelo cohesivo – pilote empotrado en cabeza
- Pilote largo en suelo cohesivo – pilote empotrado en cabeza
  
- Pilote corto en suelo granular – pilote libre en cabeza
- Pilote largo en suelo granular – pilote libre en cabeza
  
- Pilote corto en suelo granular – pilote empotrado en cabeza
- Pilote intermedio en suelo granular – pilote empotrado en cabeza
- Pilote largo en suelo granular – pilote empotrado en cabeza

# Pilote corto en suelo cohesivo – pilote libre en cabeza



Presión del  
suelo

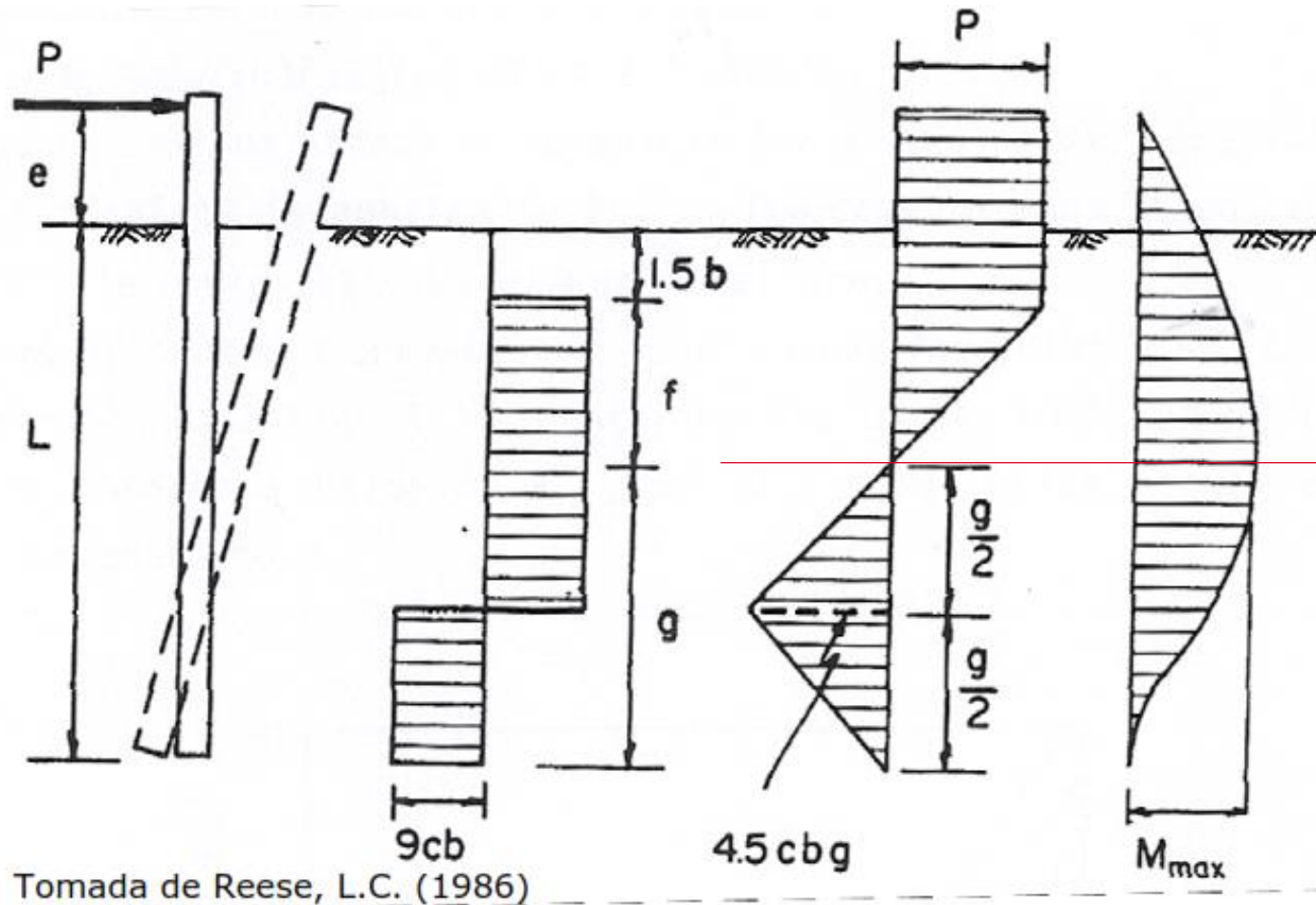
Fuerza  
cortante

Momentos

- La resistencia ultima del suelo es 9 veces su resistencia al corte sin drenaje:  $9S_u$ .
- Se asume que dicha resistencia actúa en un ancho igual al diámetro del pilote.
- Se supone que un primer tramo del pilote igual a  $1.5b$  no contribuye.



# Pilote corto en suelo cohesivo – pilote libre en cabeza



Presión del  
suelo

Fuerza  
cortante

Momentos

- Momento máximo, cortante nulo

$$M_{\max}^{\downarrow} = P(e + 1.5b + f) - 9cb \frac{f^2}{2}$$

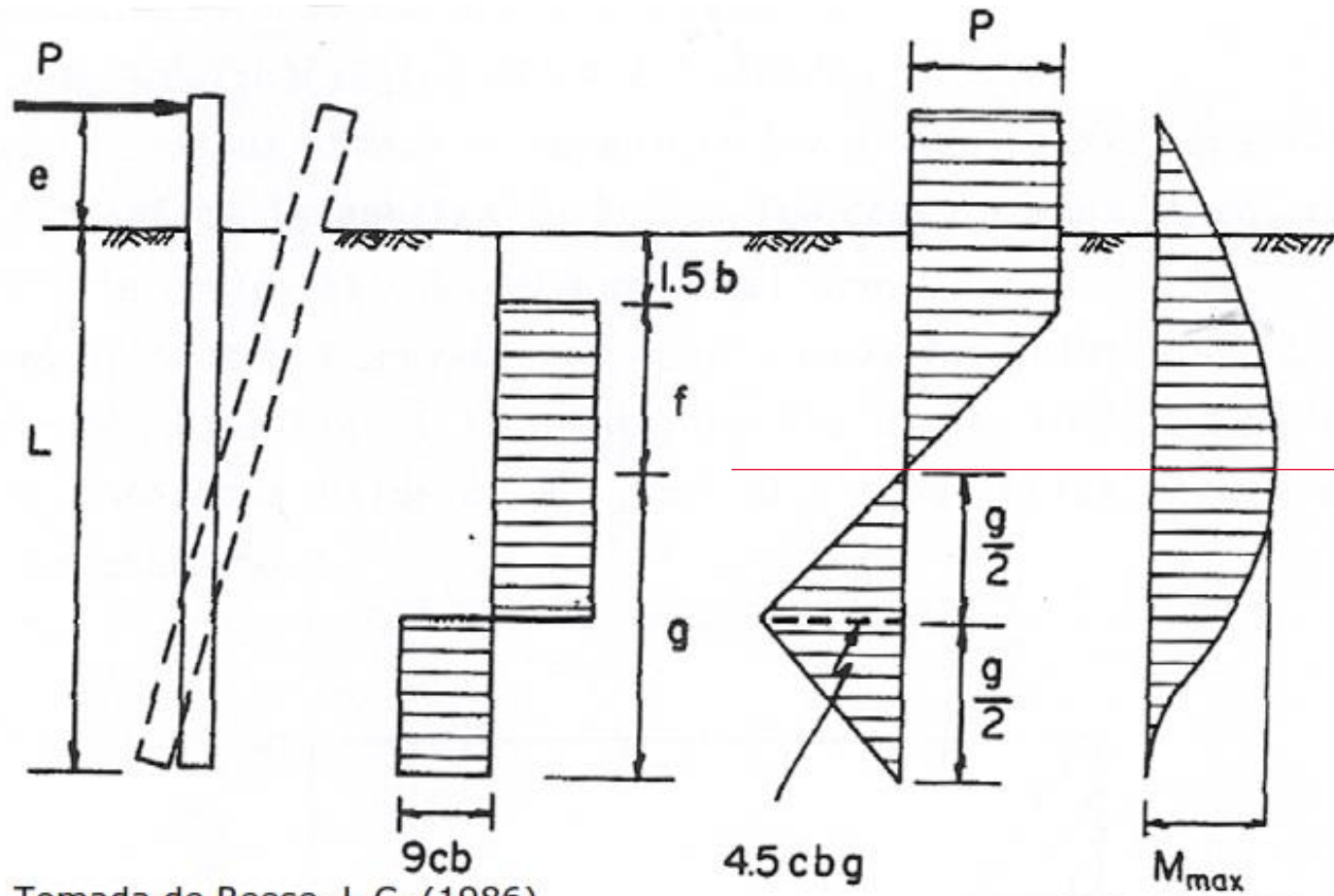
$$\frac{dM}{df} = 0 = P - 9cbf \Rightarrow f = \frac{P}{9cb}$$

$$M_{\max}^{\downarrow} = P(e + 1.5b + f) - 0.5Pf$$

$$M_{\max}^{\downarrow} = P(e + 1.5b + 0.5f)$$

Adaptado de Luis Ortuño

# Pilote corto en suelo cohesivo – pilote libre en cabeza



- Momento máximo, cortante nulo

$$M_{\max}^{\uparrow} = 9cb \frac{g}{2} \left( \frac{g}{2} + \frac{g}{4} \right) - 9cb \frac{g \cdot g}{2 \cdot 4}$$

$$M_{\max}^{\uparrow} = 2.25 cbg^2$$

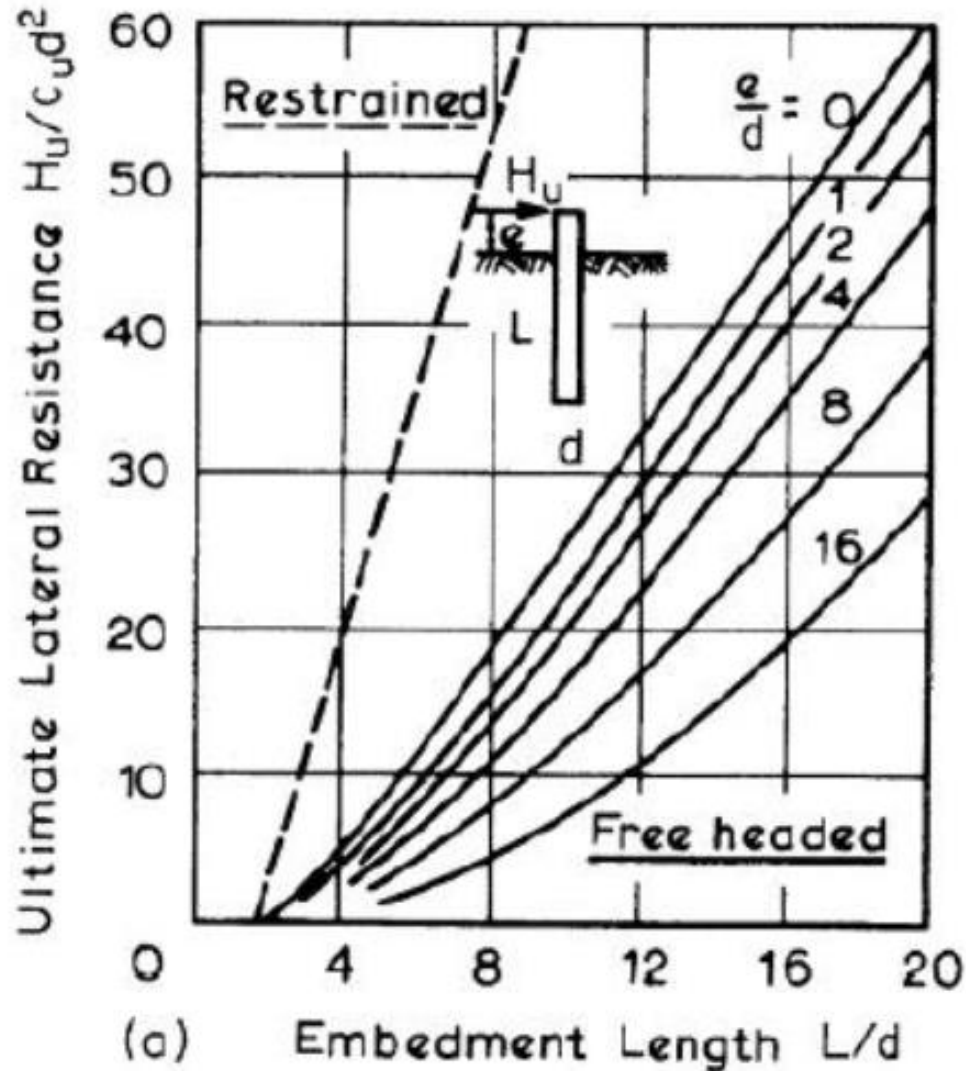
Tomada de Reese, L.C. (1986)

Presión del  
suelo

Fuerza  
cortante

Momentos

# Pilote corto en suelo cohesivo – pilote libre en cabeza



$$M_{\text{máx}}^{\downarrow} = H(e + 1.5D + 0.5f)$$

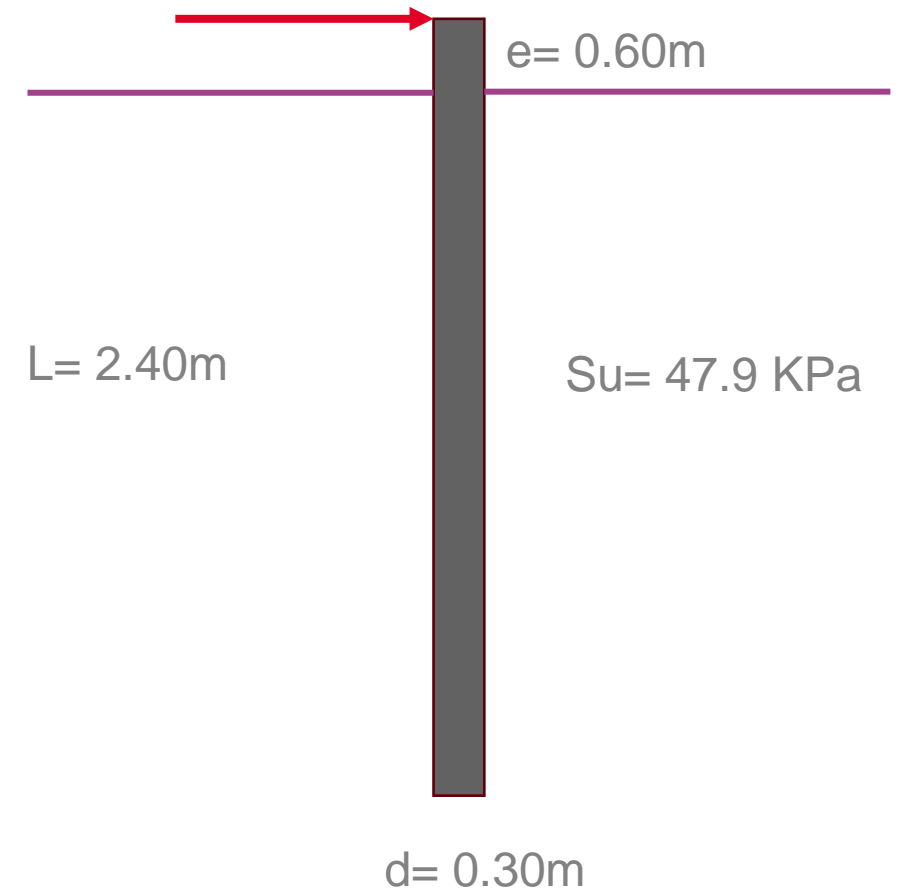
$$M_{\text{máx}}^{\uparrow} = 2.25 S_u D g^2$$

$$L = 1.5D + f + g$$

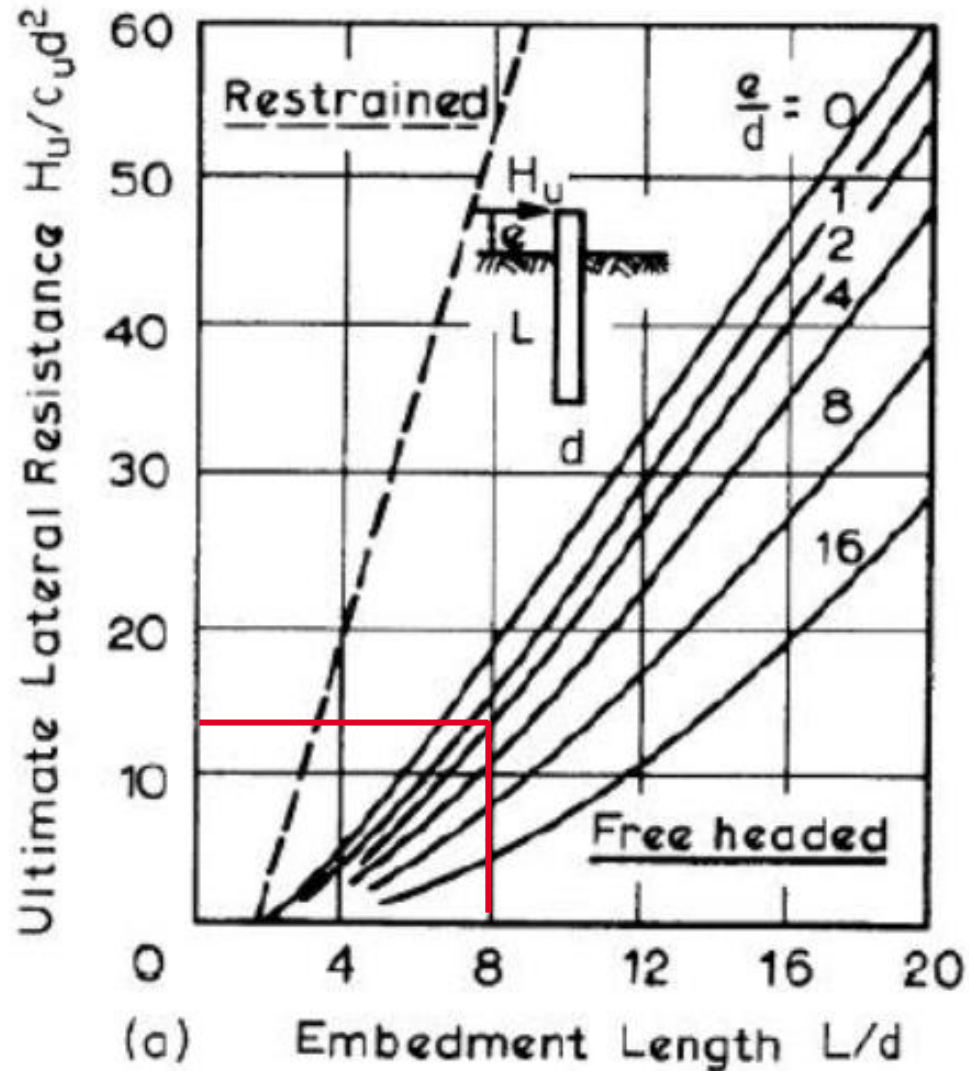
A partir de cierta geometría y resistencia del suelo, se puede determinar la carga lateral “H” que genera la rotura del suelo. También se puede conocer el momento máximo en el pilote.

# Pilote corto en suelo cohesivo – pilote libre en cabeza

**Ejemplo.** Sea un pilote tubular metálico de 300 mm de diámetro exterior y 19 mm de espesor. Se instala en una arcilla saturada cuya resistencia al corte sin drenaje es 47.9 KPa. Si la longitud enterrada del pilote es de 2.40m, y sobresale 0.60m, se pide determinar la fuerza horizontal en cabeza que lleva a la rotura del suelo y el momento máximo del pilote en dichas condiciones.



# Pilote corto en suelo cohesivo – pilote libre en cabeza



$$L/d=8$$

$$e/d=2$$

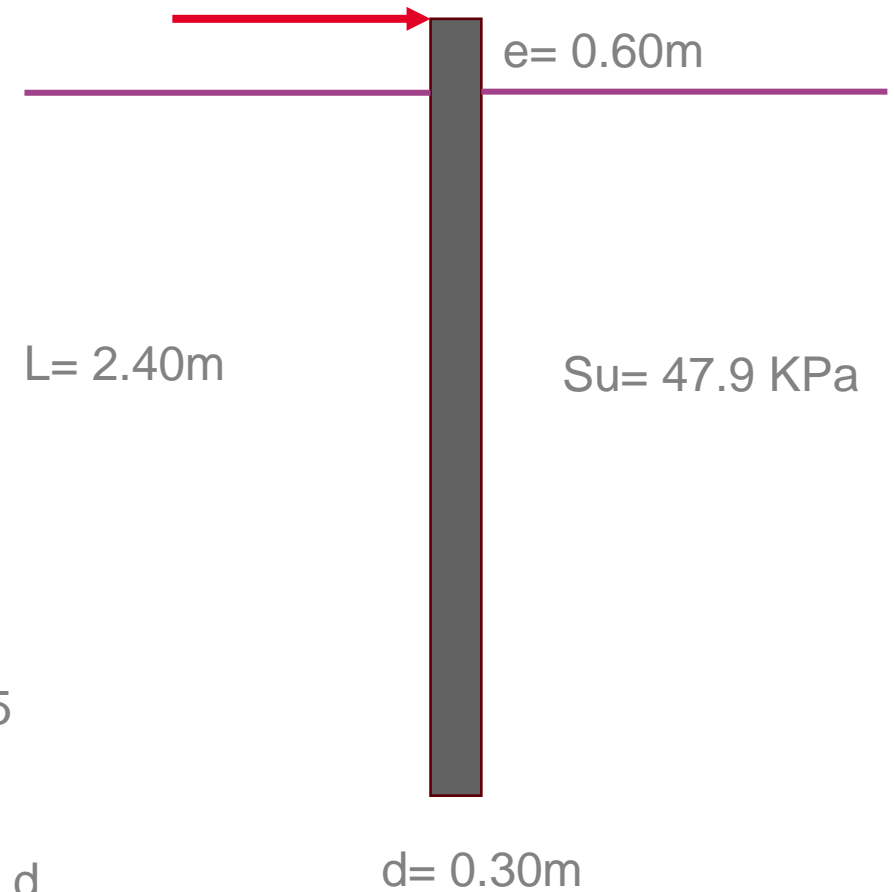
$$H_u/c_u d^2 = 13.5$$

$$H_u = 58.2 \text{ KN}$$

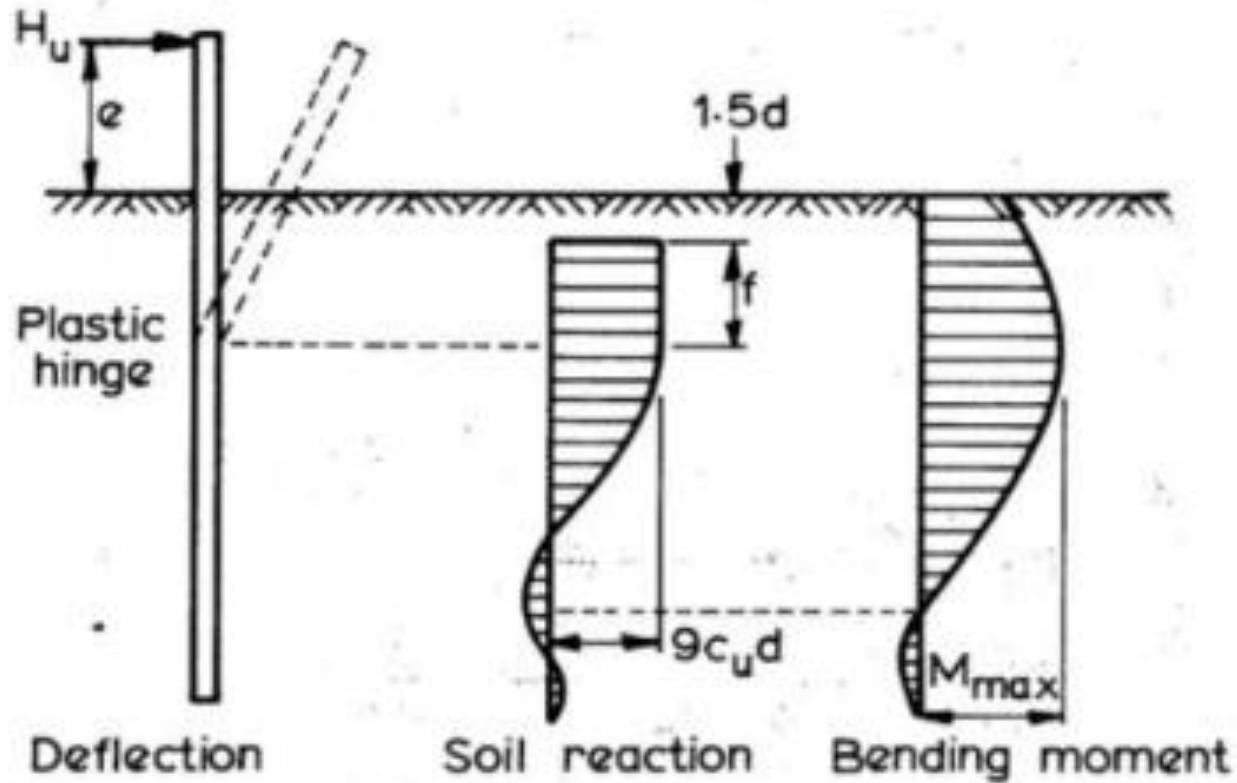
$$H_u = f \times 9 \times c \times d$$

$$f = 0.45 \text{ m}$$

$$M_{\text{máx}} = 74.2 \text{ KN.m}$$



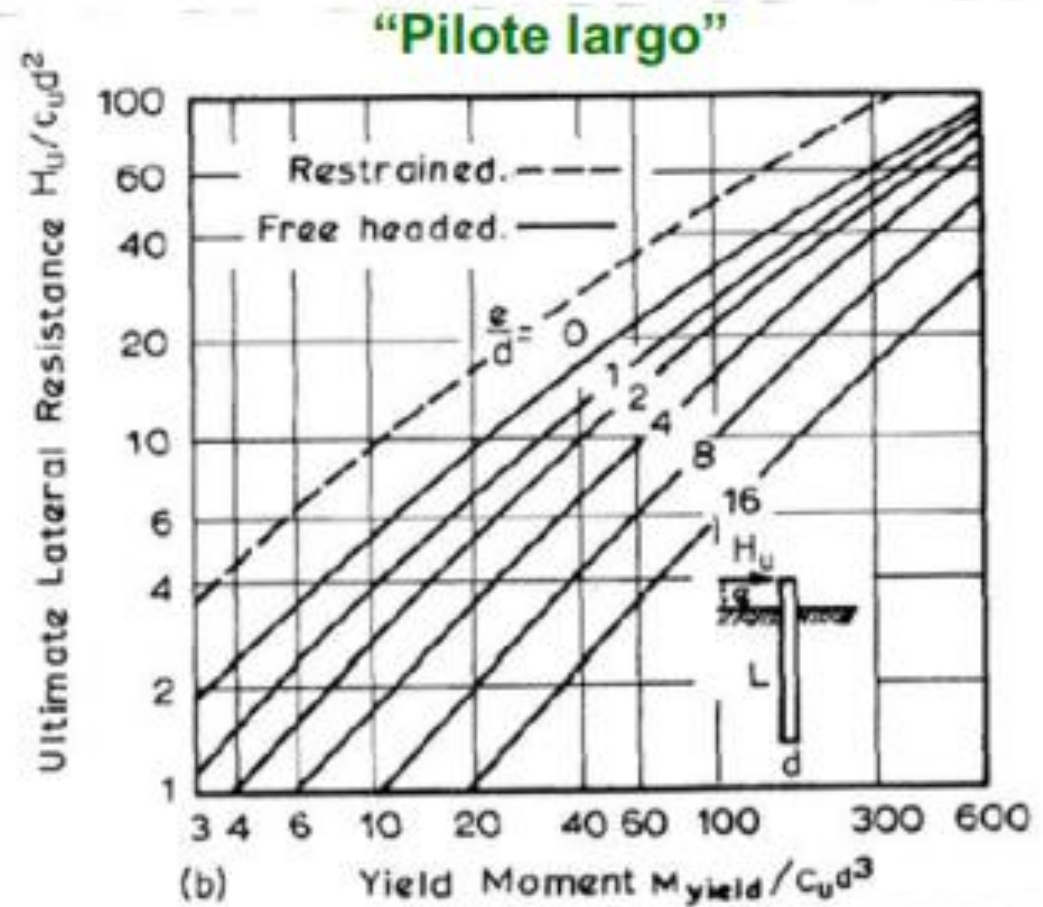
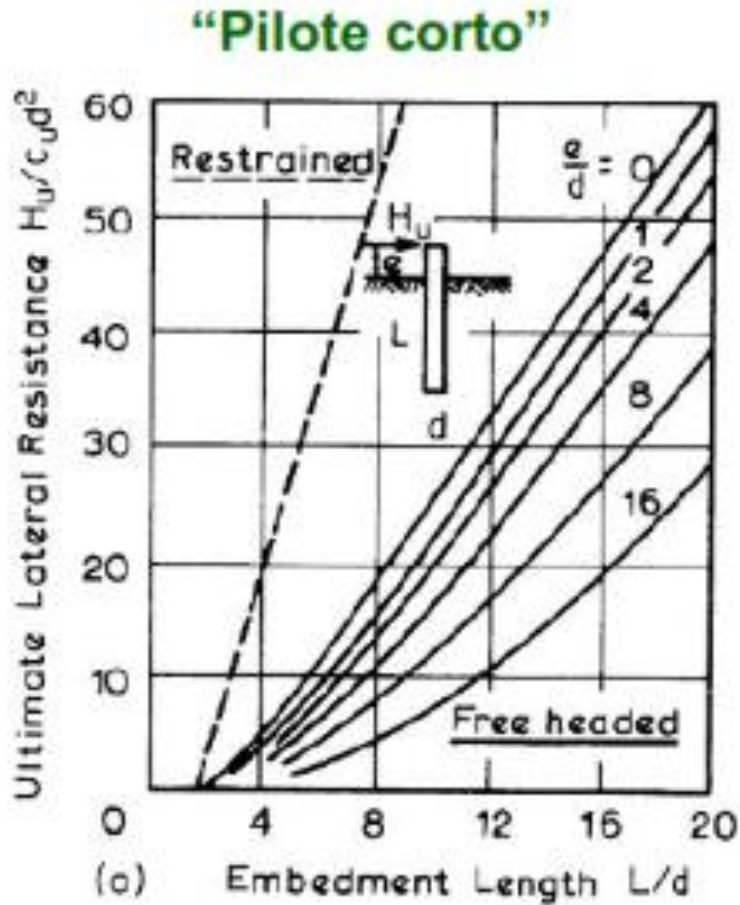
# Pilote largo en suelo cohesivo – pilote libre en cabeza



- Cuando el pilote se hace mas largo la rotura se puede producir por formación de una rotula plástica a la profundidad del momento máximo, esto es a  $1.5d + f$ .
- Broms publico ábaco correspondiente al momento máximo.
- Un pilote deja de ser corto cuando falla por momento. El momento ultimo del pilote depende de su geometría y materiales, y empleando las ecuaciones previas se puede determinar la profundidad "f" a partir de la cual se produce esta situación.



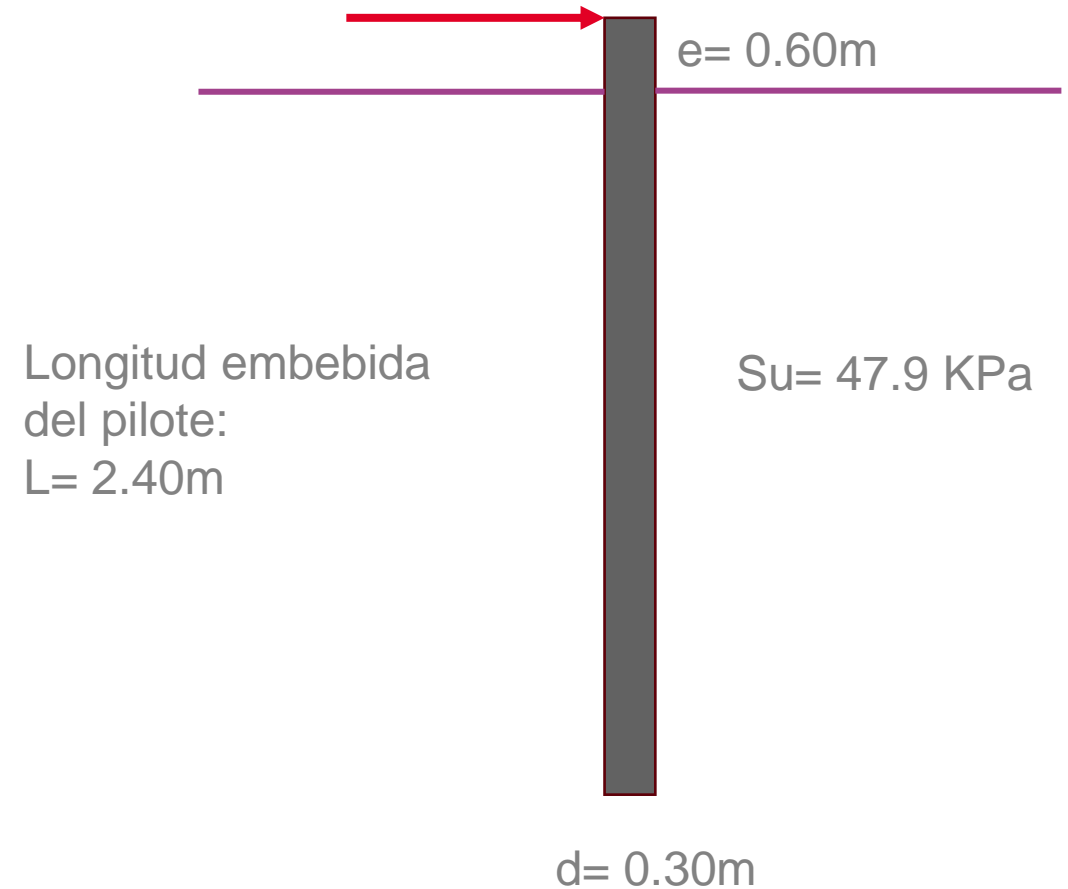
# Pilote largo en suelo cohesivo – pilote libre en cabeza



Se calcula  $H$  de rotura en ambas figuras y se determina cuál es la situación más desfavorable

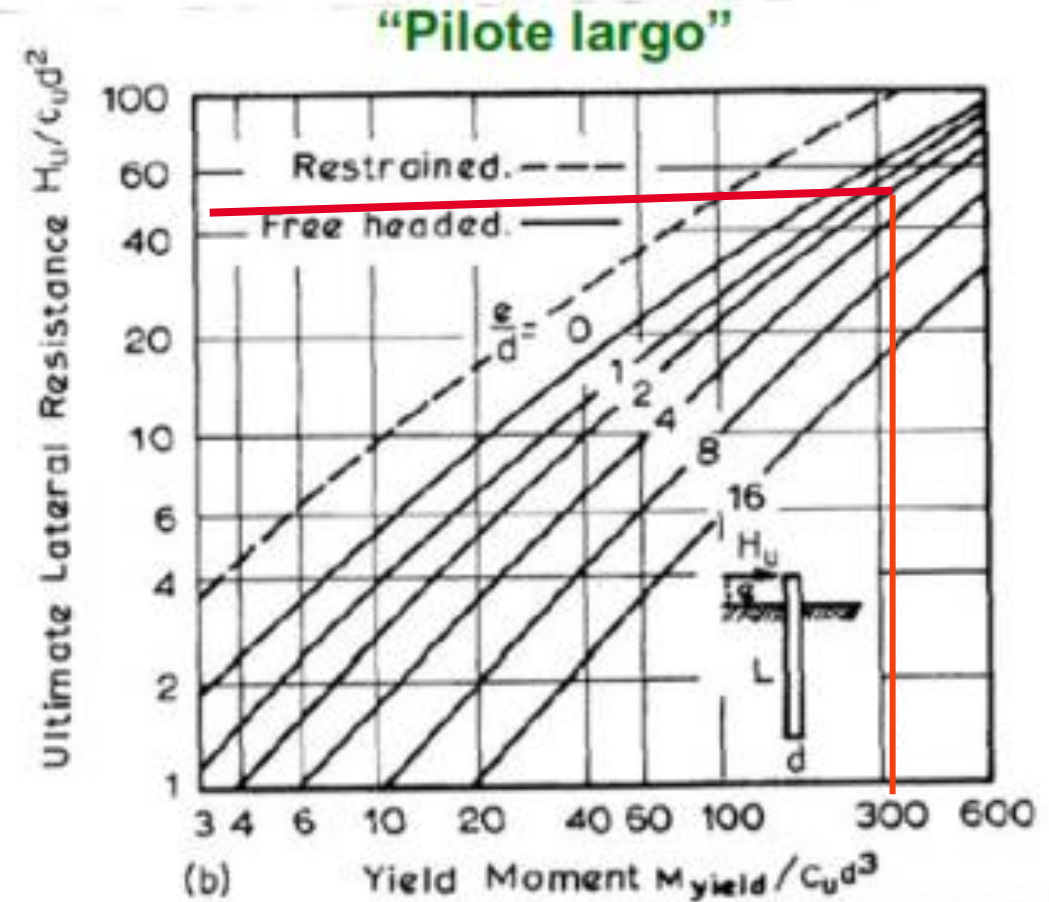
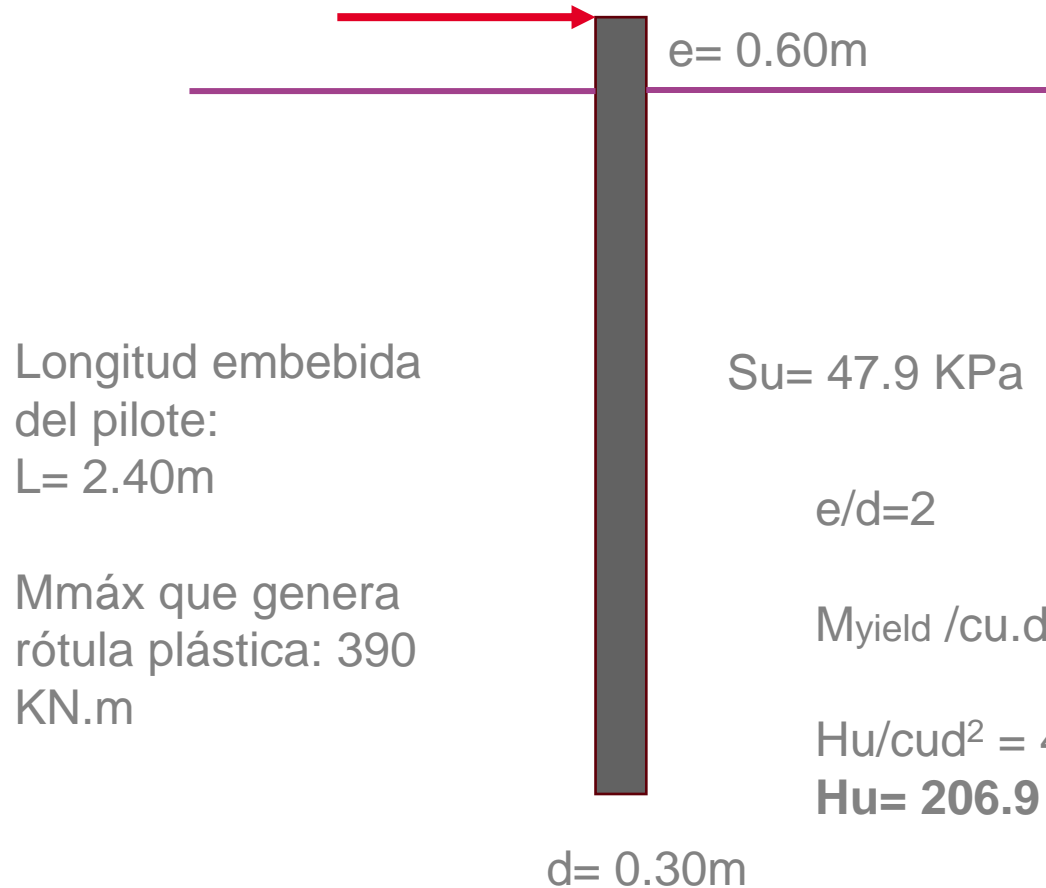
# Pilote largo en suelo cohesivo – pilote libre en cabeza

**Ejemplo.** Determinar la carga que da lugar a la formación de rótula plástica en el pilote (momento máximo de 390 KN.m)

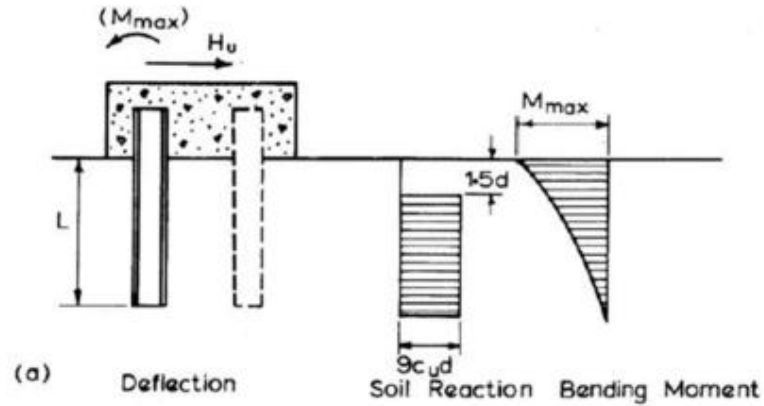




# Pilote largo en suelo cohesivo – pilote libre en cabeza



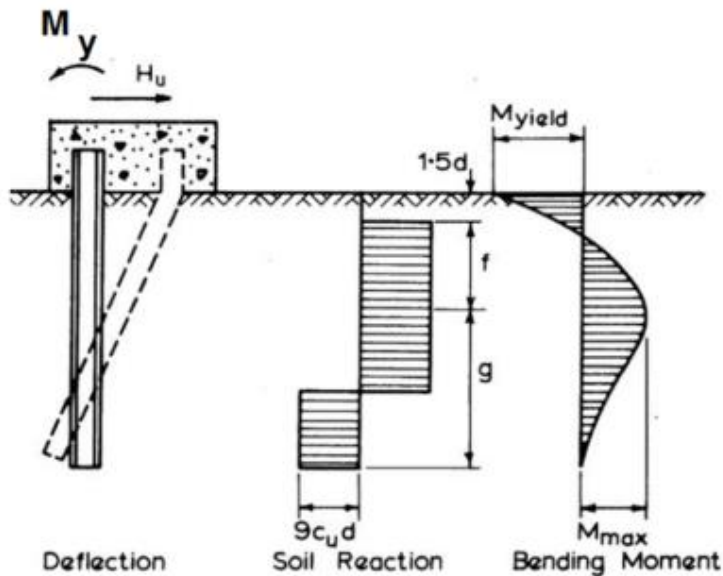
# Pilote en suelo cohesivo – pilote empotrado en cabeza



## Pilote corto

$$H_u = 9c_u d(L - 1.5d)$$

$$M_{\max} = H_u(0.5L + 0.75d)$$



## Pilote intermedio

$$M_{\max} < M_{\text{yield}}$$

$$f = \frac{H_u}{9c_u d}$$

$$M_{\max}^{\downarrow} = H_u(1.5d + f) - 9c_u d \frac{f^2}{2} - M_{\text{yield}}$$

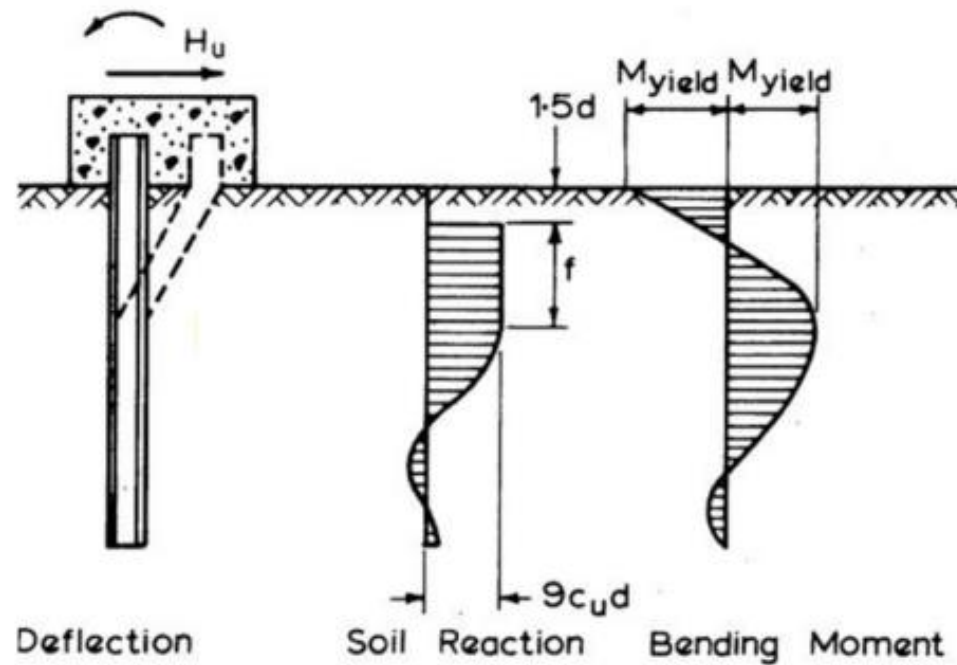
$$M_{\max}^{\downarrow} = H_u(1.5d + 0.5f) - M_{\text{yield}}$$

$$M_{\max}^{\uparrow} = 2.25 c_u d g^2$$

$$M_y = 2.25c_u d g^2 - 9c_u d f(1.5d + 0.5f)$$

$$L = 1.5d + f + g$$

# Pilote en suelo cohesivo – pilote empotrado en cabeza



## Pilote largo

$$M_{max} = M_{yield}$$

Se forma otra rótula plástica en el pilote, a la profundidad del momento máximo

$$f = \frac{H_u}{9c_u d}$$

$$M_{max}^{\downarrow} = M_{yield} = H_u (1.5d + 0.5f) - M_{yield}$$

$$H_u = \frac{2M_{yield}}{1.5d + 0.5f}$$

# Pilote en suelo cohesivo – pilote empotrado en cabeza

Ejemplo. Sea un pilote tubular metálico de 300 mm de diámetro exterior, 19 mm de espesor de pared y momento ultimo de 430 KN.m. Se instala, empotrado en cabeza, en una arcilla saturada cuya resistencia al corte sin drenaje es 47.9 kPa. Se carga horizontalmente.

Se pide hallar la carga y las longitudes que marcan la frontera entre la formación de una rotula en el empotramiento y la formación de dos rotulas plásticas, una de ellas en el empotramiento y otra en la parte enterrada del pilote.

# Pilote en suelo cohesivo – pilote empotrado en cabeza

$H_u = 417 \text{ KN}$ ,  $L = 7.30 \text{ m}$  (dos rotulas plásticas)

$H_u = 280 \text{ KN}$ ,  $L = 2.65 \text{ m}$  (una rótula)