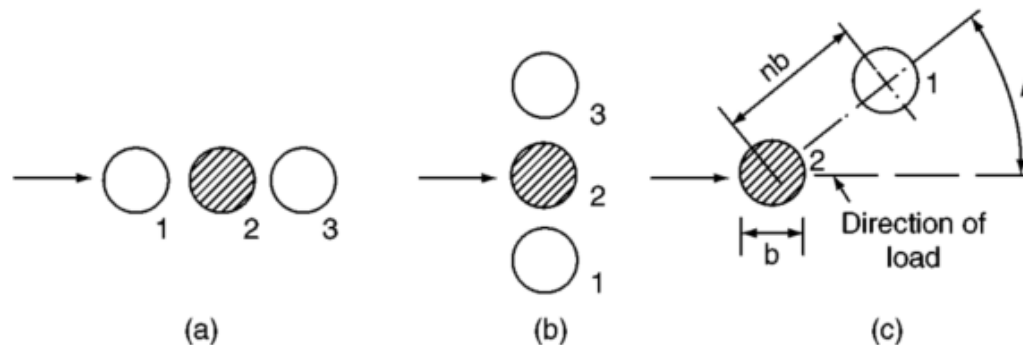


Contenido

- Determinación de la resistencia lateral última
- Estimación de deformaciones laterales
- **Comportamiento en grupo**
- Comportamiento torsional

Comportamiento en grupo

- Suponiendo que los pilotes están unidos en su coronamiento por un cabezal, su desplazamiento lateral en superficie es el mismo.
- La reducción de la eficiencia del conjunto de pilotes se obtiene a través de la reducción de p_{ult} que se traduce en la reducción de las curvas p-y.
- Distintas configuraciones de pilotes tienen distintos efectos



Comportamiento en grupo

Existen distintos métodos analíticos y empíricos para considerar el efecto grupo:

- Métodos basados en la teoría de la elasticidad (Poulos y derivados).
- Métodos suponiendo un único pilote ficticio.
- Coeficientes empíricos

Comportamiento en grupo

Poulos (1971): suelo lineal, homogéneo y elástico.

$$\rho_k = \overline{\rho_H} \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m H_j \alpha \rho_{H,kj} + H_k \right]$$

Donde:

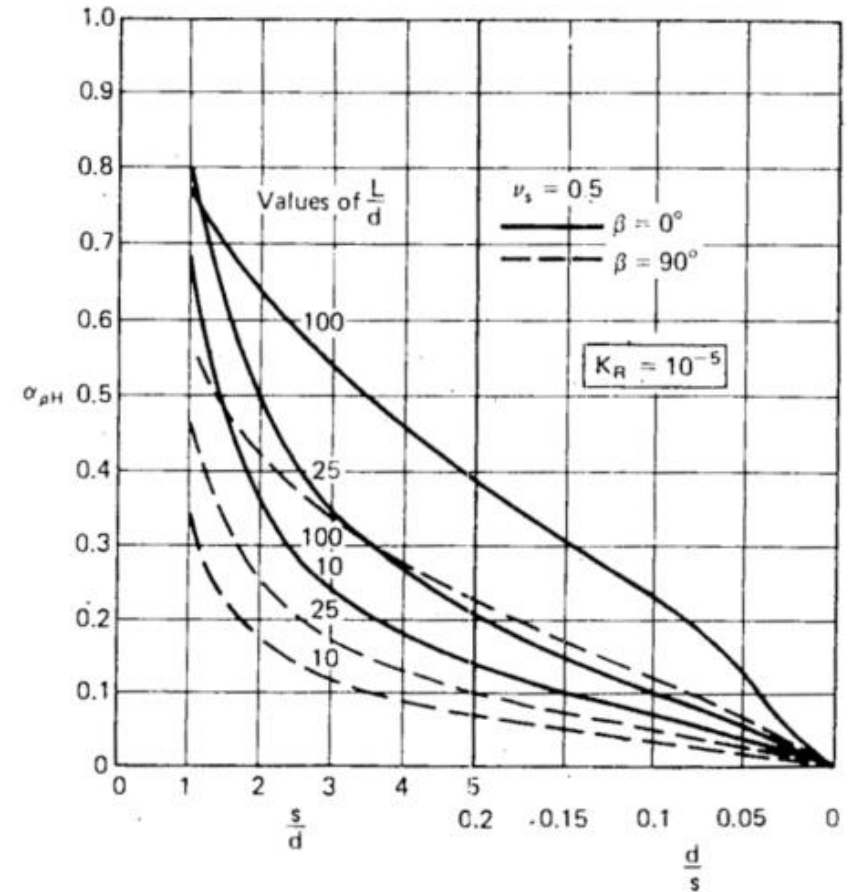
ρ_k : desplazamiento del pilote

$\overline{\rho_H}$: desplazamiento de referencia del pilote bajo carga unitaria

H_j : carga en los otros pilotes

$\alpha \rho_{H,kj}$: factor de influencia

H_j : carga en el pilote analizado



Ejemplo de ábaco de factores de influencia para 2 pilotes

Comportamiento en grupo

Focht & Kotch (1973)

$$\rho_k = \overline{\rho_H} \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m H_j \alpha \rho_{H,kj} + R H_k \right]$$

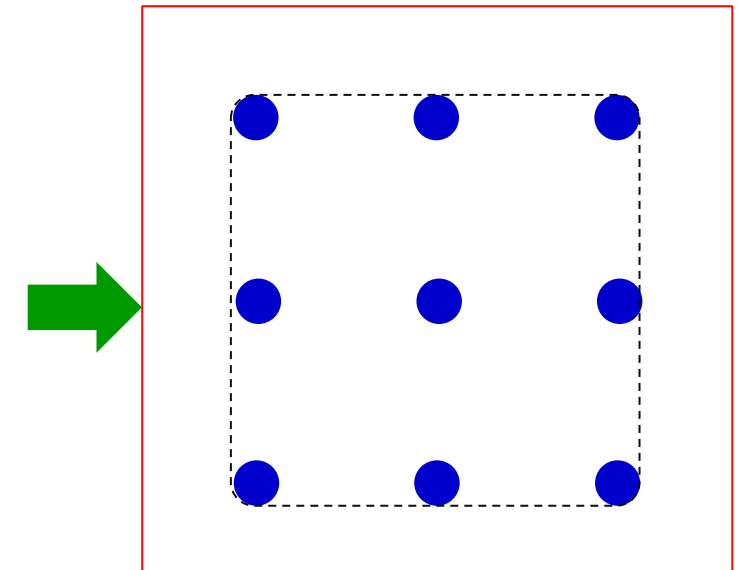
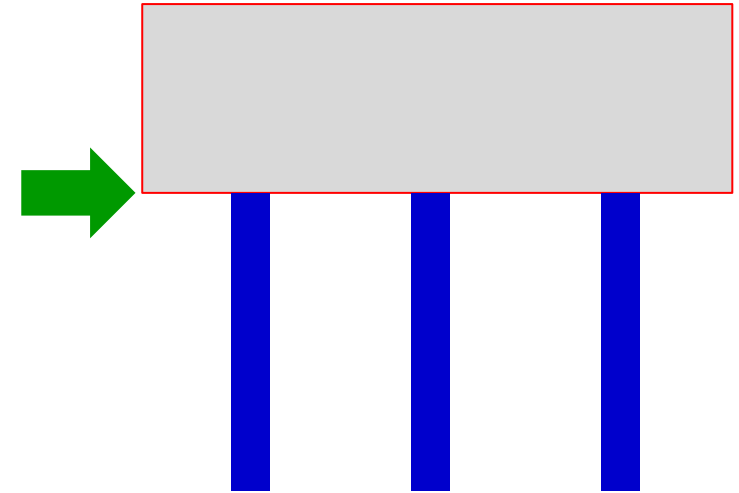
R es el ratio de la deformación del pilote en su cabeza calculado con el método p-y y la deformación calculada mediante el método analítico elástico de Poulos.

La ecuación se puede utilizar para resolver la deformación en grupo Y_G y buscar factores de que multipliquen las curvas p-y (nuevas curvas). Método iterativo.

Comportamiento en grupo

Pilote ficticio

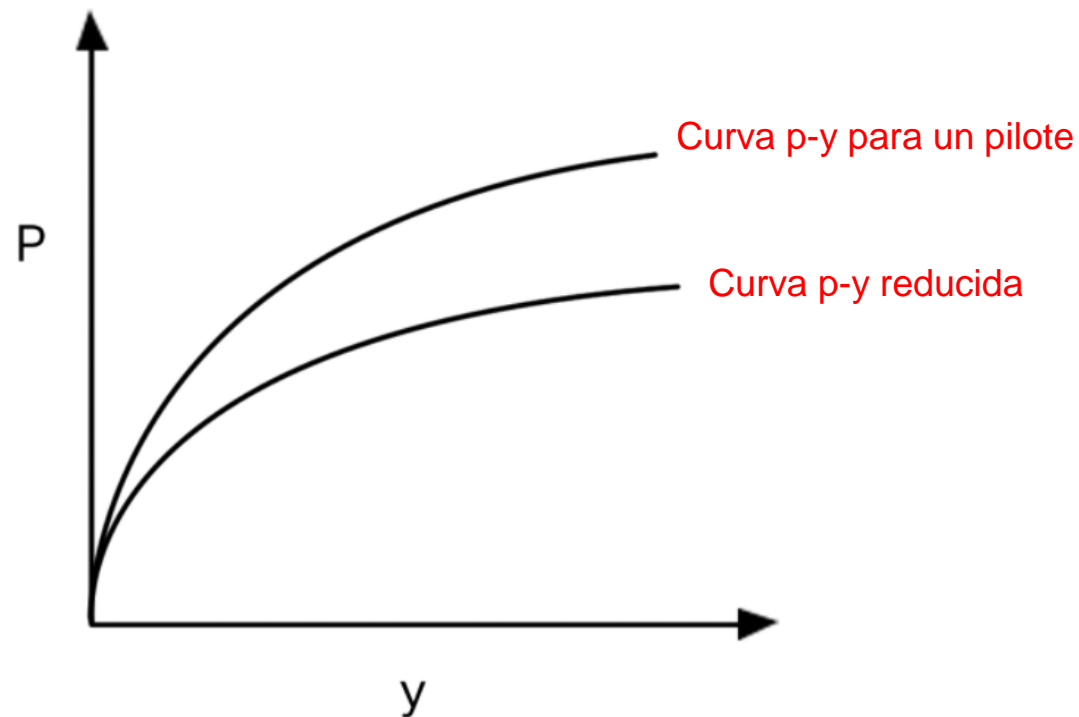
1. Se busca el perímetro que encierra al grupo de pilotes.
2. Se asume que esa longitud es el perímetro de un gran pilote circular y se calcula el diámetro.
3. Se asume que la rigidez del conjunto es la suma de las rigideces individuales de los pilotes.
4. Se realiza el análisis para el gran pilote imaginario y se distribuyen los esfuerzos en los pilotes individuales



Comportamiento en grupo

Métodos empíricos.

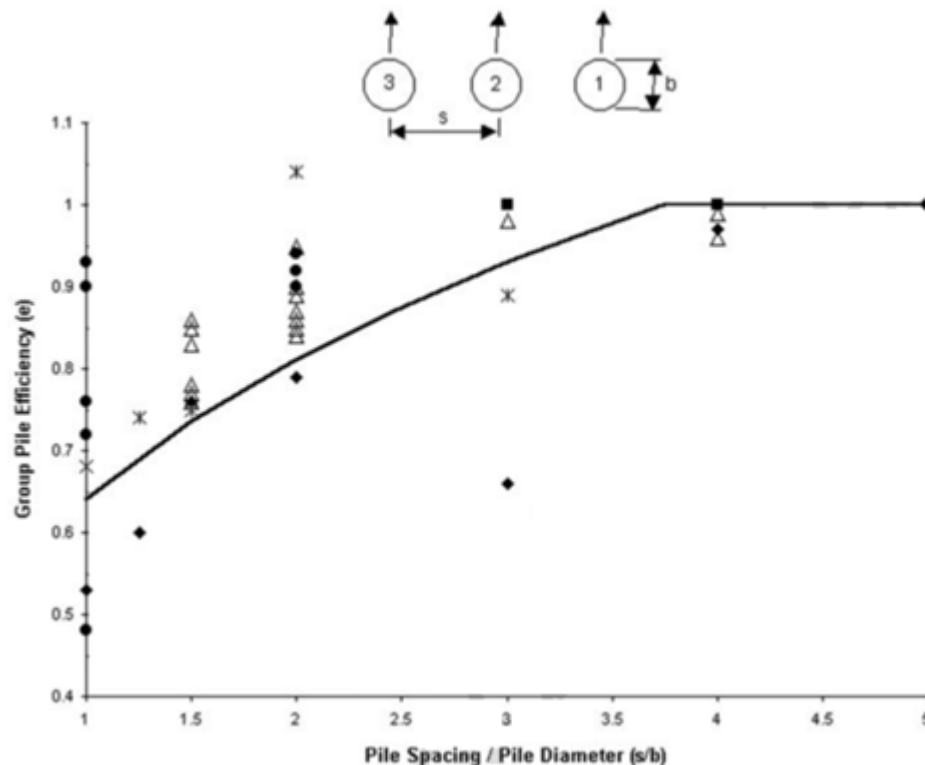
Se calculan coeficientes de minoración (f_m) que reducen la resistencia última del terreno.



Comportamiento en grupo

Métodos empíricos.

Grupos de pilotes con carga perpendicular al arreglo



$$e = 0.64 \left(\frac{s}{b} \right)^{0.34} \quad 1 \leq \frac{s}{b} < 3.75$$

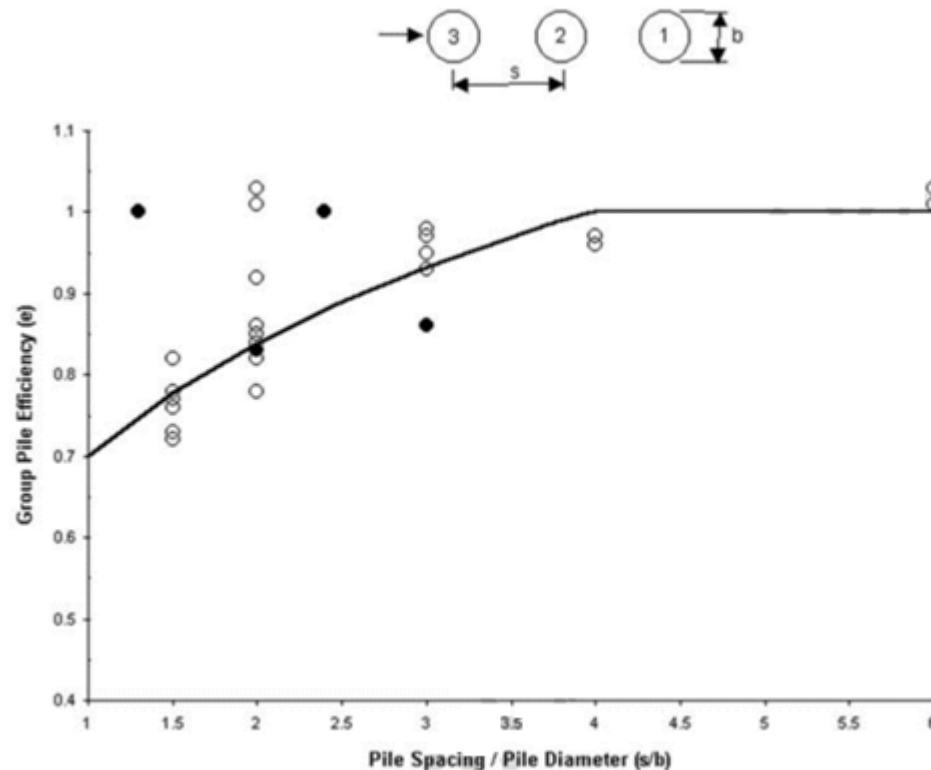
$$e = 1 \quad \frac{s}{b} \geq 3.75$$

Reese (2006)

Comportamiento en grupo

Métodos empíricos.

Grupos de pilotes con carga paralela al arreglo



$$e = 0.70 \left(\frac{s}{b} \right)^{0.26} \quad 1 \leq \frac{s}{b} < 4.0$$

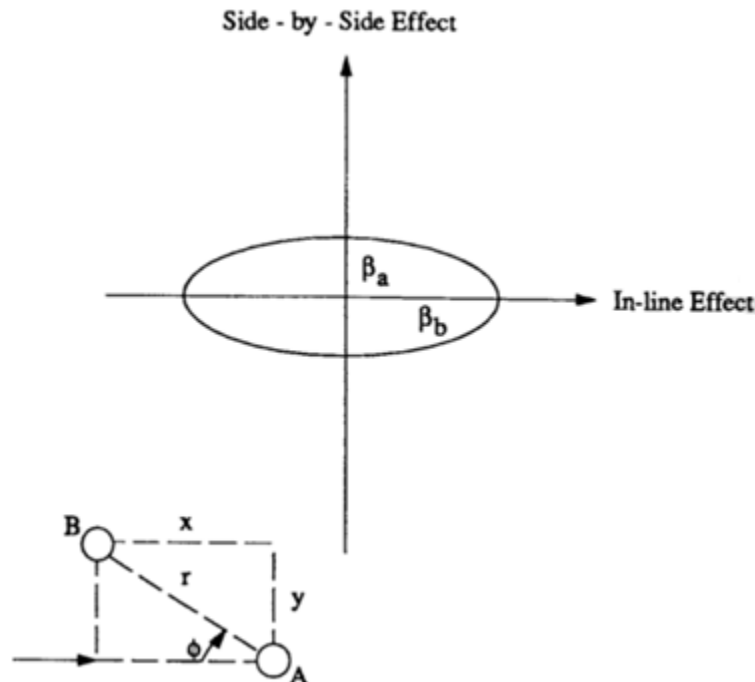
$$e = 1 \quad \frac{s}{b} \geq 4.0$$

Reese (2006)

Comportamiento en grupo

Métodos empíricos.

Grupos de pilotes con carga diagonal al arreglo



$$\beta_a = f\left(\frac{r}{b}\right) \quad \text{side-by-side effect}$$

$$\beta_b = f\left(\frac{r}{b}\right) \quad \text{in-line effect}$$

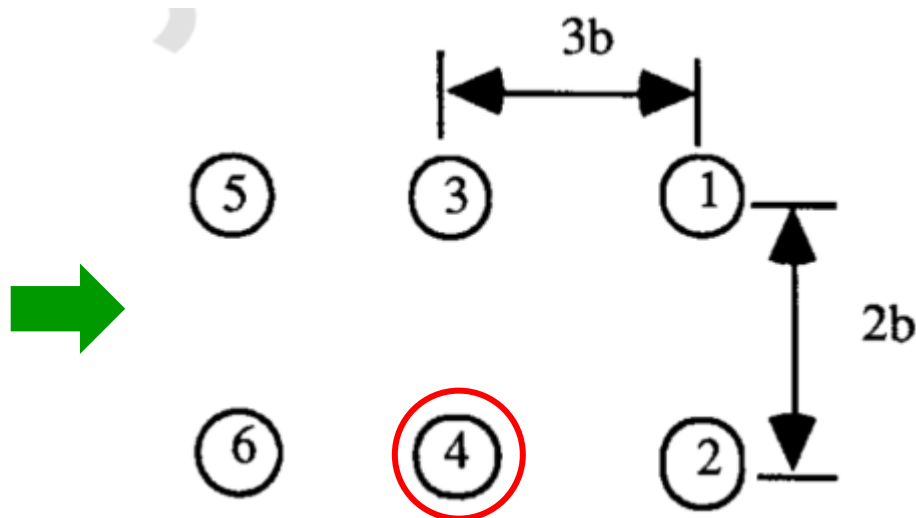
$$\beta_s = \sqrt{\beta_b^2 \cos^2(\phi) + \beta_a^2 \sin^2(\phi)}$$

Reese (2006)

Comportamiento en grupo

Métodos empíricos.

Arreglos combinados



$$\begin{aligned} f_{m4} = & \beta_{34} \quad (\text{side by side effect}) \\ & \times \beta_{24} \quad (\text{trailing effect}) \\ & \times \beta_{64} \quad (\text{leading effect}) \\ & \times \beta_{14} \quad (\text{skewed effect}) \\ & \times \beta_{54} \quad (\text{skewed effect}) \end{aligned}$$

Comportamiento en grupo

Otros métodos más simples afectando el módulo de reacción del suelo.

Canadian Foundation Engineering Manual (1978):

- Separación menor a 8 diámetros $\rightarrow 0.7$
- Separación menor a 4 diámetros $\rightarrow 0.4$
- Separación menor a 3 diámetros $\rightarrow 0.25$

Japan Road Association (1976):

Si los pilotes están separados por menos de 2.5 diámetros

$$m = 1 - 0.2 \left(2.5 - \frac{s}{b} \right)$$

Comportamiento en grupo

Distintos autores han propuesto, basándose en la teoría de la elasticidad, formas de considerar la separación y el ángulo entre pilotes.

- O'Neil (1983) – Group action in offshore piles
- Canadian Foundation Engineering Manual (1978) – Part III, Deep Foundations
- Japan Road Association (1976) – Road bridge substructure design guide and explanatory notes
- Bogard & Matlock (1983) – Procedures for analysis if laterally loaded pile groups in soft clay.
- Brown & Reese (1985) – Behavior of large-scale pile groups subjected to cyclic lateral loading
- Scott (1995) – Interaction factors for piles in groups subjected to lateral loading

Limitaciones del método p-y

- El suelo se modela con una serie de resortes no lineales (curvas p-y), por lo tanto no se modela explícitamente la naturaleza continua del suelo.
- Los resultados son muy sensibles a las curvas seleccionadas.
- Las curvas de la literatura son empíricas. Revisar la aplicabilidad para cada caso.
- La mayoría de las curvas solo dependen en el ancho del pilote.
- Las curvas no incorporan explícitamente la variación de la rigidez del pilote.
- Para casos cíclicos se cuenta con menos datos empíricos y por lo general son ensayos con pocos ciclos de carga

Contenido

- Determinación de la resistencia lateral última
- Estimación de deformaciones laterales
- Comportamiento en grupo
- **Comportamiento torsional**

Comportamiento torsional

Existe mucha menos investigación comparado con el comportamiento lateral y axial.

USACE recomienda algunas expresiones asumiendo:

- Comportamiento radial elástico lineal
- Medio homogéneo
- Pilote prismático y elástico lineal
- La resistencia del suelo solo depende de la deformación torsional en la interfaz pilote-suelo.

Comportamiento torsional

A partir de la teoría de la elasticidad, obtenemos la relación tensión-deformación

$$\tau_0 = 2G_s\theta$$

Donde

τ_0 : tensión de corte en la interfaz pilote-suelo

G_s : módulo de corte del suelo

θ : giro del pilote

Comportamiento torsional

Se mantiene la linealidad hasta que se llega a una tensión última τ_{ou} .

Arenas:

$$\tau_{ou} = K_0 \sigma_v \tan \delta$$

Arcillas:

$$\tau_{ou} = \alpha s_u$$

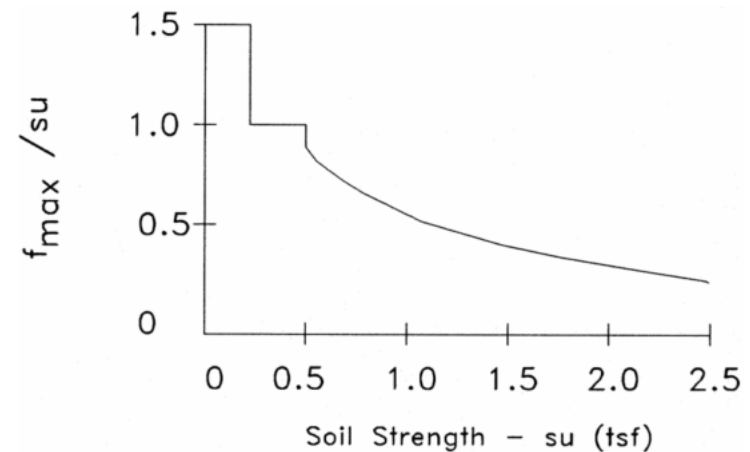
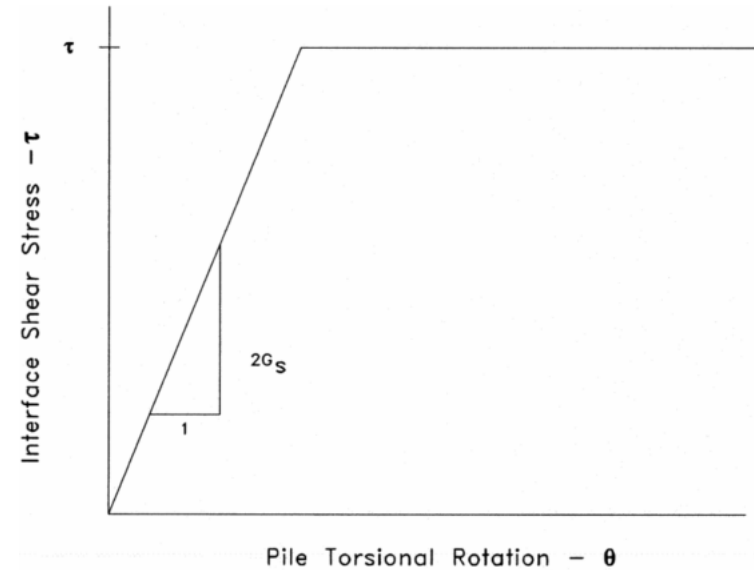
Donde

K_0 : coeficiente de empuje lateral en reposo.

δ : ángulo de fricción de la interfaz para arenas

α : factor de adhesión

s_u : resistencia al corte de la arcilla



Referencias

- Poulos, H. G. (1980) - Pile Foundation analysis and design.
- Reese L.C & Van Impte W. (2011) – Single piles and pile groups under lateral loading. CRC Press. Segunda edición.
- USACE – Theoretical Manual for Pile Foundations (2000).
- API (2002) – Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms – working stress design.
- Washington State Department of Transportation (1988) – Development of p-y curves for analysis of laterally loaded piles in Western Washington.
- Matlock H. (1970) – Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay.
- Reese L.C, Insenhower W.M, Wang S.T (2006) – Analysis and design of shallow and deep foundations
- Rocscience (2018) – Laterally loaded Piles

Software especializado

- COM624P y COM624G. Publicaciones por Reese de los códigos en FORTRAN (1984)
- ERCAP. Publicación por Poulos de los códigos en FORTRAN (1995)
- Rocscience RSPile. Análisis de pilotes con carga vertical y horizontal. Grupo de pilotes.
- Ensoft suite (LPile, Group, TZPile, etc). Empresa de software de Reese.
- Yong PYPile. Software gratuito. Pilotes simples.
<http://www.yongtechnology.com/pypile/>
- Pile Group Application. Código Abierto. Grupo de pilotes.
<https://simcenter.designsafe-ci.org/learning-tools/pile-group-tool/>

Ejercicio (Ensayo de Matlock 1970)

Matlock (1970) presentó los resultados de un ensayo de carga lateral empleando un pilote hincado tubular de acero. El tubo tenía 319mm de diámetro, con un espesor de pared de 12.7mm y una longitud de 12.8m. La rigidez flexional era de 28730kNm². El momento flector al que la fibra extrema alcanzaría la fluencia se computó como 231 kNm y el momento flector para la formación de una rótula plástica se computó como 304kNm.

El pilote se hincó en arcillas cerca del lago Austin, en Texas, EEUU. Las arcillas se encontraban levemente sobre consolidadas por desecación, levemente fisuradas y clasificadas como CH de acuerdo con el sistema unificado. La resistencia no drenada se midió in-situ con un ensayo de veleta de corte y se encontró que era casi constante a lo largo de toda la profundidad.

Ejercicio (Ensayo de Matlock 1970)

Luego del análisis de los ensayos se determinaron las resistencia no drenada en función de la profundidad que se muestran en la tabla. El valor de ε_{50} se obtuvo a partir de ensayos triaxiales, obteniéndose como promedio 0.012.

z (m)	ω (%)	cu (kPa)
0.00	29.00	30.20
1.14	33.5	32.2
1.14	33.5	42.3
3.39	50.10	17.50
3.70	49.60	30.10
4.30	48.30	23.40
5.69	46.10	51.80
7.25	54.50	29.80
9.47	55.50	32.60
15.00	-	32.60

Ejercicio (Ensayo de Matlock 1970)

El peso sumergido se determinó para varios puntos debajo del nivel de terreno y se obtuvo como promedio 10kN/m^3 . El nivel de agua se mantuvo por encima del nivel de terreno durante todo el ensayo. La carga se aplicó a 0.0635m sobre el nivel de terreno.

El pilote se instrumentó internamente, con separaciones pequeñas, con strain-gauges de resistencia eléctrica, para medir el momento flector. Cada incremento de carga se hizo con una separación en el tiempo que permitía una lectura precisa de las señales de los instrumentos.

Ejercicio (Ensayo de Matlock 1970)

Una carga lateral de 80.9kN produjo un momento flector máximo de aproximadamente la mitad de los 231kNm necesarios para producir la primera fluencia en el caño. En la siguiente tabla se muestra el momento flector en función de la profundidad obtenido experimentalmente.

M (kNm)	z (m)
23.67	0.32
43.16	0.64
60.62	0.95
75.43	1.26
87.32	1.58
96.07	1.89
99.95	2.11
102.03	2.46
105.76	2.66
101.48	3.08
96.71	3.31
88.35	3.65
76.41	4.00
58.45	4.55
32.64	5.13
22.15	5.49
7.67	6.13
0.01	6.73

Ejercicio (Ensayo de Matlock 1970)

En las siguientes tablas se muestran los resultados de máxima deflexión en la cabeza del pilote y máximo momento flector en función de la carga.

y (mm)	P (kN)
2.22	9.27
6.17	21.65
11.15	34.44
16.19	46.34
21.53	57.68
27.66	69.29
34.67	80.77
43.62	92.66
55.69	105.37

M (kNm)	P (kN)
12.80	10.44
26.89	21.57
43.08	34.08
58.06	45.83
72.28	58.21
88.07	70.30
106.11	82.26
124.47	93.18
150.12	105.34

Ejercicio (Ensayo de Matlock 1970)

Se pide:

1. Modelar el problema en PYPile (o software alternativo).
2. Estudiar los mismos casos de carga que en el ensayo. Generar gráficos comparativos entre los resultados obtenidos por el modelo y los del ensayo:
 - a. Carga lateral vs deflexión máxima
 - b. Carga lateral vs momento flector máximo
 - c. Distribución de momentos con la profundidad para la carga que produjo el momento máximo.