



CIMENTACIONES 74.11
GEOTECNIA APLICADA 94.09

<https://campus.fi.uba.ar/course/view.php?id=1171>

Pilotes con Carga Lateral y Momento



Repaso de comportamiento axil

Vimos que en el comportamiento axil, la resistencia del pilote está formada por la suma de la resistencia del fuste y la de la punta.

Se busca que los pilotes trabajen de manera aislada, sin interferir unos sobre otros ya que reducen el comportamiento del conjunto.

Las fundaciones profundas son más rígidas que las superficiales, pero los asentamientos igual existen, y pueden generar redistribución de cargas en la superestructura hiperestática.

El comportamiento general, tanto resistencia, rigidez y comportamiento del grupo, depende del método de instalación y el tipo del terreno.

Cuando tenemos sistemas de pilotes (cabezales) buscamos que transmitan en lo posible únicamente fuerzas axiales.

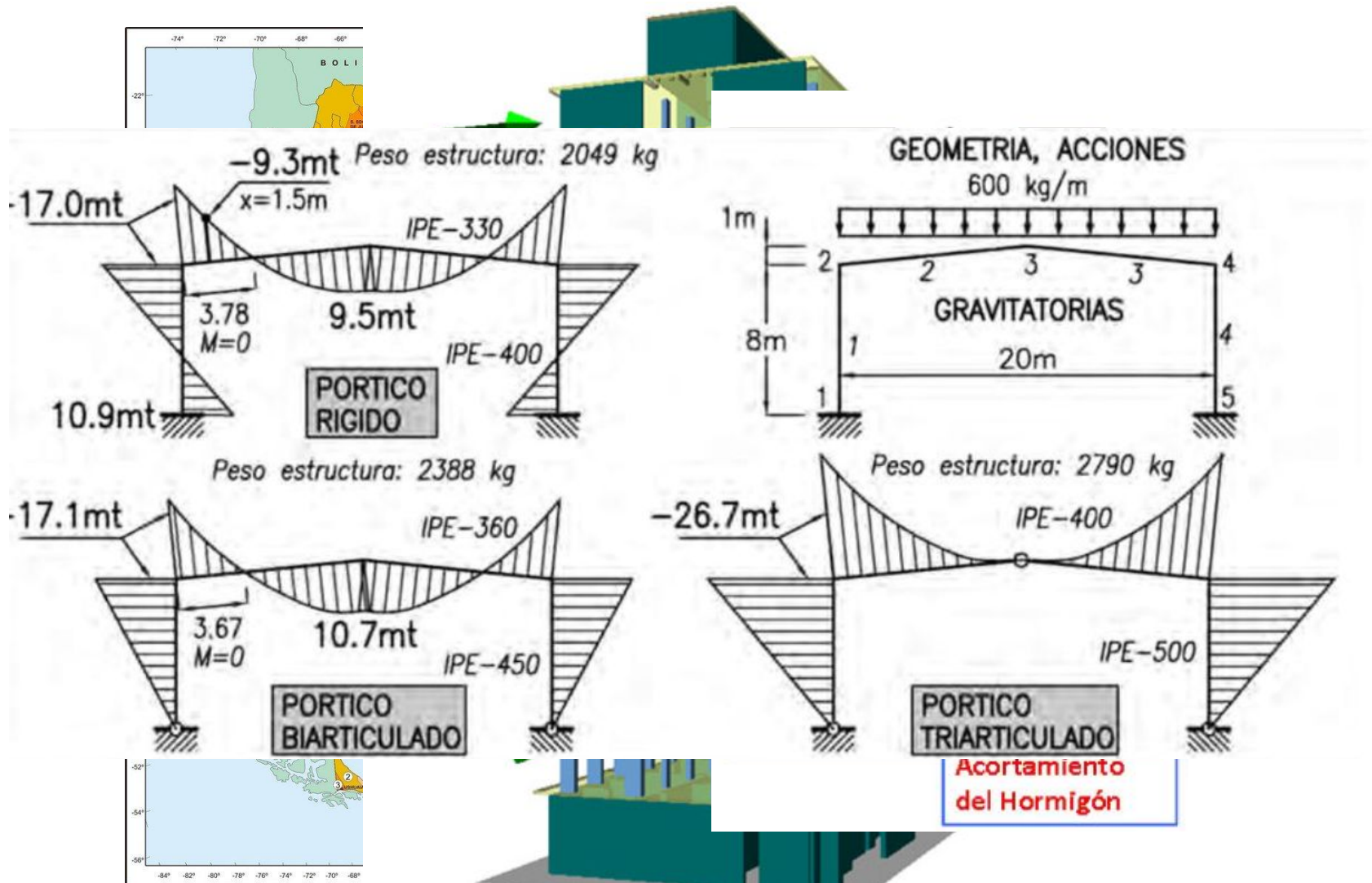


Comportamiento lateral de pilotes

El comportamiento generalmente no es a fuerza axial pura:

- Existen Cargas Horizontales que recibe la estructura, y siempre se transmiten a las fundaciones:
 - Viento
 - Cargas sísmicas
 - Frenado y Balanceo
 - Impacto de embarcaciones y vehículos
 - Tiros de cables y tensores
 - Empujes de Suelo
 - Empujes de Líquidos
- Los esquemas estáticos que pueden generar Momento y Corte en los apoyos, aunque no haya cargas horizontales superiores.
- Pueden aparecer cargas horizontales en el plano de fundación que carga y deforma los pilotes (Boussinesq, falla de corte, etc)

Comportamiento lateral de pilotes



Comportamiento lateral de pilotes

En los pilotes con carga axial se considera que fallan cuando se supera su capacidad admisible de:

- Punta y Fuste en pilotes comprimidos
- Fuste en pilotes traccionados

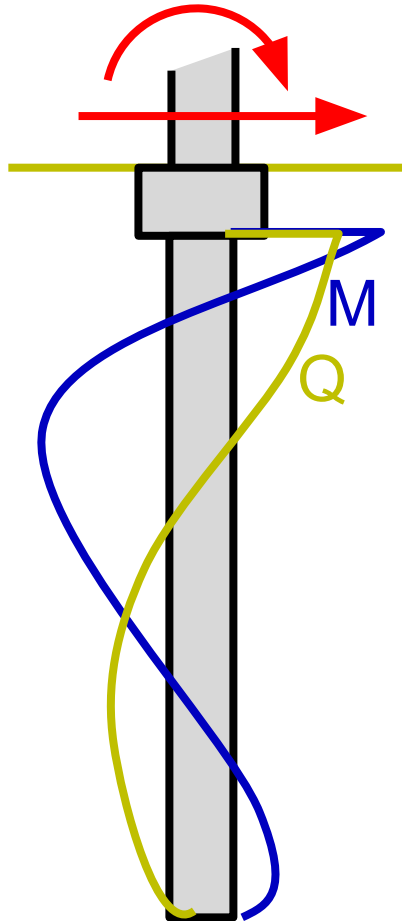
Pero, ¿y en los pilotes que tienen cargas horizontales y momentos?

Pilotes únicamente flexados □ **Verificaciones Horizontales**

Pilotes Flexo-comprimidos o Flexo-traccionados □ **Verificaciones Horizontales Y Capacidad Admisible**

Comportamiento lateral de pilotes

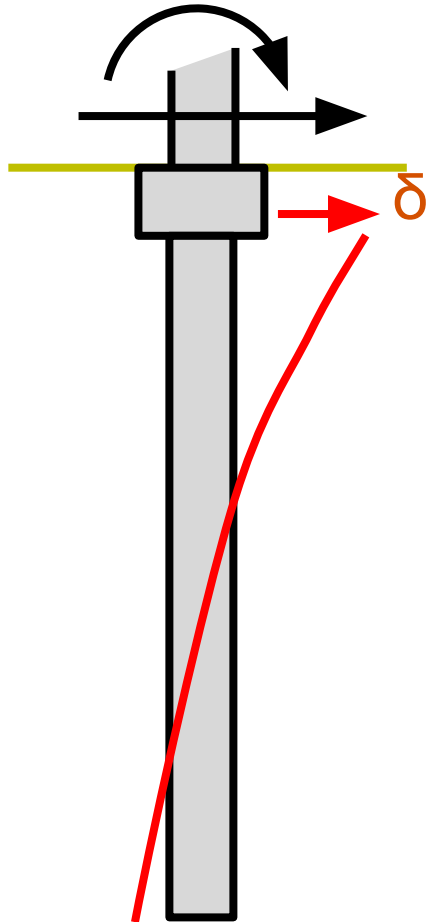
Las cargas horizontales y los momentos generan en los pilotes:



- Solicitaciones en el Pilote

Comportamiento lateral de pilotes

Las cargas horizontales y los momentos generan en los pilotes:

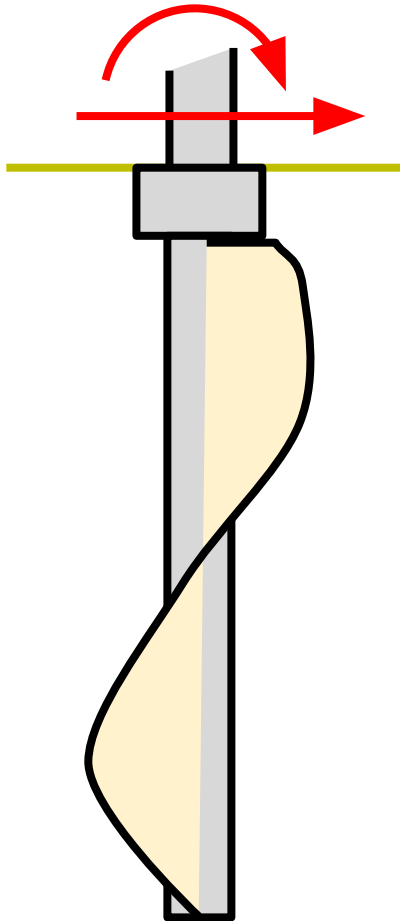


- Solicitaciones en el Pilote
- Deformación horizontal



Comportamiento lateral de pilotes

Las cargas horizontales y los momentos generan en los pilotes:



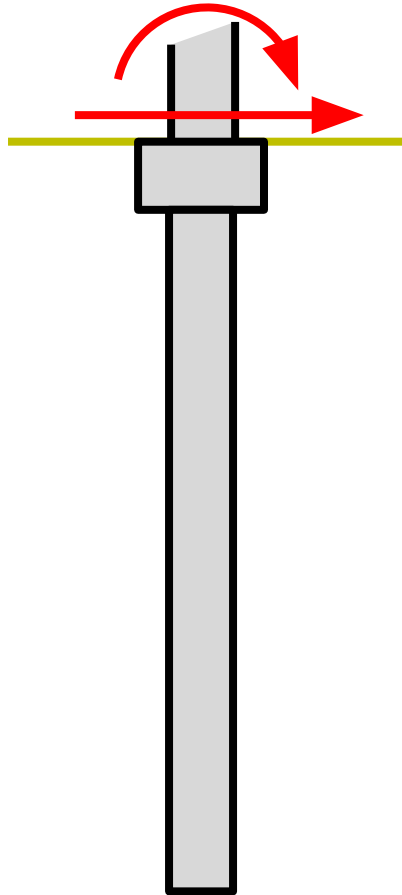
- Solicitaciones en el Pilote
- Deformación horizontal
- Tensiones horizontales en el terreno



Comportamiento lateral de pilotes

Se debe pasar del problema real a la modelación física para conocer el comportamiento.

Se deben adoptar simplificaciones y modelar:



Cómo se comportan las cargas:

- Cargas estáticas o dinámicas
- Valores fijos o hay interacción terreno - estructura
- Cargas en posición inicial o deformada.

Cómo se comportan las estructura:

- Material Isotropo Homogeneo
- Elástico ideal o Elastoplástico

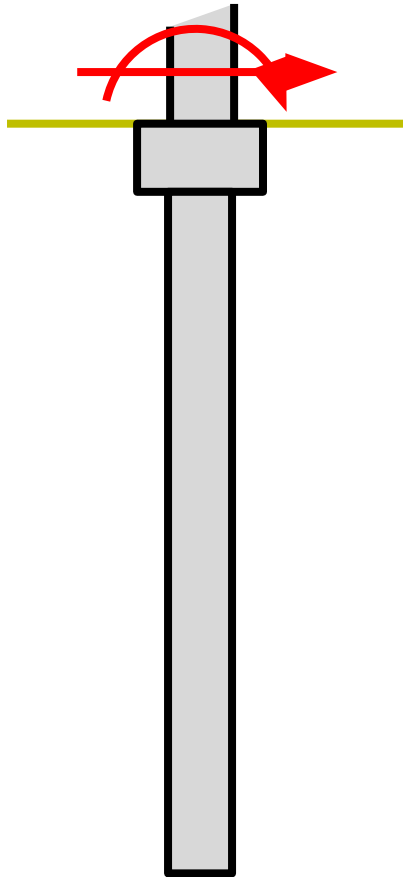
Cómo se comporta el medio (suelo):

- Uniforme o Estratificado
- Presencia de Napa
- Cohesivo o Granular



Comportamiento lateral de pilotes

El sistema tiene gran complejidad, muchas incógnitas e incertidumbre.



Se plantean análisis mediante:

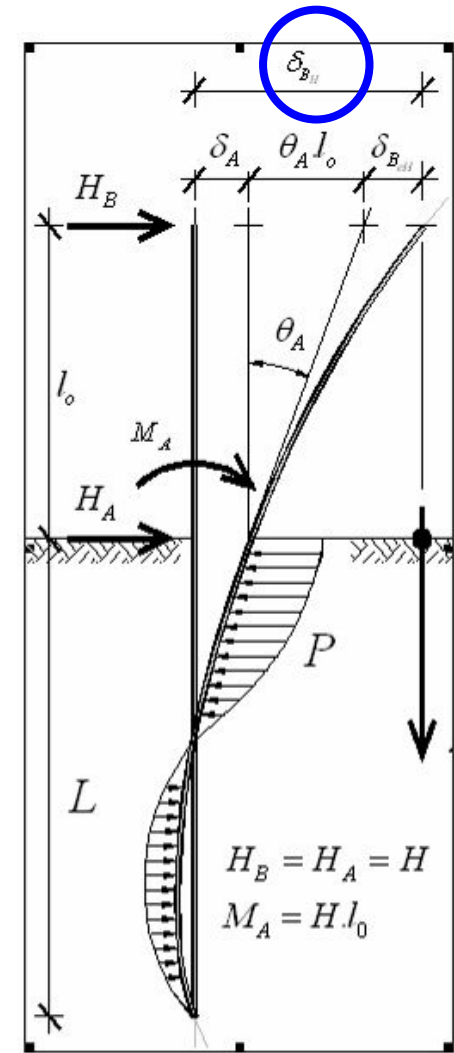
- Aproximaciones simplificadas (Sulzberger, Broms)
- Métodos basados en la teoría de elasticidad
- Métodos p-y (lineales o no lineales)
- Método de Elementos Finitos (unidireccionales o espaciales)
- Método de Diferencias Finitas

Incognitas del problema

1. Flecha en el extremo superior:

Deformación horizontal.

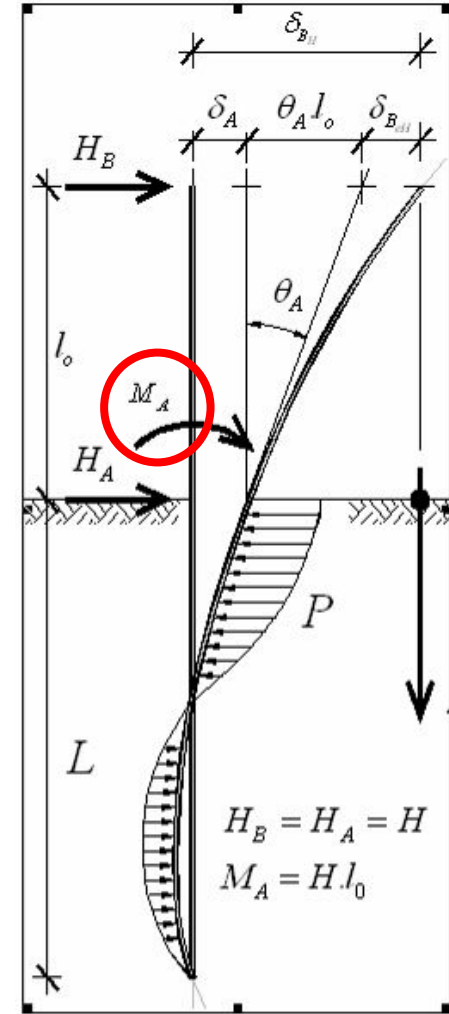
Valores límites en función de la superestructura (materiales, uso, importancia, vida útil).



Matlock & Reese (1961)

Incognitas del problema

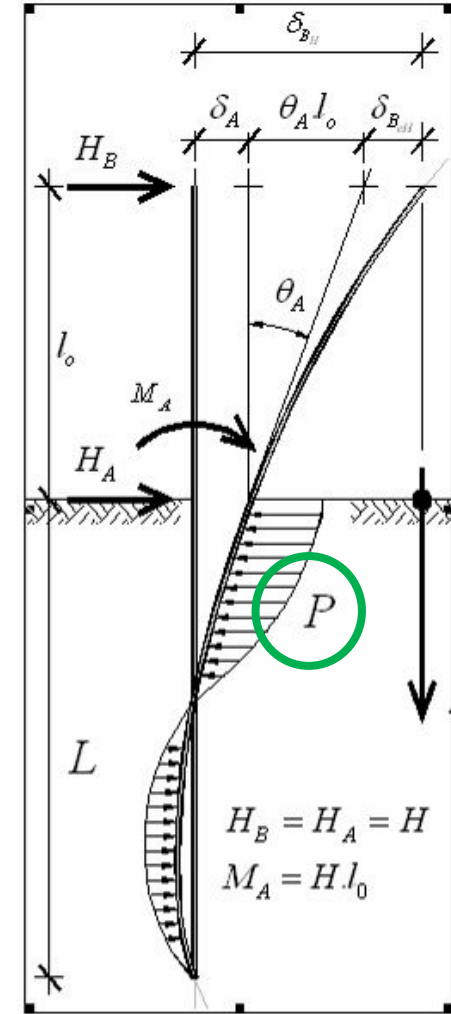
1. Flecha en el extremo superior
2. Esfuerzos Máximos:
Dimensionamiento estructural.
La sección del pilote debe
verificar a Flexo-compression y
Corte



Matlock & Reese (1961)

Incognitas del problema

1. Flecha en el extremo superior
2. Esfuerzos Máximos
3. Presión de contacto: Verificación de presión de contacto con la Resistencia pasiva del suelo



Matlock & Reese (1961)



Método de Sulzberger

El método se realizó de manera experimental para postes de líneas eléctricas, donde las fundaciones son cortas y soportan los tiros de los cables. Se adapta a diferentes geometrías

Considera que el macizo rota como cuerpo rígido alrededor de $2/3$ de profundidad, y por tratarse de pequeños desplazamientos, el suelo se comporta de manera elástica.

El momento externo de vuelco es resistido por el momento de la base y el momento por la presión pasiva del suelo.

Considera proporcionalidad entre el desplazamiento horizontal y la fuerza resistente, mediante el coeficiente de compresibilidad del terreno, que se obtiene de ensayos o tablas, y varía linealmente con la profundidad.



Método de Broms

El método de Broms, presentado en 1964, resuelve la ecuación diferencial de la elástica del pilote realizando una serie de simplificaciones, dividiendo los casos según el tipo de suelo, la longitud relativa, y la condición de borde en el extremo superior (empotrada o libre). Considera dos modos de fallo: por falla del suelo al superar la resistencia pasiva, o falla del pilote por formación de rótula plástica o rotura.

El suelo es considerado uniforme, horizontal, sin estratos ni presencia de napa freática, y se divide en 2 tipos

- Cohesivos: Distribución de presión uniforme en casi toda su longitud exceptuando el extremo superior con resistencia nula.
- Granulares: La presión es proporcional a la profundidad, donde la resistencia última es 3 veces la presión pasiva de Rankine.

El método es aplicable únicamente para cargas menores a la mitad de la carga última

Método de Broms

Para tipificar la longitud relativa del pilote se compara la longitud enterrada con un parámetro obtenido de la resolución de la ec. diferencial:

En suelos cohesivos:
$$R = \sqrt[4]{\frac{E J}{k_h B}}$$

En suelos friccionales:
$$T = \sqrt[5]{\frac{E J}{n_h}}$$

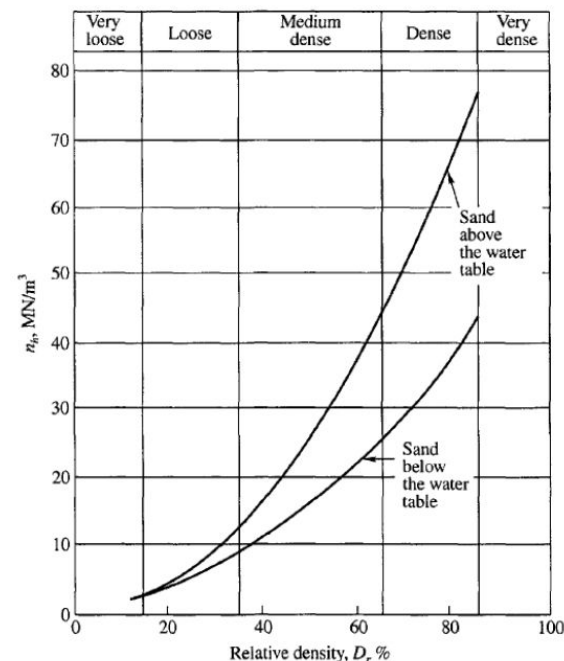
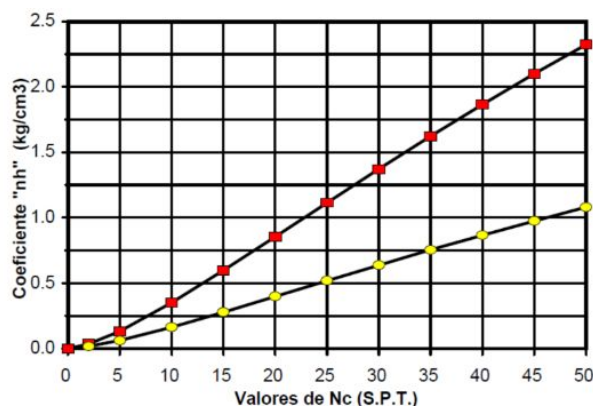
Pilote corto: $L/T \leq 2$ o $L/R \geq 2$

Pilote intermedio Entre ambos casos

Pilote largo: $L/T \geq 4$ o $L/R \geq 3.5$

a) n_h Según Terzaghi (1955)

VALORES DE n_h EN SUELOS GRANULARES		
COMPACIDAD DEL SUELO	n_h en kN/m^3	
	Sobre el Nivel Freático	Bajo el Nivel Freático
Suelta	1900	1086
Media	8143	5429
Densa	17644	10857

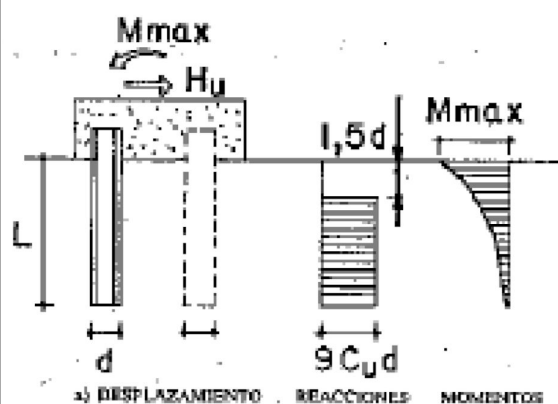


7-7 Variación de n_h con la densidad relativa de arenas (Reese, 1975)

Método de Broms

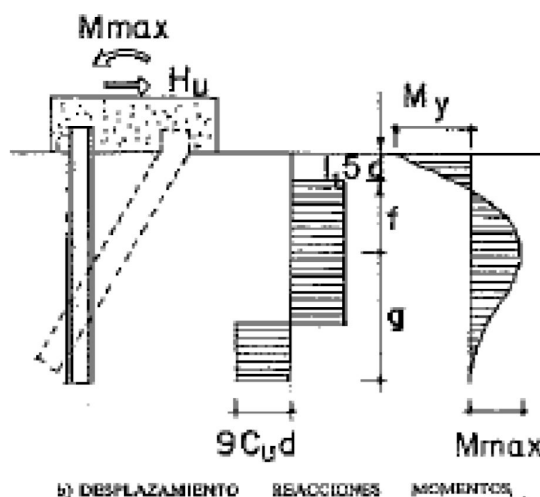
Suelos Cohesivos - Empotrados

CORTO



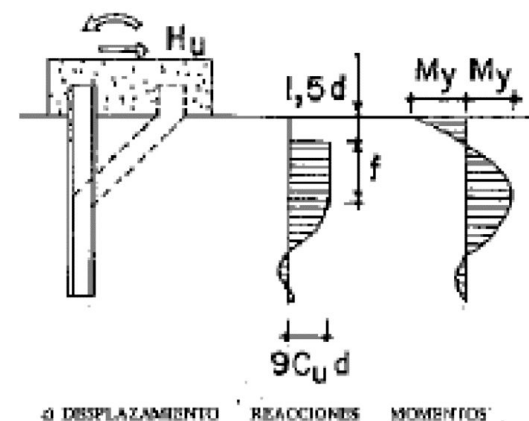
Cuerpo rígido

INTERMEDIO



Rótula en
empotramiento

LARGO

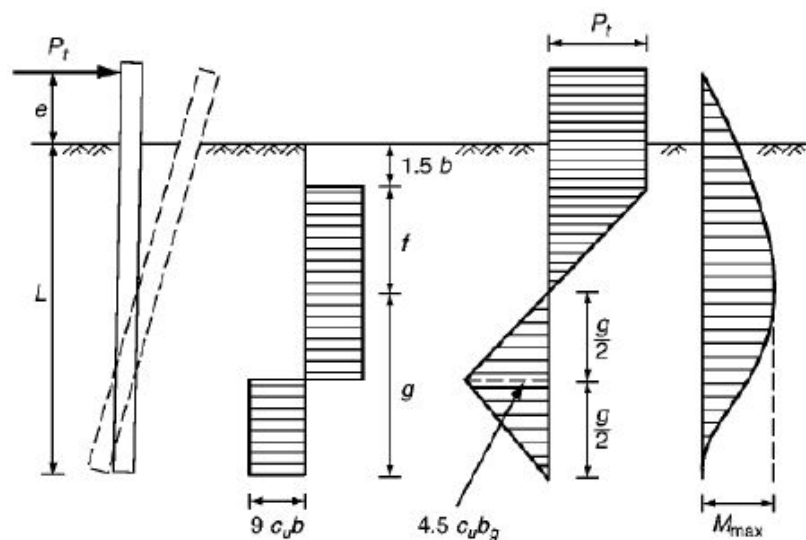


Rótula en
empotramiento y
tramo

Método de Broms

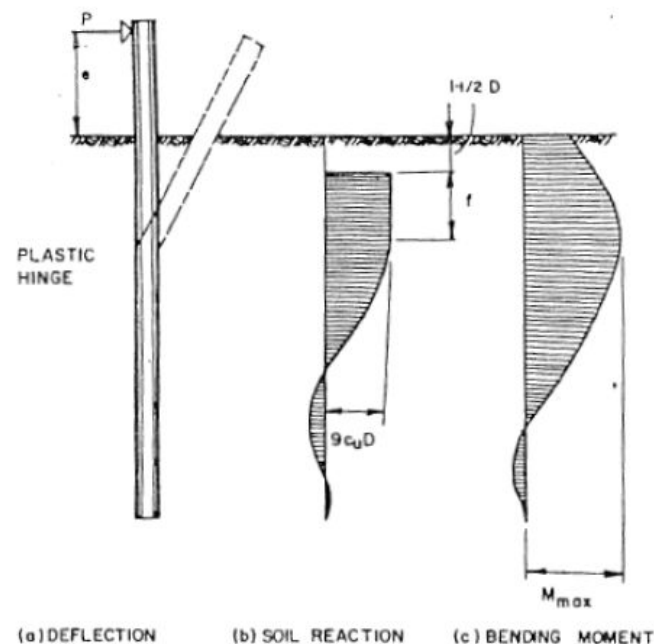
Suelos Cohesivos - Articulados

CORTO



Cuerpo rígido

LARGO

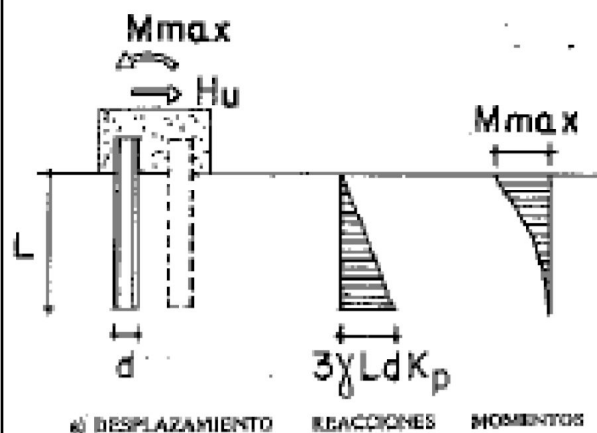


Rótula en tramo

Método de Broms

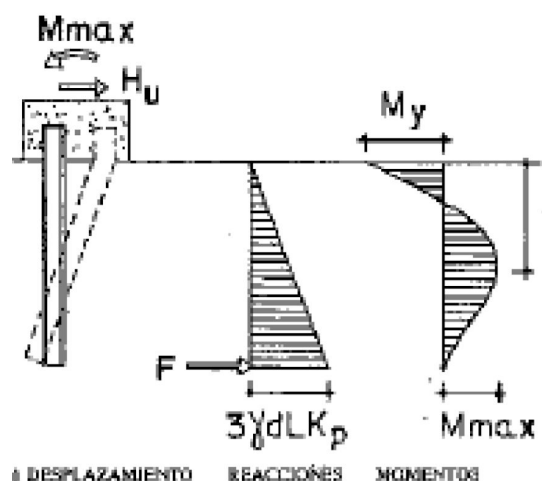
Suelos Granulares - Empotrados

CORTO



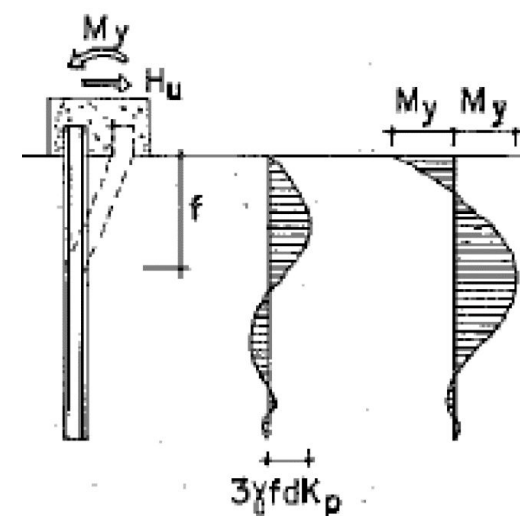
Cuerpo rígido

INTERMEDIO



Rótula en
empotramiento

LARGO

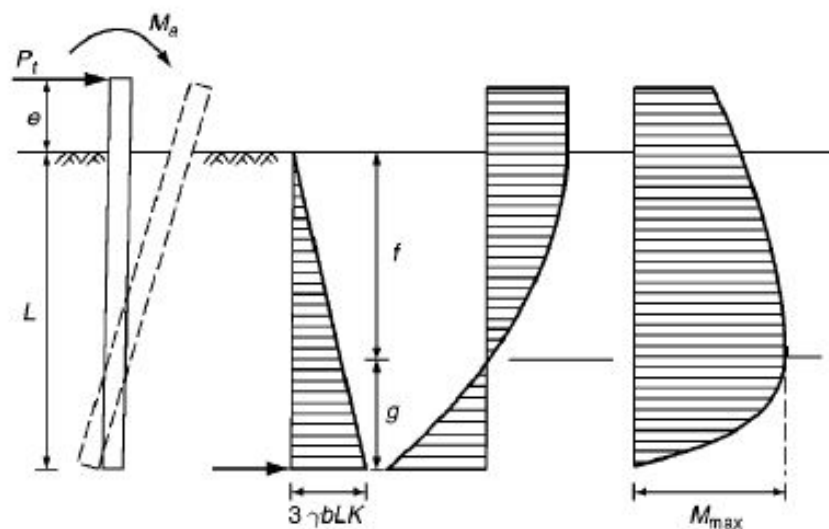


Rótula en
empotramiento y
tramo

Método de Broms

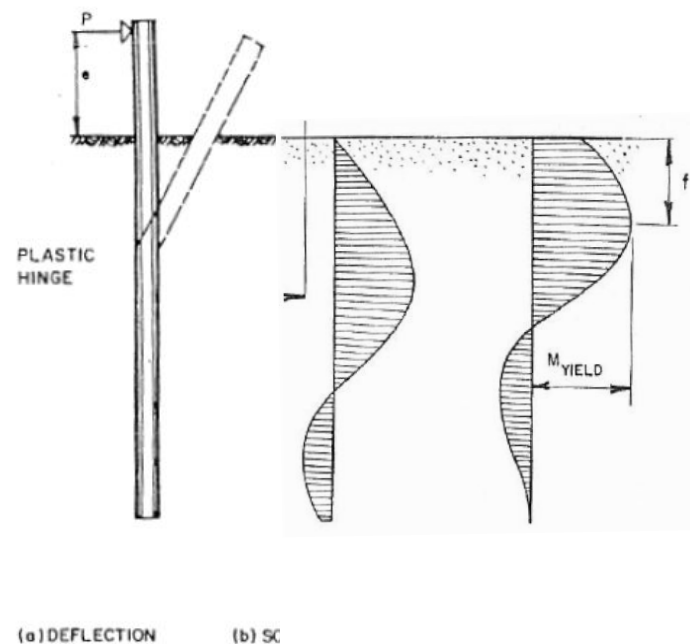
Suelos Granulares - Articulados

CORTO



Cuerpo rígido

LARGO



Rótula en tramo



Método con Teoría de Elasticidad

Poulos presentó en 1971 un método basado en la solución de la elástica considerando un semi-espacio elástico infinito, homogéneo e isotropo, modelando el pilote como una tira vertical que recibe presiones constantes en su ancho.

Rechazaba la hipótesis de Winkler por utilizar resortes independientes y se basó en la ecuación de Mindlin.

El método tiene como limitante que sólo se puede aplicar a materiales linealmente elásticos, mientras que la hipótesis de Winkler y los métodos p-y permiten terrenos con coeficiente de balasto variable. Debido a la varibalidad del terreno, es difícil obtener un único valor de módulo de elasticidad o Poisson.

Vesic comparó resultados de ambos métodos y demostró que las diferencias no son significativas en el rango de aplicabilidad.



Métodos p-y

Se resuelven mediante la Hipótesis de Winkler y la Ecuación Diferencial de la Elástica.

Hipótesis utilizadas:

- Pequeños Desplazamientos
- Cargas aplicación lenta
- Pilote Isótropo y Elástico
- Hipótesis de Navier: Secciones continúan planas
- Desprecia derivadas de segundo orden

$$M = EJ \frac{d^2 \delta}{dz^2} \quad p = f(\delta) = \frac{d^2 M}{dz^2}$$

$$EJ \frac{d^4 \delta}{dz^4} + f(\delta, z) = 0$$

Se equilibra con las condiciones de borde: M_L , Q_L , M_0 , Q_0 , Θ_0

Análisis mediante resortes Winkler lineales

Coeficiente de balasto

Balasto vertical: $k_v = \chi E / B$

Balasto horizontal: $k_h = k_v / 1.5$

Suelos cohesivos: $\chi = 1.50$

Suelos friccionales: $\chi = 0.70$

Modulo de deformación:

En suelos cohesivos: $E = cte$

En suelos friccionales: $E \neq cte$



Análisis mediante resortes Winkler lineales

Coeficiente de balasto horizontal (Vesic 1961)

$$k_h = \frac{0.65}{D} \sqrt[12]{\frac{E_{50} D^4}{E_p J_p} \frac{E_{50}}{1 - \nu^2}}$$

En arenas: $E_{50} \cong 0.65 G_0$ (Función de la presión)

En arcillas NC: $E_{50} \cong 25 \sigma_v'$

En arcillas PC: $E_{50} \cong 150 s_u$

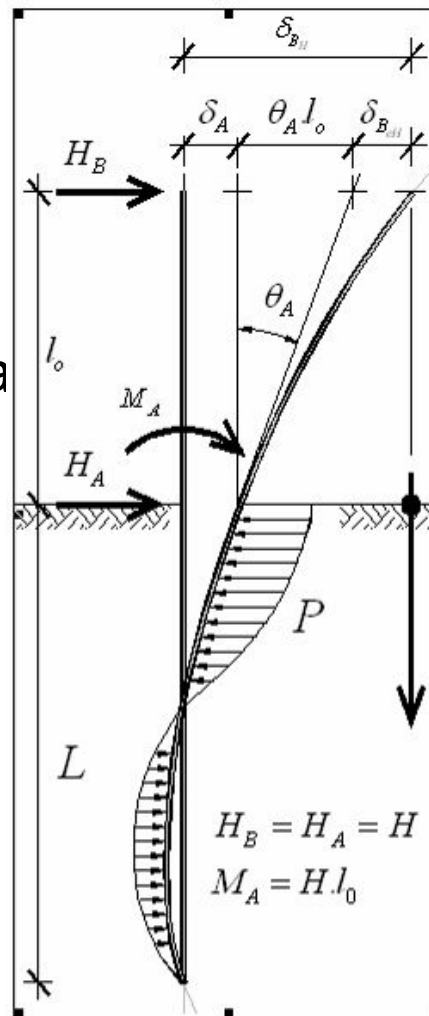
El módulo de reacción horizontal de un grupo de pilotes también se reduce en función de la separación entre

pilotes y de la cantidad de pilotes (Bresler 1964)

Análisis mediante resortes Winkler lineales

Matlock & Reese desarrollaron en 1960 un método aplicando el principio de superposición para suelo granular con coeficientes en función de la profundidad y el factor de flexibilidad relativa.

Davisson & Gill desarrollaron fórmulas similares para pilotes hincados en suelos cohesivos en 1963



$$\phi_e = 1.25m$$

$$t = 0.5in = 1.27cm$$

$$EJ = 2000MN \cdot m^2$$

$$n_h = 0.5MN/m^3$$

$$T = \sqrt[3]{EJ/n_h} = 5.25m$$

$$H_A = 125KN$$

$$M_A = 1.25MNm$$

$$\delta_A = \alpha_H \frac{HT^3}{EJ} + \alpha_M \frac{MT^2}{EJ} = 0.05m$$

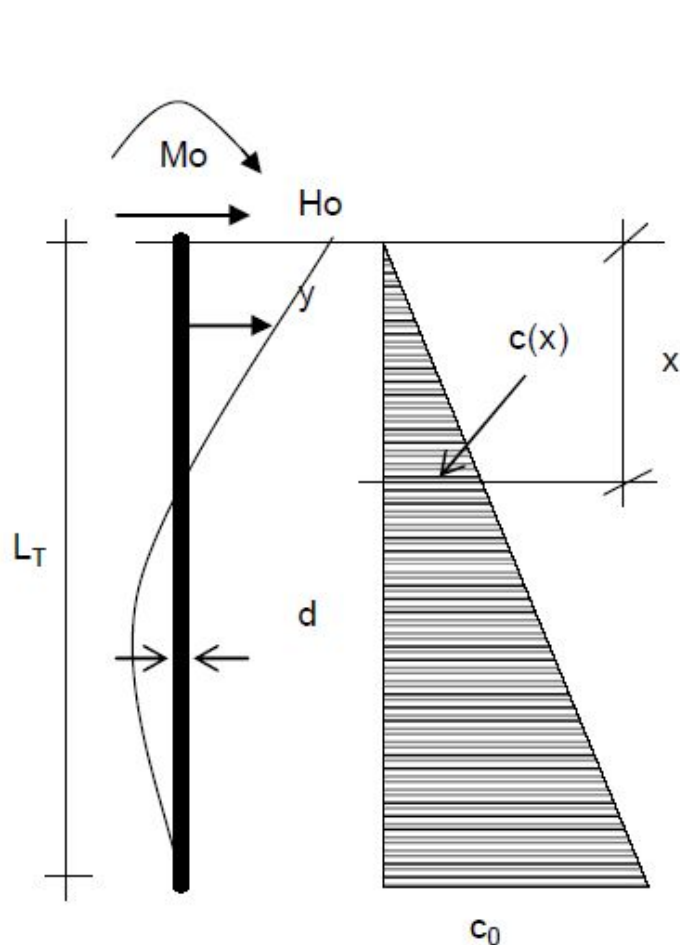
$$\theta_A = \beta_H \frac{HT^2}{EJ} + \beta_M \frac{MT}{EJ} = 8.54 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_B = \delta_A + \theta_A l_0 + \frac{Hl_0^3}{3EJ} = 0.156m$$

$$n_h = \frac{19EJ}{\left(\sqrt[3]{\frac{3EJ}{H}} \delta_B - l_0\right)^5}$$

Matlock & Reese (1961)

Suelos Granulares: balasto con variación lineal



$$C(x) = C_o \cdot \frac{x}{L_t}$$

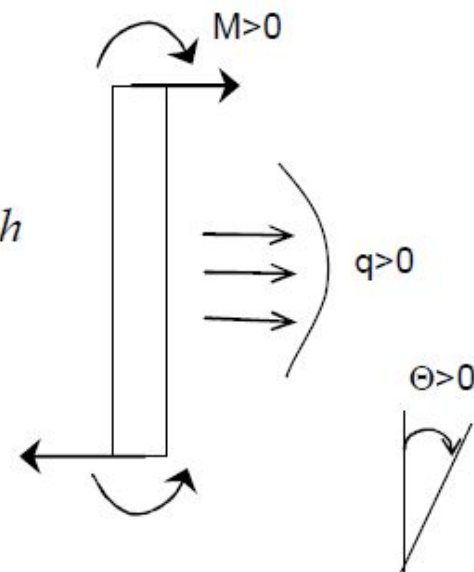
$$k = C_o \cdot \frac{d}{L_t} \leq nh$$

d = diámetro o ancho

$$T = \sqrt[5]{\frac{E \cdot J}{nh}}$$

FORMULAS

$T^5 = EJ / nh$
$x = Z * T$
$y = A_Y * (H_o * T^3) / EJ + B_Y * (M_o * T^2) / EJ$
$\Theta = A_S * (H_o * T^2) / EJ + B_S * (M_o * T) / EJ$
$M = A_M * H_o * T + B_M * M_o$
$Q = A_V * H_o + B_V * M / T$
$q = p * \delta = A_p * H_o / T + B_p * M_o / T^2$



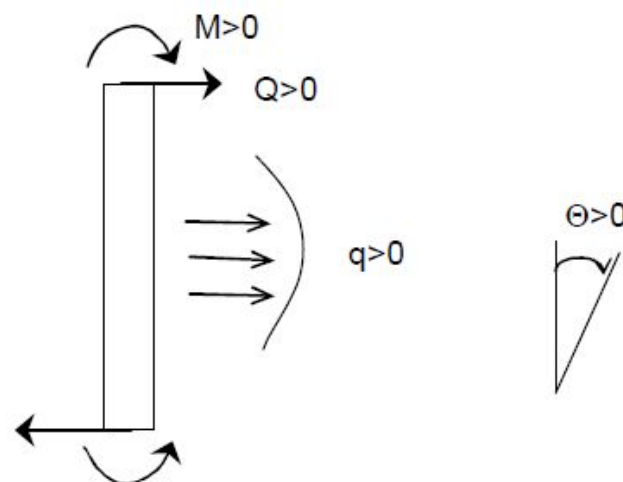
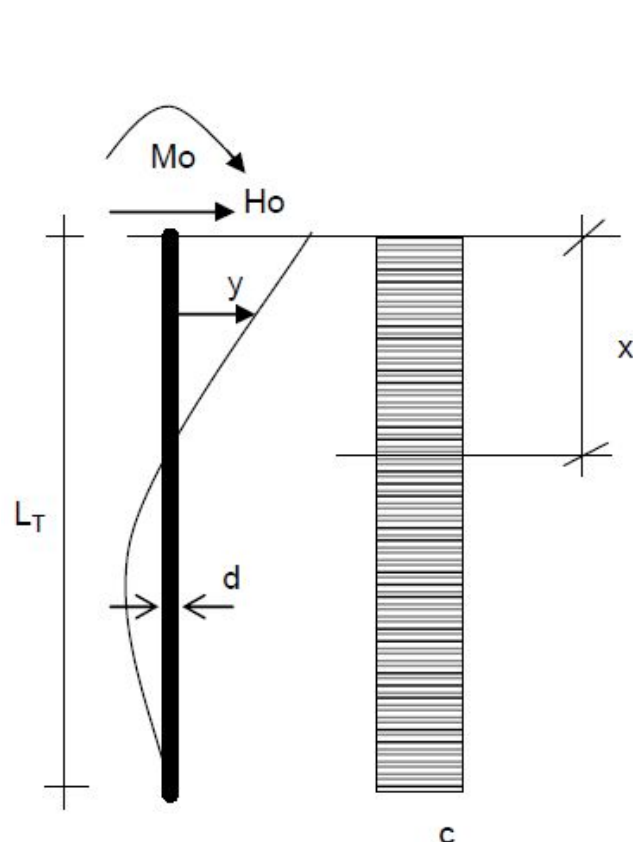


Suelos Granulares: balasto con variación lineal

z	A _Y	A _S	A _M	A _V	A _p	B _Y	B _S	B _M	B _V	B _p
0,00	2,435	-1,623	0,000	1,000	0,000	1,623	-1,750	1,000	0,000	0,000
0,10	2,273	-1,618	0,100	0,989	-0,227	1,453	-1,650	1,000	-0,007	-0,145
0,20	2,112	-1,603	0,198	0,966	-0,422	1,293	-1,550	0,999	-0,028	-0,259
0,30	1,852	-1,578	0,291	0,906	-0,586	1,143	-1,450	0,994	-0,058	-0,343
0,40	1,796	-1,545	0,399	0,840	-0,718	1,003	-1,351	0,987	-0,095	-0,401
0,50	1,644	-1,503	0,459	0,769	-0,822	0,873	-1,253	0,976	-0,137	-0,436
0,60	1,496	-1,454	0,532	0,677	-0,897	0,752	-1,156	0,960	-0,181	-0,451
0,70	1,353	-1,347	0,595	0,585	-0,947	0,642	-1,061	0,939	-0,226	-0,449
0,80	1,216	-1,335	0,649	0,489	-0,973	0,540	-0,968	0,914	-0,270	-0,432
0,90	1,026	-1,268	0,693	0,392	-0,999	0,448	-0,878	0,885	-0,312	-0,403
1,00	0,964	-1,197	0,727	0,295	-0,962	0,364	-0,792	0,852	-0,350	-0,364
1,20	0,788	-1,047	0,767	0,109	-0,885	0,223	-0,629	0,775	-0,414	-0,268
1,40	0,544	-0,893	0,772	-0,056	-0,761	0,112	-0,482	0,688	-0,456	-0,157
1,60	0,381	-0,741	0,746	-0,193	-0,609	0,029	-0,354	0,594	-0,477	-0,047
1,80	0,247	-0,596	0,696	-0,298	-0,445	-0,030	-0,245	0,498	-0,476	-0,034
2,00	0,142	-0,464	0,628	-0,311	-0,283	-0,070	-0,155	0,404	-0,456	0,140
3,00	-0,075	-0,040	0,223	-0,349	0,226	-0,089	0,057	0,059	-0,213	0,268
4,00	-0,050	0,052	0,000	-0,406	0,201	-0,028	0,049	-0,042	0,017	0,112
5,00	-0,009	0,020	-0,033	-0,513	0,046	0,000	0,011	-0,026	0,029	-0,002

(Matlock y Reese)

Suelos Cohesivos: balasto uniforme



FORMULAS

$$R = \sqrt[4]{\frac{E \cdot J}{k h \cdot d}}$$

$R^4 = 4 \cdot EJ / d k h$	
$x = Z \cdot R$	$Z = x / R$
$y = A_Y \cdot (H_o \cdot R^3) / EJ + B_Y \cdot (M_o \cdot R^2) / EJ$	
$\Theta = A_S \cdot (H_o \cdot R^2) / EJ + B_S \cdot (M_o \cdot R) / EJ$	
$M = A_M \cdot H_o \cdot R + B_M \cdot M_o$	
$Q = A_V \cdot H_o + B_V \cdot M / R$	
$q = p \cdot \delta = A_p \cdot H_o / R + B_p \cdot M_o / R^2$	



Suelos Cohesivos: balasto uniforme

z	A _Y	A _S	A _M	A _V	A _p	B _Y	B _S	B _M	B _V	B _p
0,00	0,500	0,500	0,000	1,000	2,000	0,500	1,000	1,000	0,000	2,000
0,10	0,450	0,495	0,090	0,810	1,801	0,405	0,900	0,991	-0,181	1,628
0,20	0,401	0,483	0,163	0,640	1,605	0,320	0,802	0,965	-0,325	1,283
0,30	0,354	0,463	0,219	0,487	1,415	0,244	0,706	0,927	-0,458	0,998
0,40	0,309	0,439	0,261	0,356	1,235	0,178	0,617	0,898	-0,522	0,713
0,50	0,266	0,412	0,291	0,241	1,065	0,121	0,532	0,823	-0,582	0,483
0,60	0,226	0,381	0,310	0,143	0,906	0,072	0,453	0,763	-0,620	0,286
0,70	0,190	0,350	0,320	0,060	0,760	0,030	0,380	0,690	-0,640	0,120
0,80	0,157	0,318	0,322	-0,009	0,626	-0,005	0,313	0,635	-0,645	-0,019
0,90	0,126	0,286	0,318	-0,066	0,505	-0,033	0,253	0,571	-0,637	-0,131
1,00	0,099	0,254	0,318	-0,111	0,398	-0,055	0,199	0,508	-0,619	-0,222
1,20	0,055	0,195	0,281	-0,172	0,218	-0,086	0,107	0,390	-0,561	-0,347
1,40	0,021	0,142	0,243	-0,201	0,084	-0,101	0,042	0,285	-0,486	-0,408
1,60	-0,003	0,098	0,202	-0,208	-0,012	-0,104	-0,006	0,196	-0,404	-0,415
1,80	-0,019	0,062	0,161	-0,199	-0,075	-0,099	-0,038	0,123	-0,322	-0,399
2,00	-0,028	0,033	0,123	-0,179	-0,113	-0,090	-0,056	0,067	-0,246	-0,359
3,00	-0,025	-0,021	0,007	-0,056	-0,099	-0,028	-0,049	-0,042	-0,014	-0,113
4,00	-0,006	-0,013	-0,014	-0,002	-0,024	0,001	-0,012	-0,026	0,028	0,000
5,00	0,001	-0,002	-0,060	0,000	0,004	0,004	0,002	-0,005	0,013	0,017

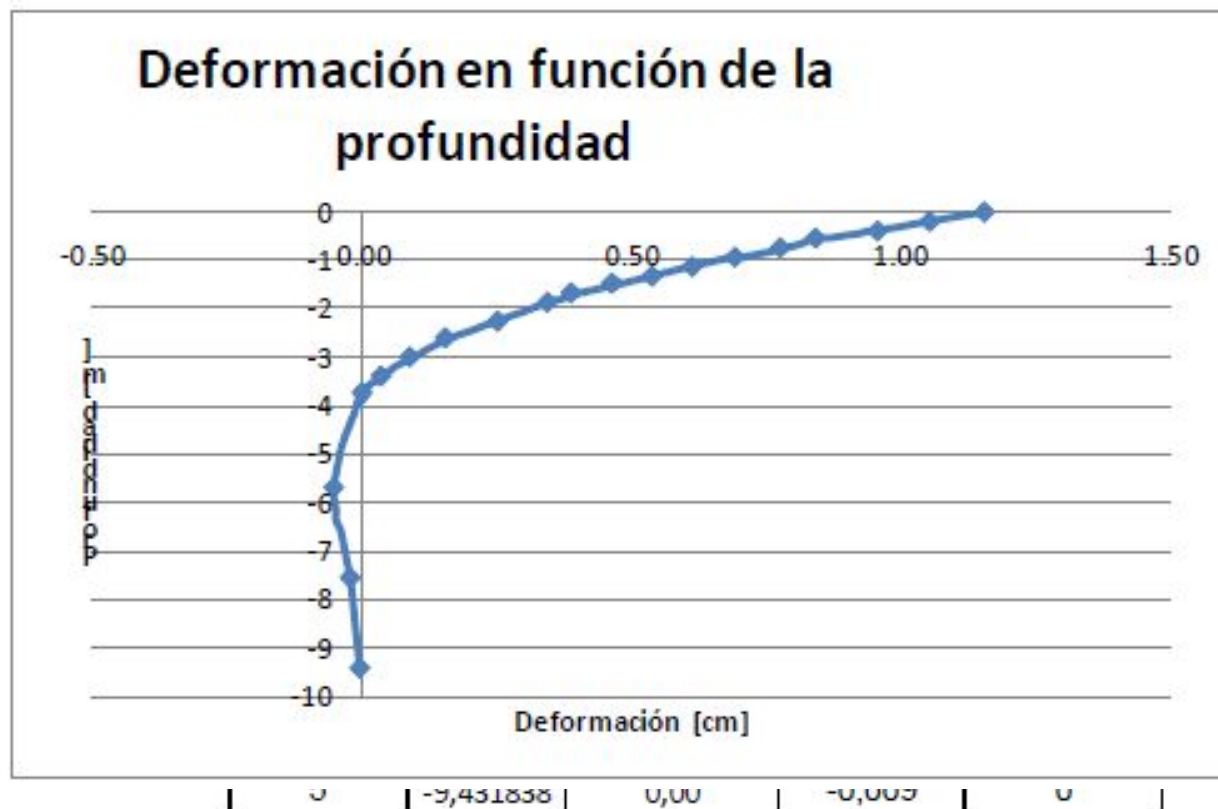
(Davisson y Gill)

Solución de los desplazamientos

La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$Y(z) = A_Y(z) \cdot \frac{H_0 \cdot T^3}{E_h \cdot J} + B_Y(z) \cdot \frac{M_0 \cdot T^2}{E_h \cdot J}$$

Z	x[m]=T*z	δ [cm]:	A _Y	B _Y
0	0	1.16	2.435	1.623



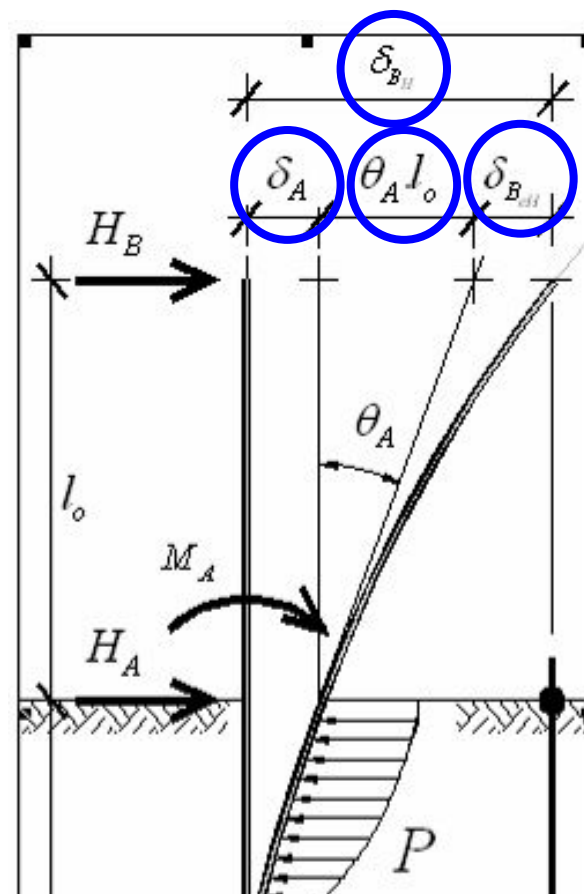
Solución de los desplazamientos

Flecha en el extremo superior:

El método anterior da los resultados de los desplazamientos en contacto con el suelo.

Para los desplazamientos a pie de la columna (nivel superior de cabezal) deben sumarse el desplazamiento por giro y el desplazamiento de la ménsula

$$\delta_3 = \frac{H_0 \cdot h^3}{EJ} + M_0 \cdot \frac{h^2}{2EJ}$$



Solución de los esfuerzos

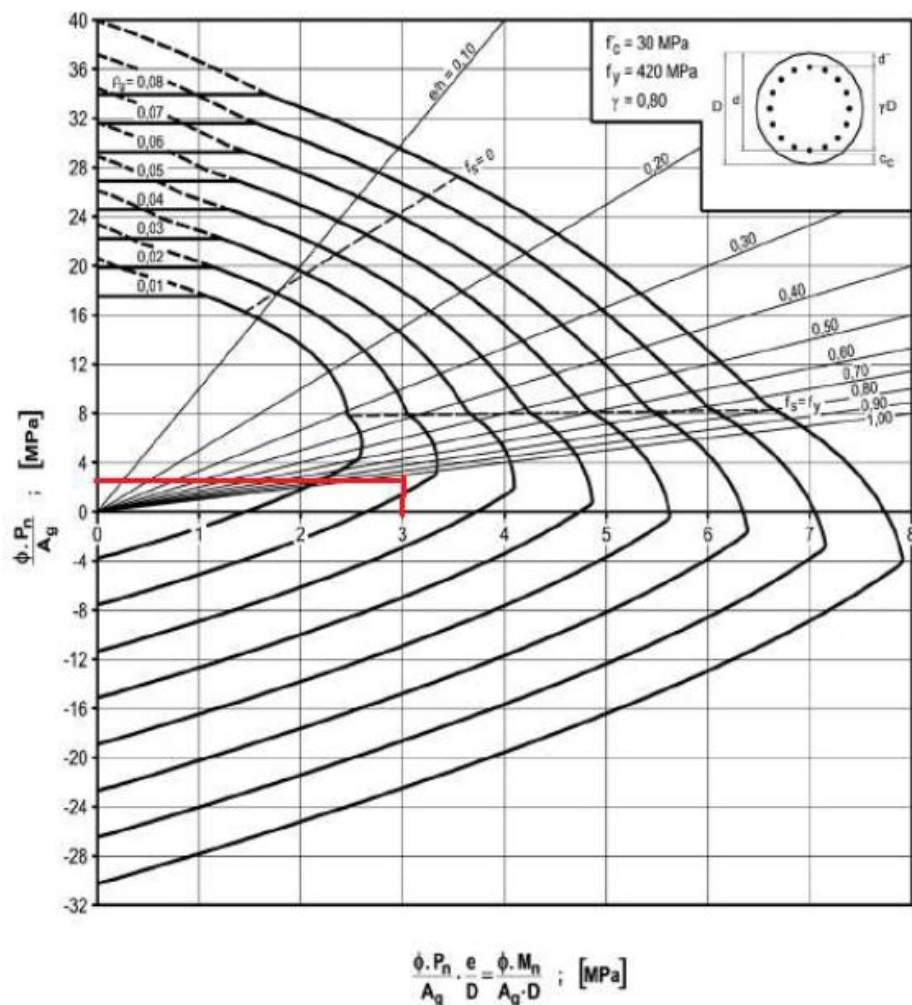
Debe $n := \frac{N_u}{A} = 2.735 \text{ MPa}$

$m := \frac{M_u}{A \cdot D} = 3.025 \text{ MPa}$

$\gamma := \frac{D - 2 \cdot \text{rec}}{D} = 0.769$

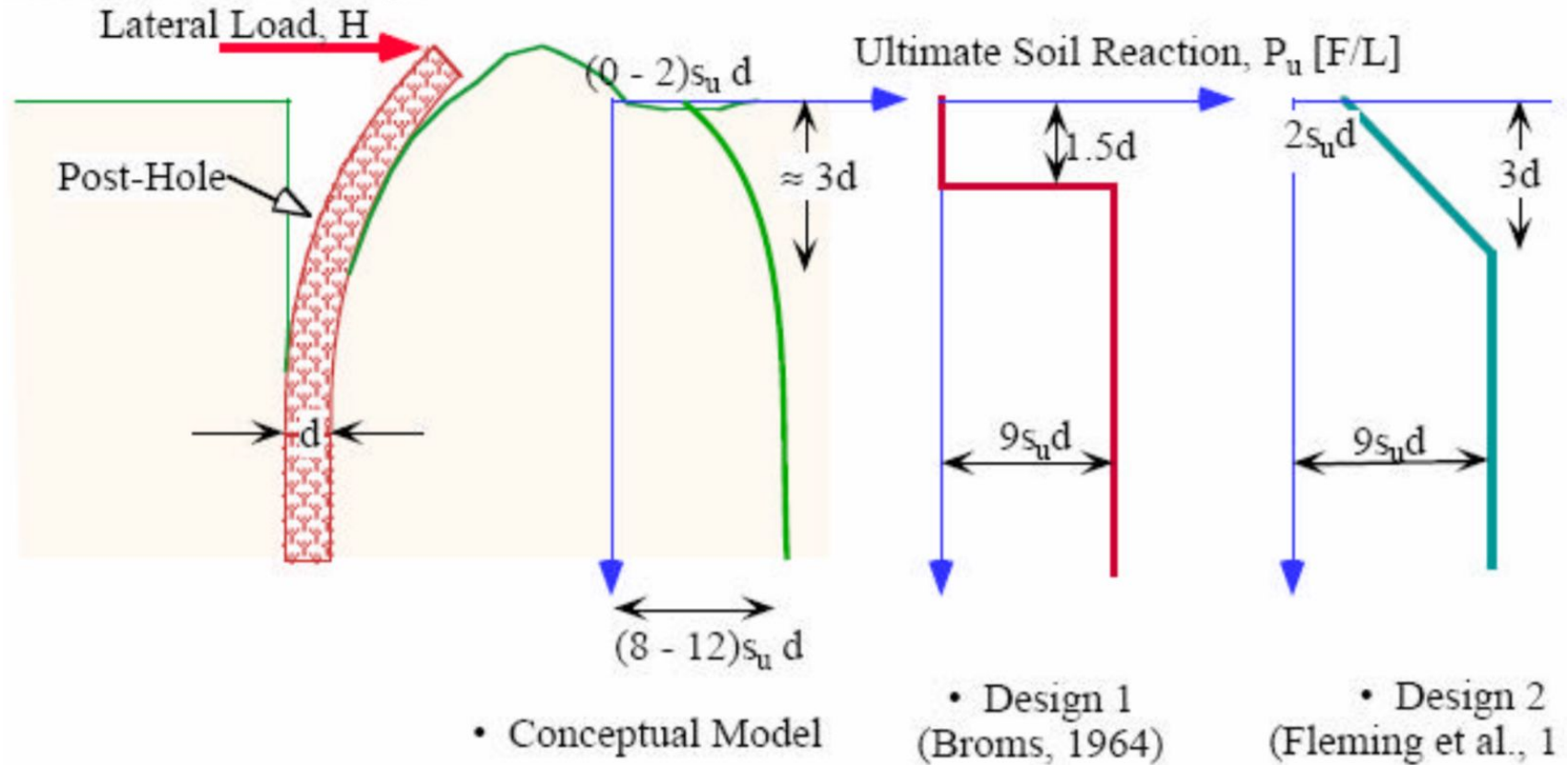
¡

La f_c
sigui

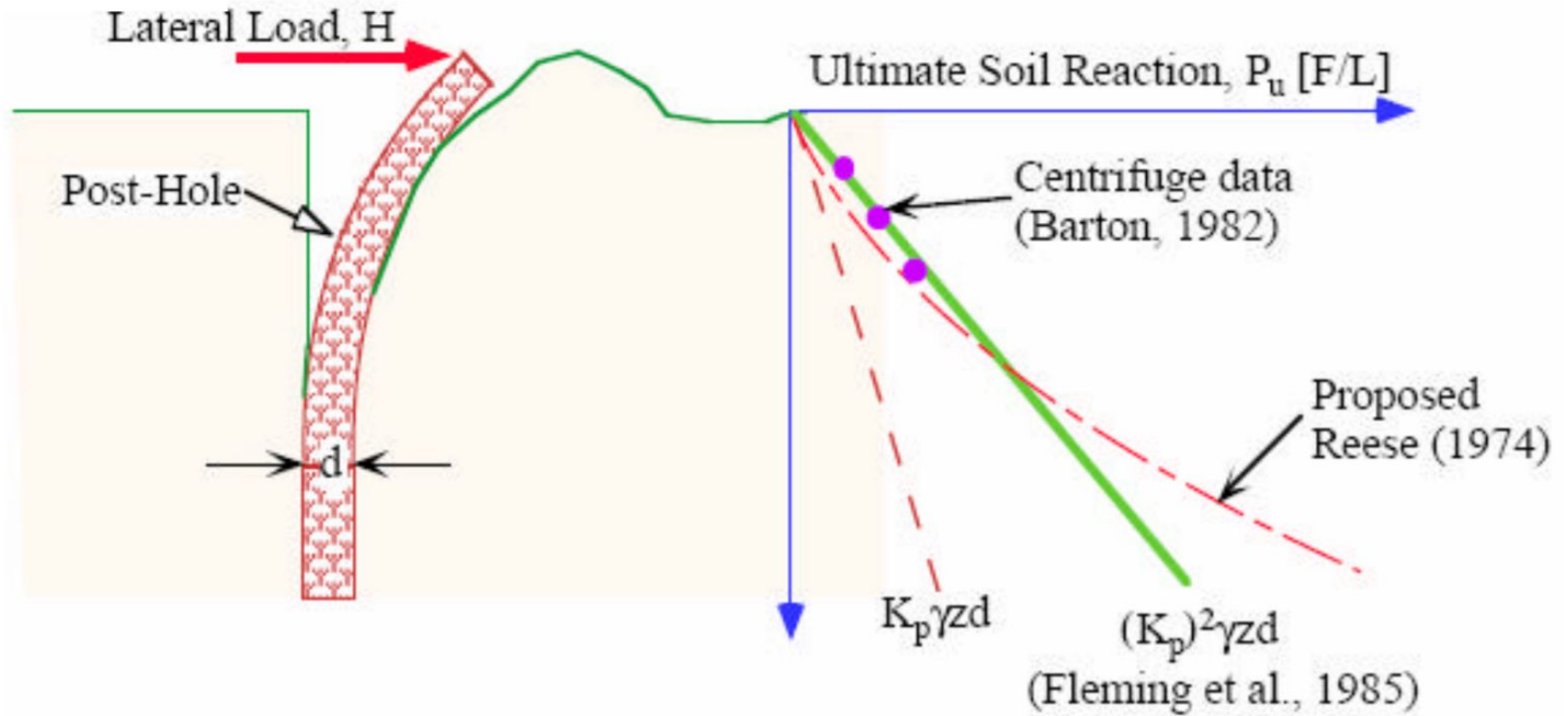


Presión de falla en suelos cohesivos

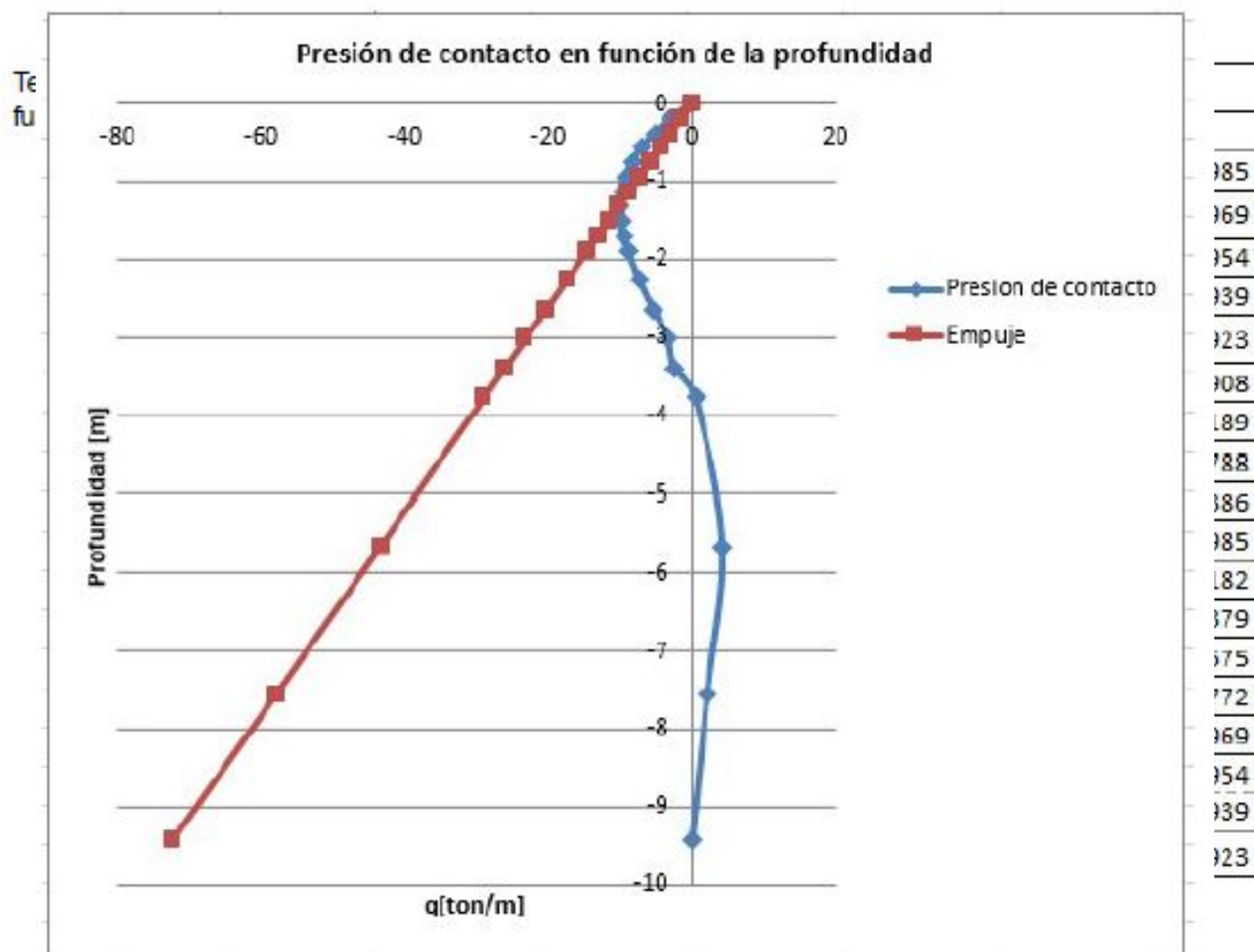
- Lateral Resistance in Clays:



Presión de falla en suelos no cohesivos



Presión de falla en suelos no cohesivos

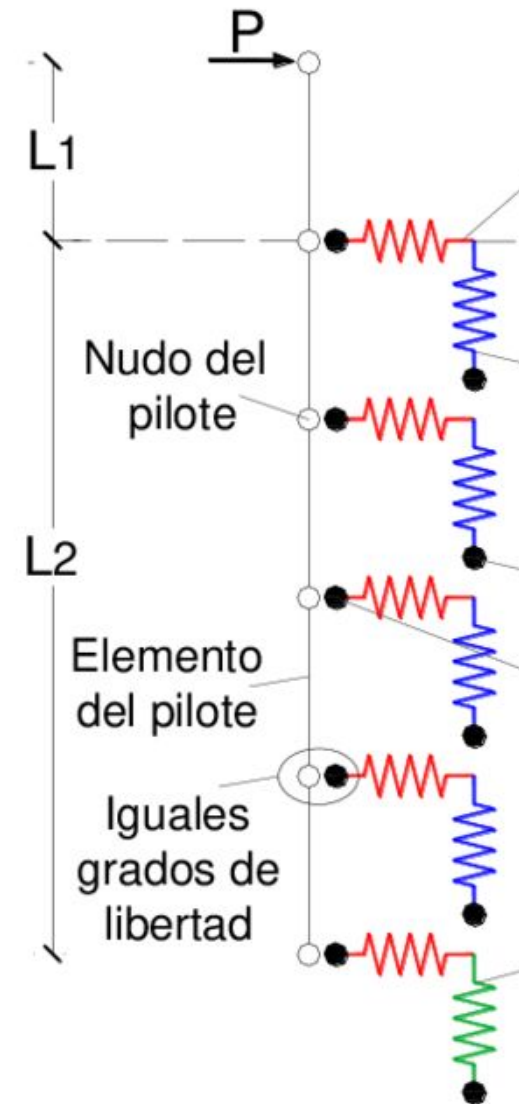


Análisis discreto - Método de los Elementos Finitos

Se discretizan los materiales en pequeños elementos donde se impone el comportamiento de las deformaciones.

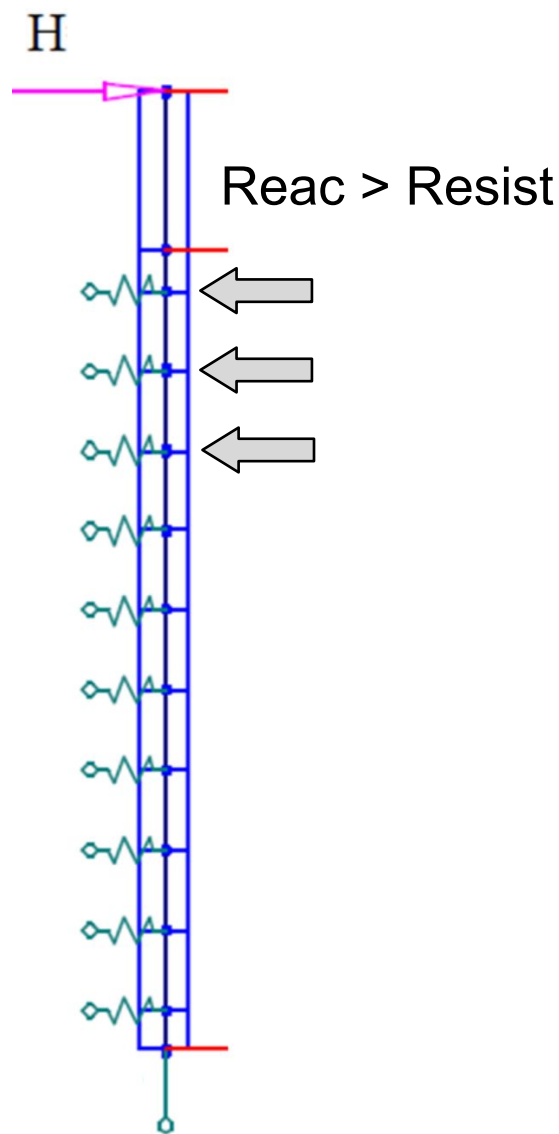
En el análisis unidireccional, se modela el pilote con elementos de viga y el suelo mediante resortes.

En el análisis espacial, se modela tanto el pilote como el suelo con elementos finitos.





Método de los Elementos Finitos



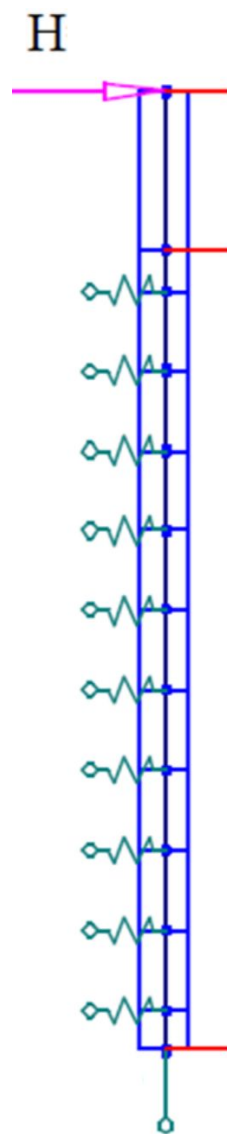
Al modelar mediante resortes, es importante definir el comportamiento de los mismos.

Se pueden modelar elásticos ideales, elastoplásticos ideales, o mediante curvas fuerza-desplazamiento.

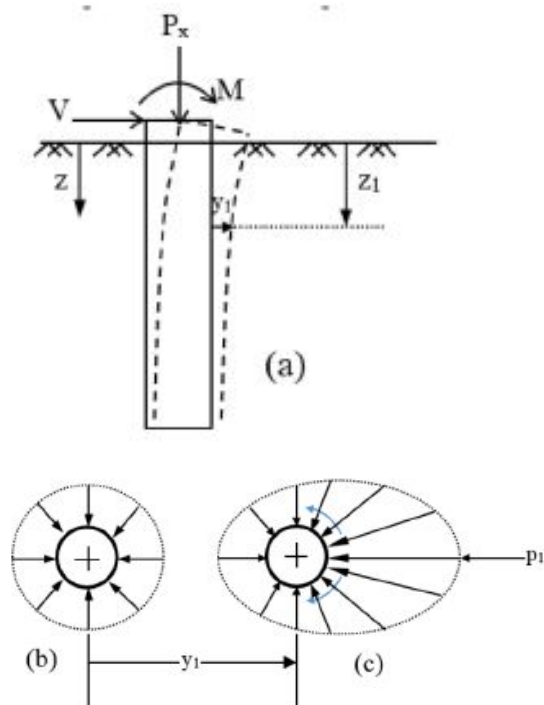
Para ello se debe evaluar el tipo de suelo, y la variación de la rigidez con la profundidad.

Es importante que las reacciones de los resortes ante cargas de servicio no superen la resistencia del suelo, y que ante sucesivos estados de carga se reinicie la matriz de rigideces.

Método de los Elementos Finitos



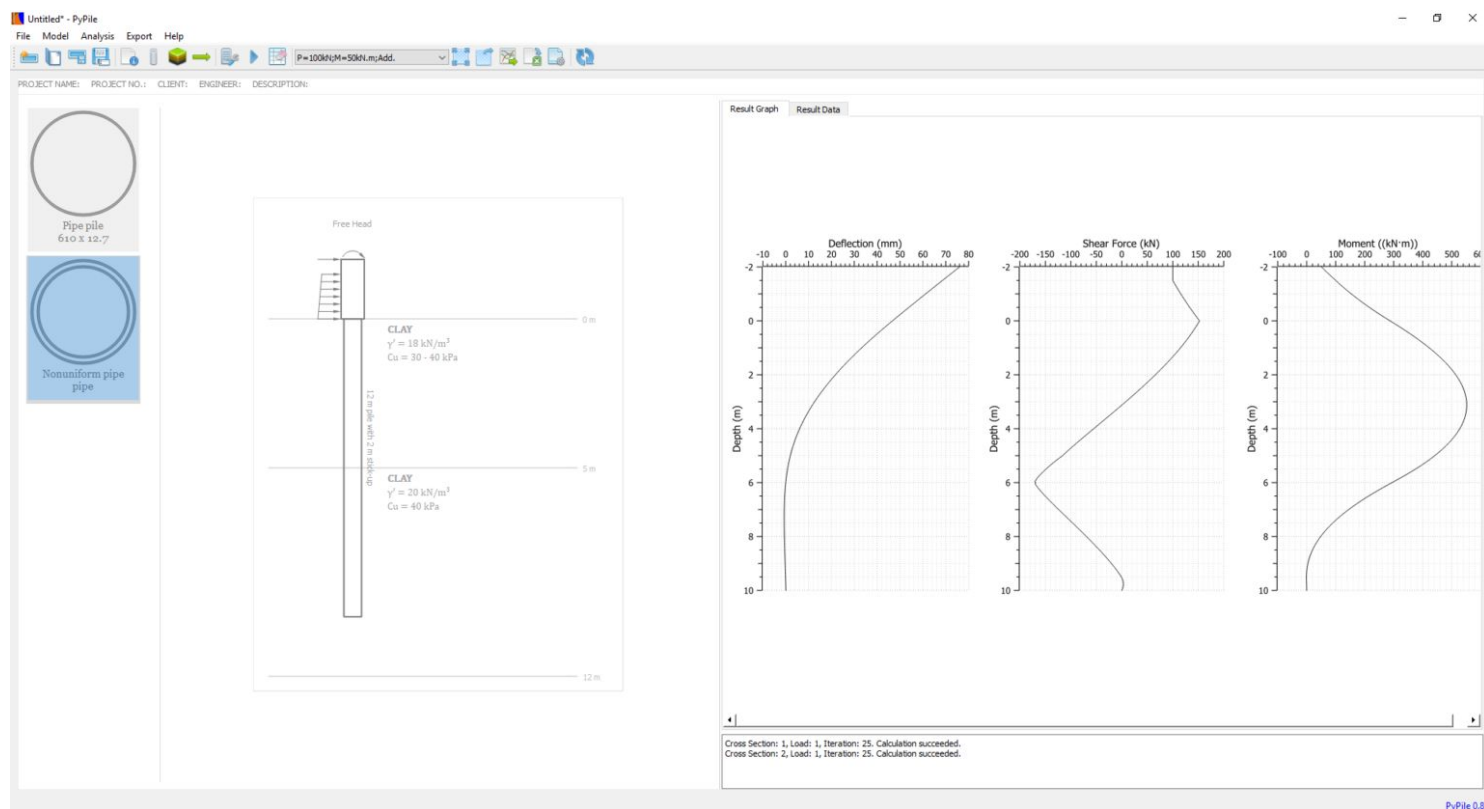
La ecuación de rigidez de los resortes es fundamental para el análisis de las deformaciones (y en menor medida los esfuerzos) y depende del tipo de suelo.



Soil Type and Condition	Reference
Soft clay below the water table	Matlock (1970)
Stiff clay below the water table	Reese, et al. (1975)
Stiff clay above the water table	Welch and Reese (1972), Reese and Welch (1975)
Sands	Reese, et al. (1974)
Sands	API (1993)
Soils with cohesion and friction	Evans and Duncan (1982)
Weak rock	Reese (1997)
Strong rock	Nyman (1980)

Método de los Elementos Finitos

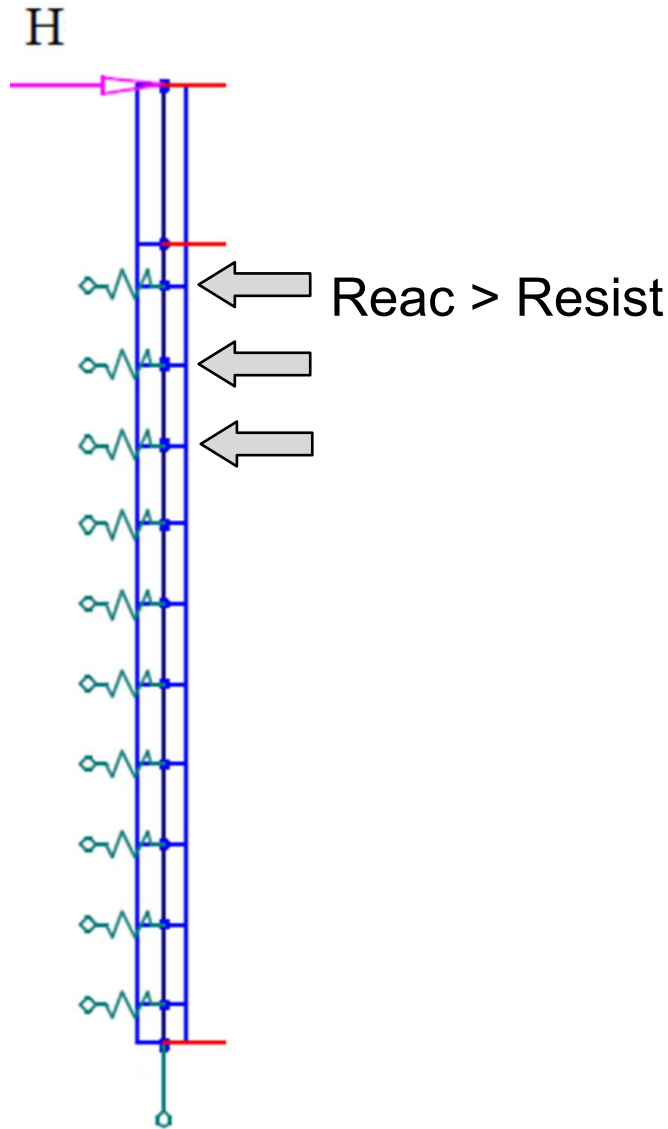
Existen diversos softwares de cálculo computacional que resuelven el comportamiento horizontal de los pilotes mediante las curvas p-y descriptas anteriormente.



PyPile - YongTechnology



Modelo numérico



El problema está cuando queremos sacar las sollicitaciones últimas para el diseño del pilote:

¿Los resortes que superan la carga admisible, deben sacarse?

¿Hasta donde?



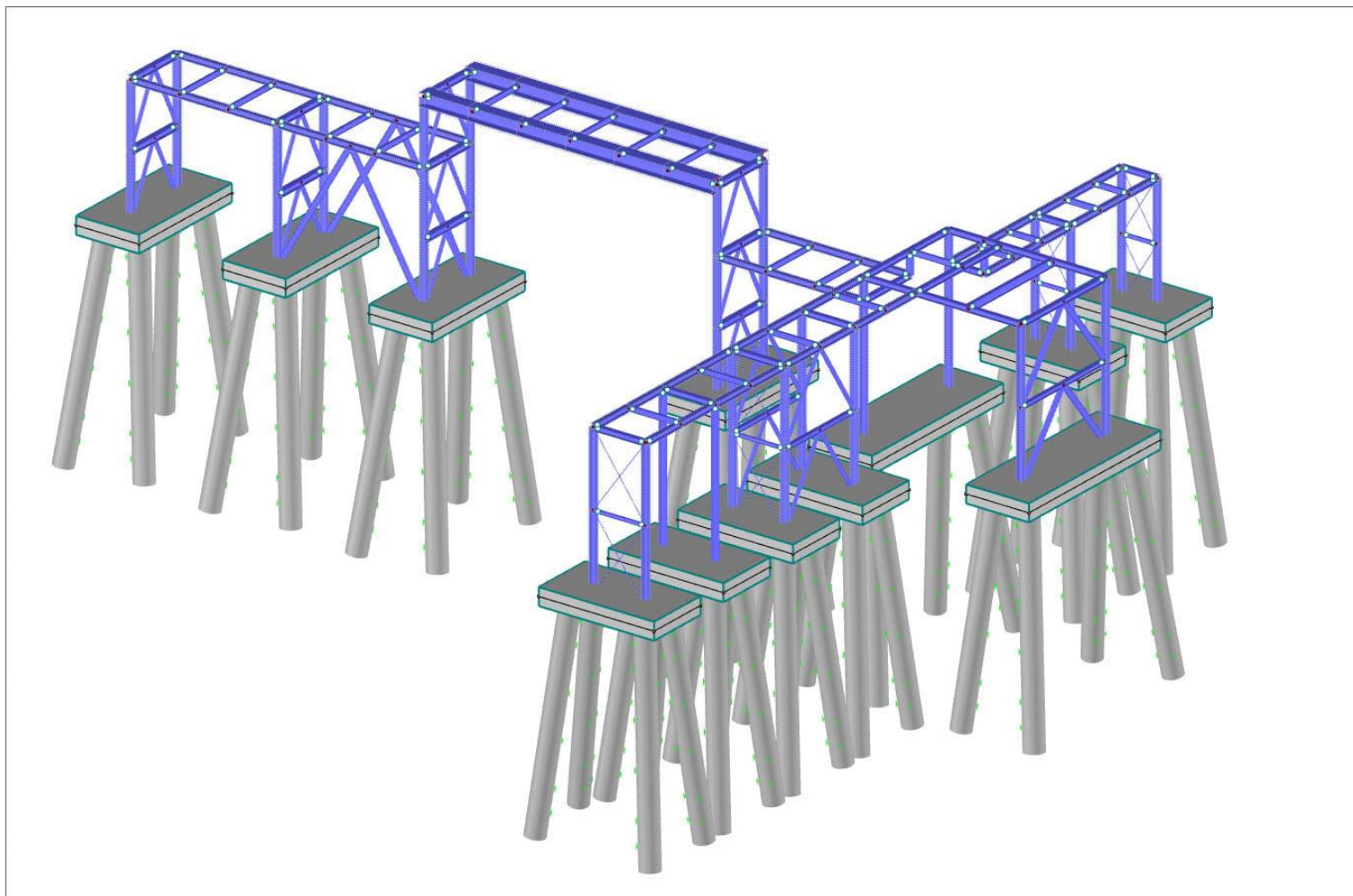
Modelos con Superestructura

En algunas situaciones no es posible realizar por separado el modelo de la superestructura y las fundaciones profundas:

- Análisis Interacción Suelo-Estructura hiperestática.
- Análisis de Modos de Vibración y cargas dinámicas
- Análisis no-lineal
- Efectos de Segundo orden – carga debidas a la deformación
- Análisis no lineal mediante interacción continuo – estructura

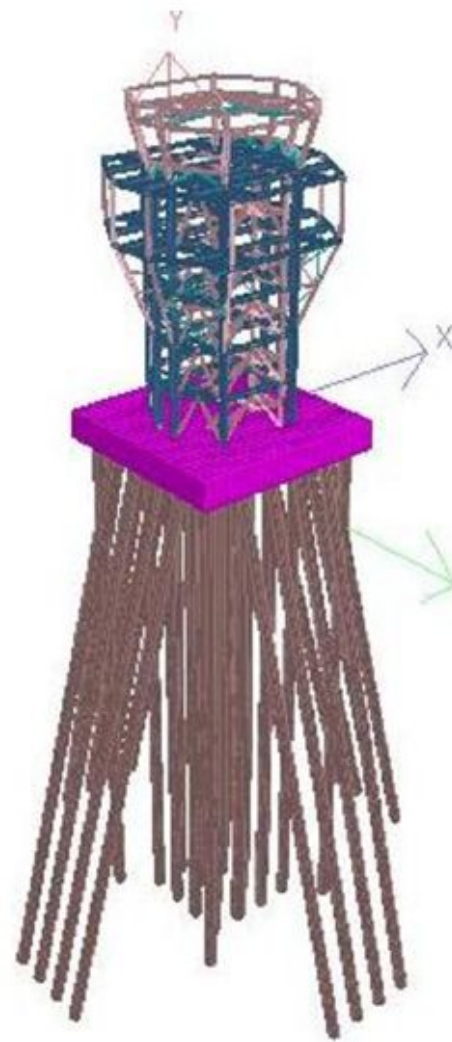
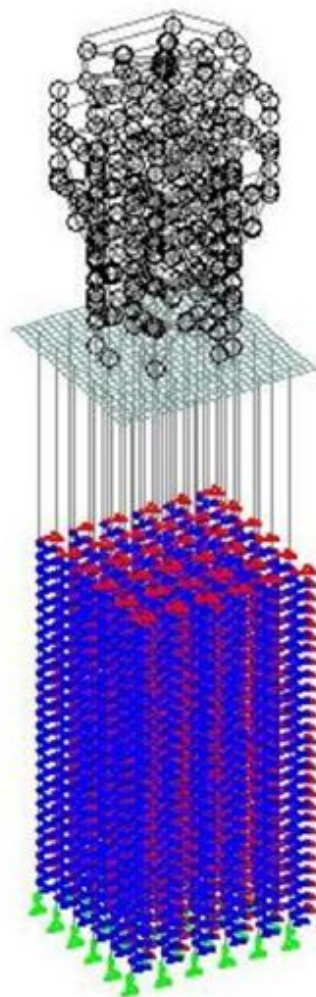
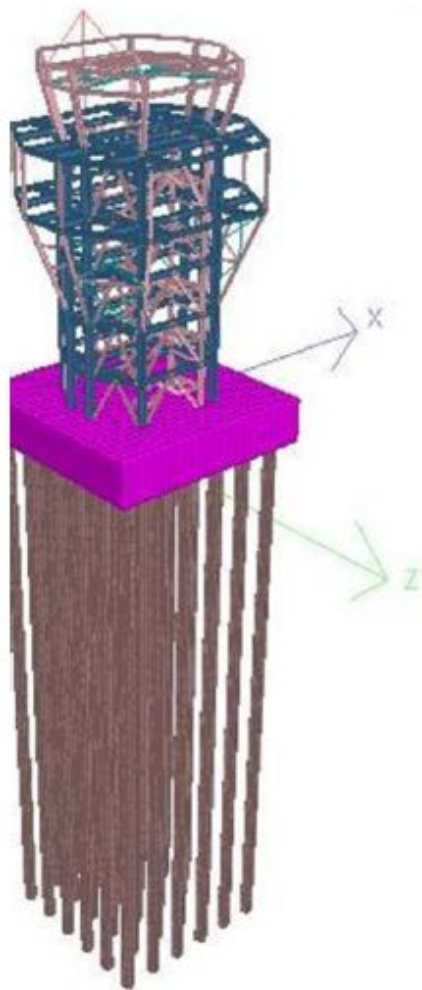


Modelos con Superestructura

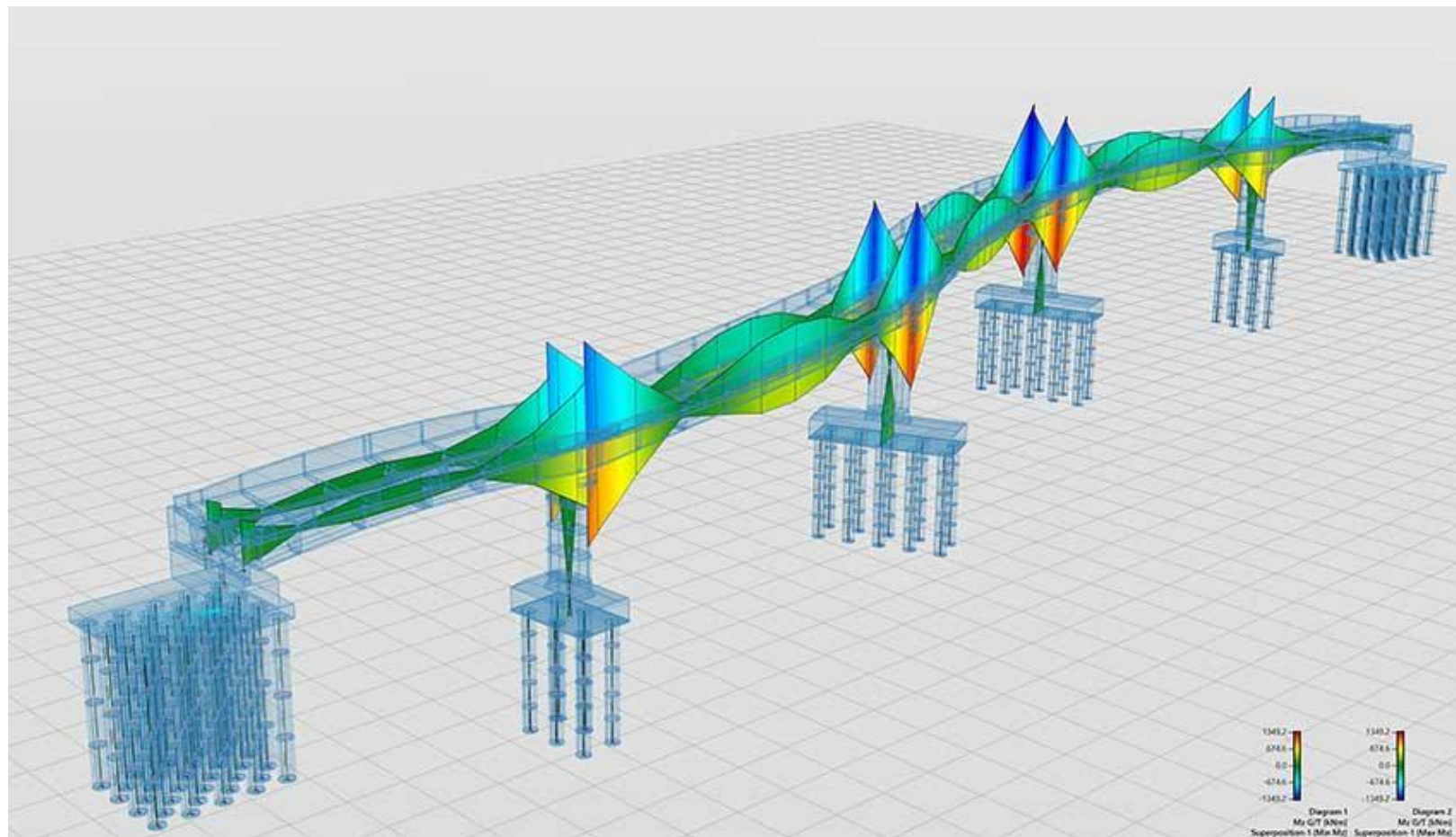


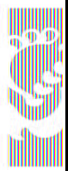


Modelos con Superestructura



Modelos con Superestructura





FIN

GRACIAS POR SU ATENCION !!!