



Fundaciones Superficiales

Ing. Pedro M Fernández

Universidad de Buenos Aires

SRK Consulting (Argentina)

fi.uba.ar

latam.srk.com

pmfernandez@fi.uba.ar

pfernandez@srk.com.ar

Teoría de la elasticidad

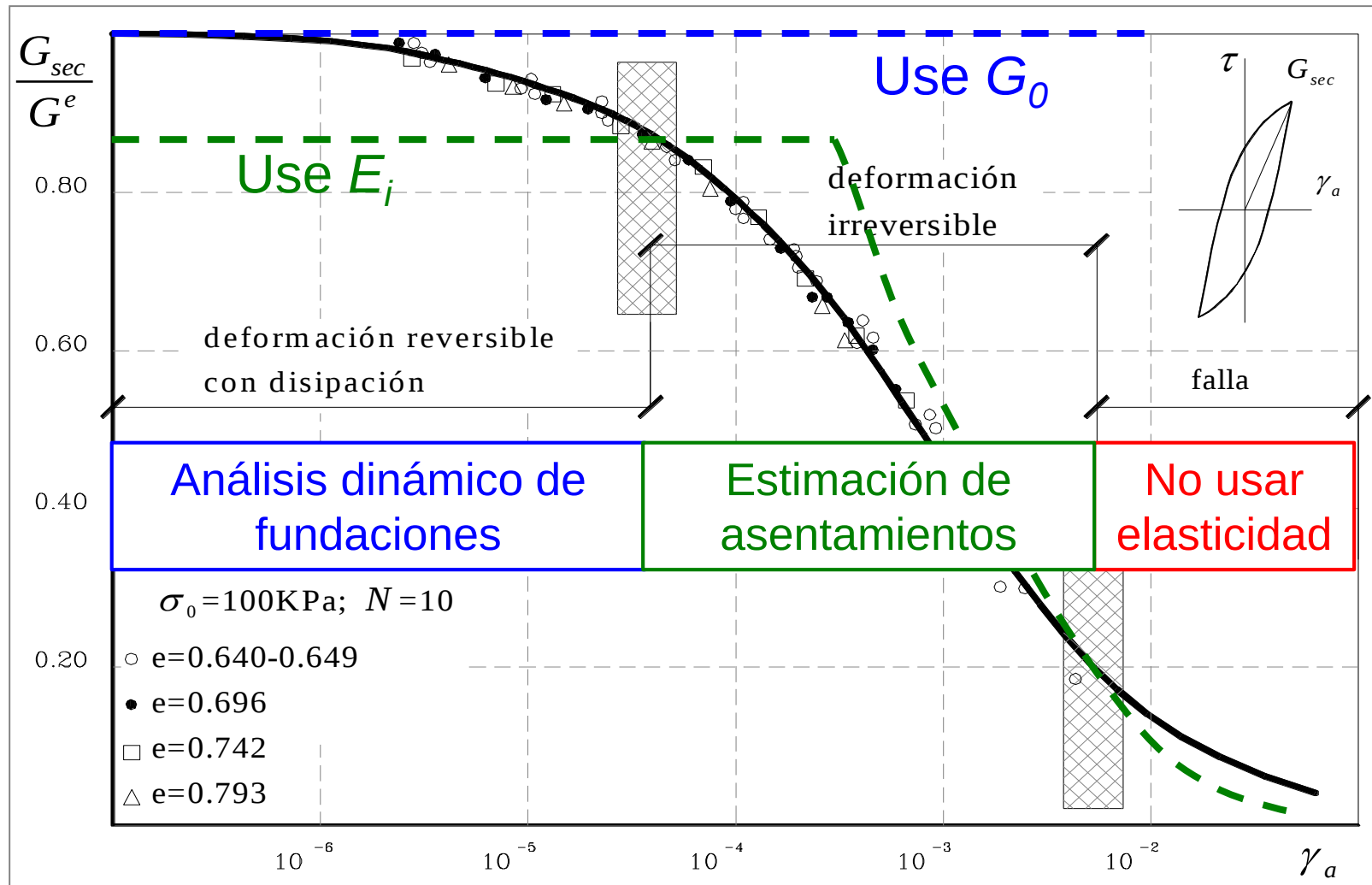


- El suelo no es un material elástico. No obstante, los cálculos elásticos, combinados con parámetros elásticos juiciosamente seleccionados, pueden a menudo conducir a estimaciones razonables de los asentamientos de suelo asociados con los cimientos y otras cargas cercanas a la superficie.
- Los asentamientos pronosticados mediante los métodos de elasticidad dependen de los parámetros elásticos utilizados para caracterizar el suelo, en particular, el módulo de rigidez.



Selección de parámetros elásticos

Los parámetros “elásticos” dependen del problema



(Tatsuoka 1991)



Coeficiente de balasto

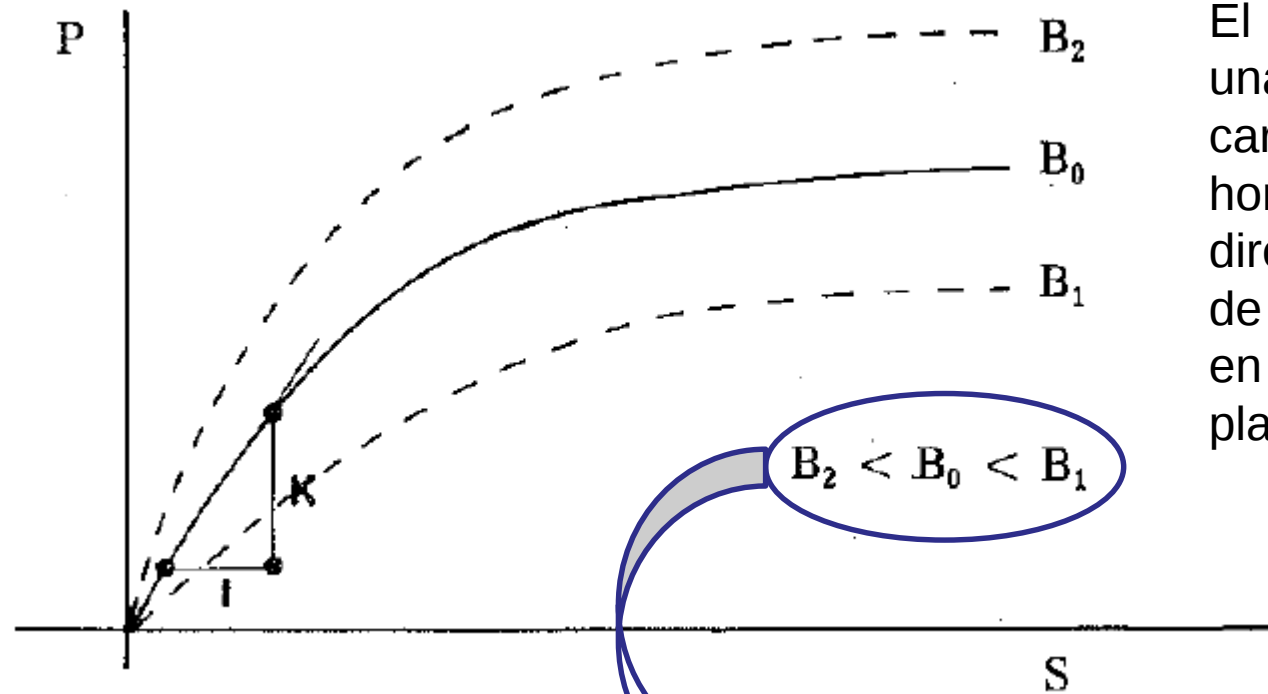
El coeficiente de balasto es una idealización, no es un parámetro físico medible en forma directa.

Por lo tanto en la practica es estimado en base a:

- Modulo elástico del suelo;
- Ensayos PLT;
- Correlaciones empíricas.



Coeficiente de balasto



El coeficiente de balasto para una pequeña superficie cargada en terreno homogéneo se deduce directamente de la pendiente de la curva presión – asiento en un ensayo de carga en placa

Al aumentar la superficie cargada, los asientos serán mayores para la misma presión.



Ensayo de carga en placa (PLT)



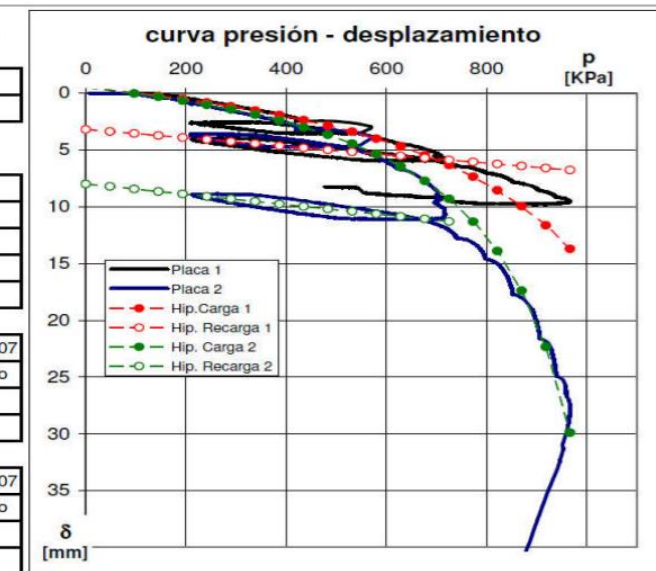
ENSAYO DE CARGA EN PLACA

VESTIBULO ROOSEVELT			
Profundidad:	6	metros	horizontal

Suelo	Placa 1	Placa 2	Descripción
ω %	28.1	31.8	humedad natural
ω_L %	50	48	límite líquido
I_p %	19	17	índice de plasticidad
#200 %	>90	>90	pasa tamiz 200

Placa 1		Carga	Recarga	A [m ²]	0.07
δ_0	mm	-0.5	3.2	corrección de cero	
K_i	MN/m ³	220	270	balasto inicial	
p_{ult}	KPa	1400	-	presión última	

Placa 2		Carga	Recarga	A [m ²]	0.07
δ_0	mm	-0.5	8.0	corrección de cero	
K_i	MN/m ³	200	220	balasto inicial	
p_{ult}	KPa	1150	-	presión última	





Ensayo de carga en placa (PLT)

- Zapatas cuadradas de ancho b en suelos cohesivos:

$$k = k_{30} 0.30/b$$

- Zapatas cuadradas de ancho b en suelos granulares:

$$k = k_{30} \left(\frac{b+0.30}{2b} \right)^2$$

- Zapatas rectangulares de ancho b y largo l :

$$k' = \frac{2}{3} k \left(1 + \frac{b}{2l} \right)$$

CUADRO 4.2.
VALORES DE K_{30} PROPUESTOS
POR TERZAGHI

Suelo	K_{30} (Kp/cm ²)
Arena seca o húmeda	
—Suelta	0,64-1,92 (1,3)*
—Media	1,92-9,60 (4,0)
—Compacta	9,60-32 (16,0)
Arena sumergida	
—Suelta	(0,8)
—Media	(2,50)
—Compacta	(10,0)
Arcilla	
$q_u = 1-2$ Kp/cm ²	1,6-3,2 (2,5)
$q_u = 2-4$ Kp/cm ²	3,2-6,4 (5,0)
$q_u > 4$ Kp/cm ²	> 6,4 (10)

* Entre paréntesis los valores medios propuestos.

(*) Al menos en los casos normales ya que el terreno puede presentar un comportamiento no lineal, fluencias plásticas, etc. no reproducibles con modelos sencillos.

CUADRO 4.3.
VALORES DE K_{30} PROPUESTOS
POR DIVERSOS AUTORES

Suelo	K_{30} (Kp/cm ²)
Arena fina de playa	1,0-1,5
Arena floja, seca o húmeda	1,0-3,0
Arena media, seca o húmeda	3,0-9,0
Arena compacta, seca o húmeda	9,0-20,0
Gravilla arenosa floja	4,0-8,0
Gravilla arenosa compacta	9,0-25,0
Grava arenosa floja	7,0-12,0
Grava arenosa compacta	12,0-30,0
Margas arcillosas	20,0-40,0
Rocas blandas o algo alteradas	30,0-500
Rocas sanas	800-30.000



Ensayo de carga en placa (PLT)

- Zapatas cuadradas de ancho b en suelos cohesivos:

$$k = k_{30} 0.30/b$$

- Zapatas cuadradas de ancho b en suelos granulares:

$$k = k_{30} \left(\frac{b+0.30}{2b} \right)^2$$

- Zapatas rectangulares de ancho b y largo l :

$$k' = \frac{2}{3} k \left(1 + \frac{b}{2l} \right)$$

CUADRO 4.2.
VALORES DE k_{30} PROPUESTOS
POR TERZAGHI

Suelo	k_{30} (Kp/cm ³)
Arena seca o húmeda	
—Suelta	0,64-1,92 (1,3)*
—Media	1,92-9,60 (4,0)
—Compacta	9,60-32 (16,0)
Arena sumergida	
—Suelta	
—Media	
—Compacta	
Arcilla	
$q_u = 1-2$ Kp/cm ²	1,6-
$q_u = 2-4$ Kp/cm ²	3,2-
$q_u > 4$ Kp/cm ²	>

* Entre paréntesis los valores medios propuestos

(*) Al menos en los casos normales ya en presencia de fluencias plásticas, etc. no reproducibles

CUADRO 4.3.

VALORES DE k_{30} PROPUESTOS
POR DIVERSOS AUTORES

Suelo	k_{30} (Kp/cm ³)
Arena fina de playa	1,0-1,5
Arena floja, seca o húmeda	1,0-3,0
Arena media, seca o húmeda	3,0-9,0
Arena compacta, seca o húmeda	9,0-20,0
Gravilla arenosa floja	4,0-8,0
Gravilla arenosa compacta	9,0-25,0

TABLE 9-1

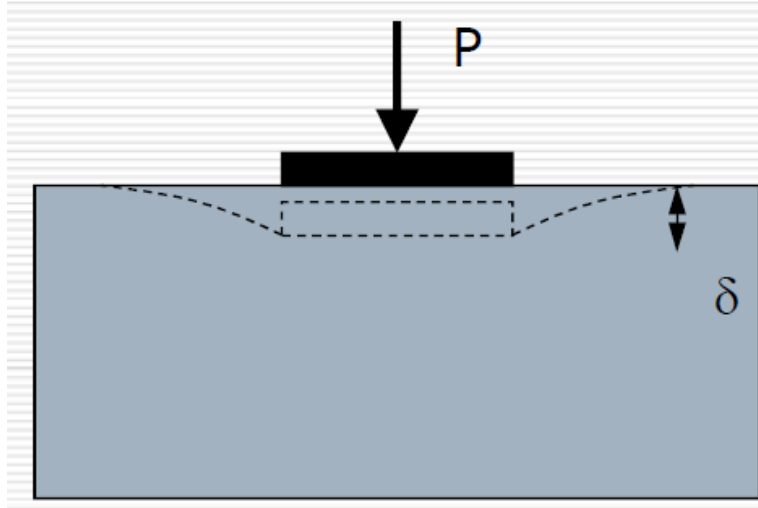
Range of modulus of subgrade reaction k_s

Use values as guide and for comparison when using approximate equations

Soil	k_s , kN/m ³
Loose sand	4800–16 000
Medium dense sand	9600–80 000
Dense sand	64 000–128 000
Clayey medium dense sand	32 000–80 000
Silty medium dense sand	24 000–48 000
Clayey soil:	
$q_a \leq 200$ kPa	12 000–24 000
$200 < q_a \leq 800$ kPa	24 000–48 000
$q_a > 800$ kPa	> 48 000



Aproximación – Placa rígida



L/B	Flexible, β_z (promedio)	Rígido, β_z
Circular	1,04	1,13
1	1,06	1,08
2	1,09	1,10
3	1,13	1,15
5	1,22	1,24
10	1,41	1,41

$$\delta = \frac{1-\nu_s^2}{E_s} \frac{q \sqrt{A}}{\beta_z}$$

$$k_0 = \frac{q}{\delta} = \frac{E_s}{1-\nu_s^2} \frac{\beta_z}{\sqrt{A}} \quad (k_0 \text{ es función de la forma y rigidez de la placa})$$

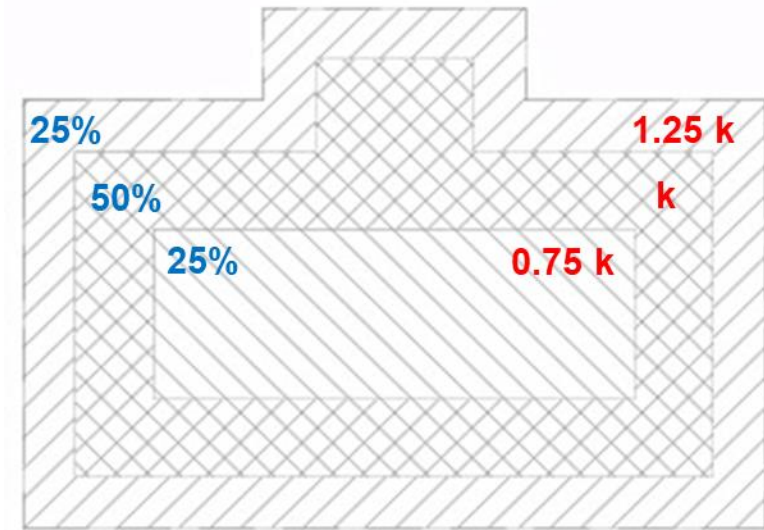
Para placas rígidas circulares o cuadradas, $k = k_0 B$



Aproximación de Vesic

La aproximación de Vesic está basada en la solución de Biot para una viga infinita sobre un medio continuo elástico.

$$k_0 = \frac{0.65 E_s}{b (1-\nu_s)^2} \left(\frac{E_s b^4}{E_h J} \right)^{1/12}$$



Para una platea flexible, el ancho b de calculo se adopta como el doble del radio elástico. Siendo H el espesor de la platea.

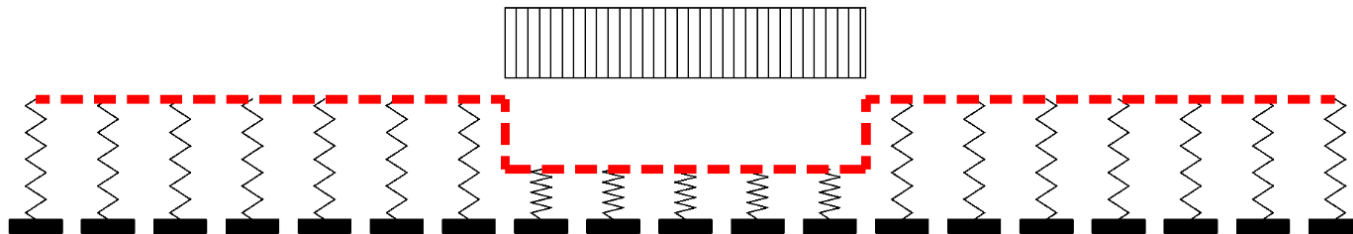
$$B = 2\rho = 2^4 \sqrt{\frac{D}{K_v}} \quad D = \frac{E_f H^3}{12 (1-\nu_f^2)}$$



Vigas sobre fundación elástica

Teoría de Winkler (1948)

- La respuesta del suelo es considerada como reacción de resortes individuales;
- Se ignora la transferencia de corte y distribución de las cargas;
- Los resortes están definidos por un parámetro denominado coeficiente de reacción o coeficiente de balasto, k . Este coeficiente no representa ninguna constante física.

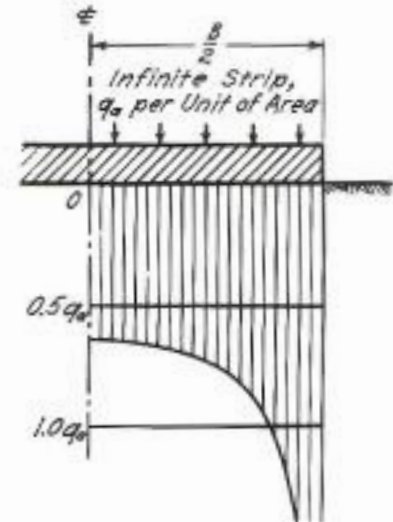
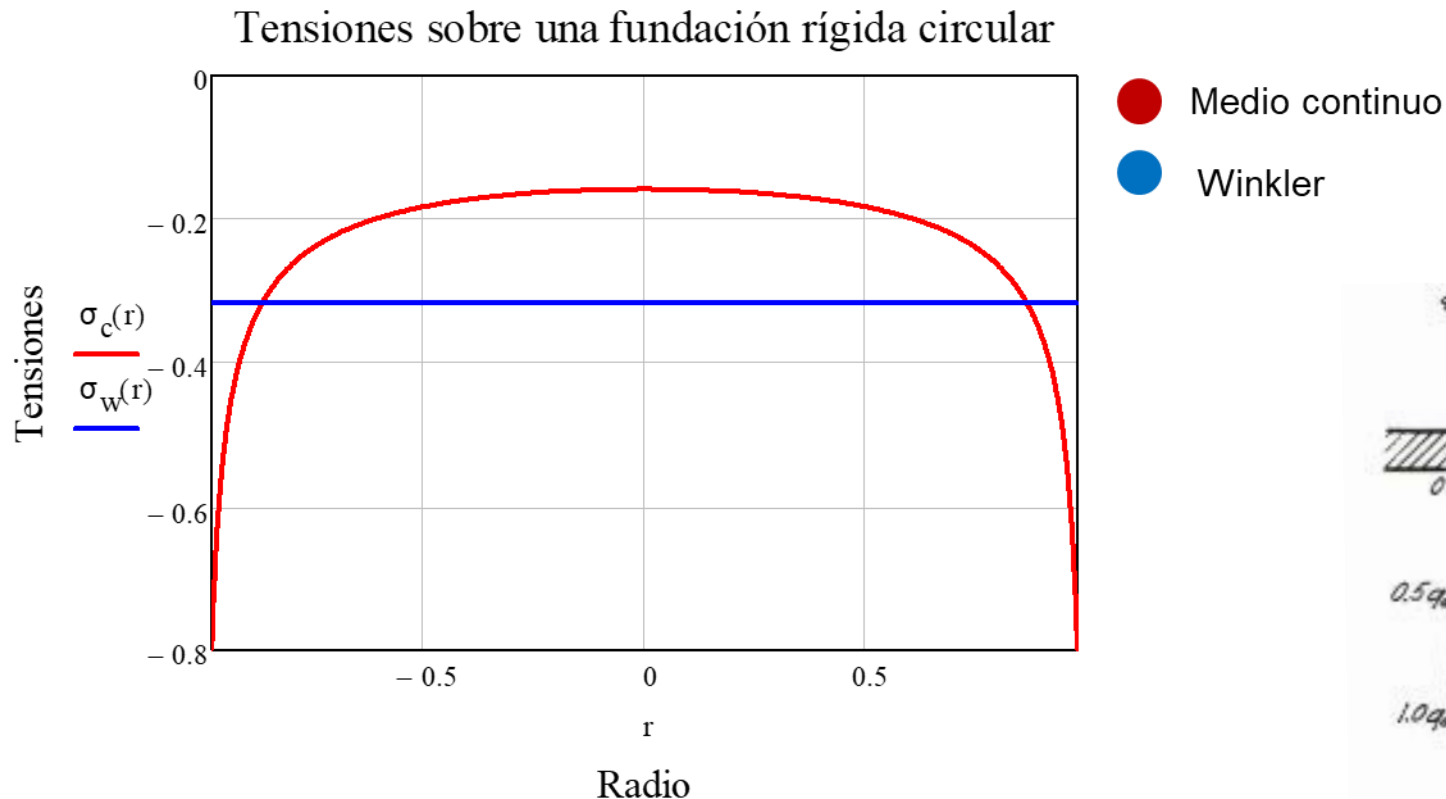




Vigas sobre fundación elástica

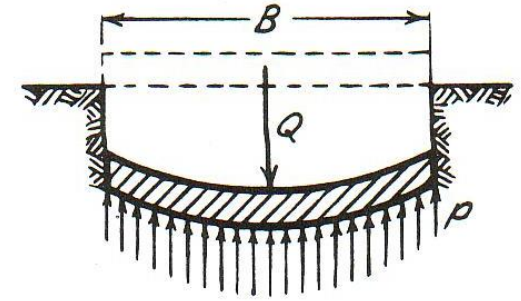
Teoría de Winkler (1948)

- Fundaciones rígidas: Igual patrón de desplazamientos en la fundación, pero muy distinta distribución de tensiones.

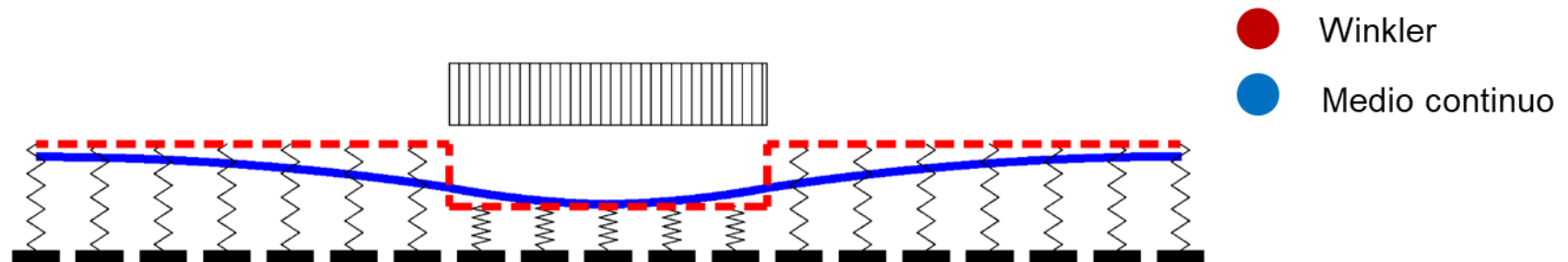


Vigas sobre fundación elástica

Teoría de Winkler (1948)



- En fundaciones flexibles, se mantiene la distribución de presiones, pero la distribución de desplazamientos resulta muy diferente.



- Conclusión: el modelo de Winkler no representa correctamente las distribuciones de presión y desplazamiento de forma conjunta. Sin embargo, permite una razonable aproximación.



Formulación analítica (Timoshenko)

- Hipótesis de Navier: Las secciones planas se mantienen perpendiculares a la fibra neutra.

$$\epsilon = -y \frac{d^2 \eta(x)}{dx^2}$$

- Momento flexor:

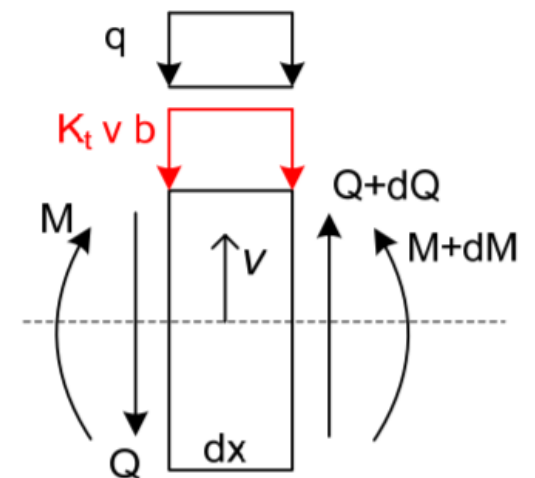
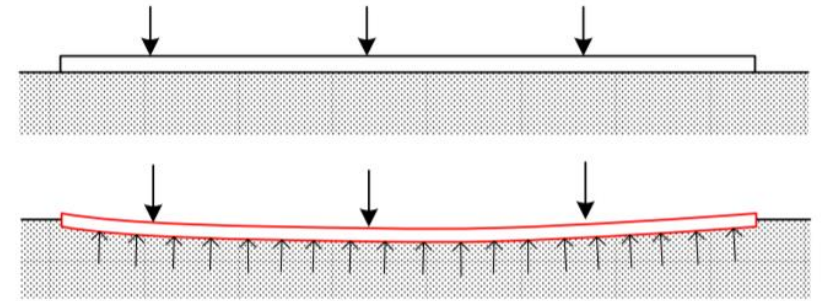
$$M = - \int \sigma y dA = E J \frac{d^2 \eta(x)}{dx^2}$$

- Equilibrio de momentos:

$$Q = - \frac{dM}{dx}$$

- Equilibrio vertical

$$dQ = k \eta(x) dx + q dx$$





Formulación analítica (Timoshenko)

- Modelo matemático

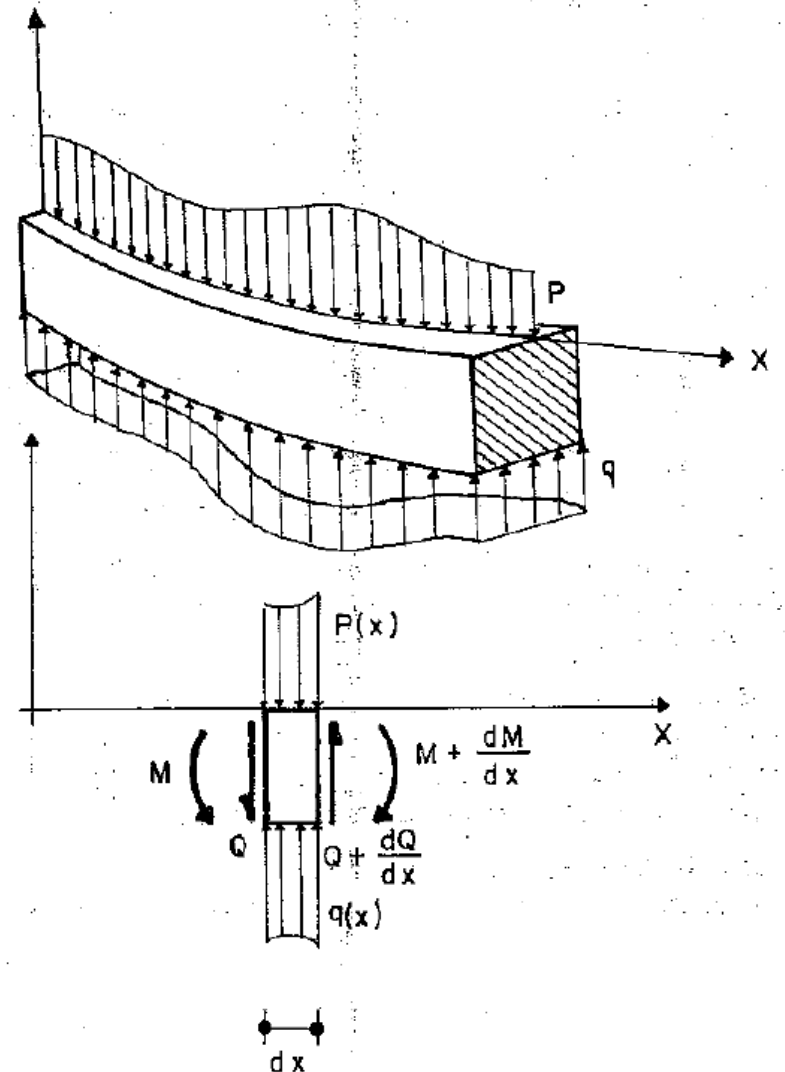
$$E J \frac{d^2 \eta(x)}{dx^2} - M(x) = 0$$

$$E J \frac{d^3 \eta(x)}{dx^3} - Q(x) = 0$$

$$E J \frac{d^4 \eta(x)}{dx^4} - p(x) + q(x) = 0$$

- Winkler: $q(x) = k \eta(x)$

$$E J \frac{d^4 \eta(x)}{dx^4} - p(x) + k \eta(x) = 0$$





Formulación analítica (Timoshenko)

- Winkler: $q_{(x)} = k \eta_{(x)}$

$$E J \frac{d^4 \eta_{(x)}}{dx^2} - p_{(x)} + k \eta_{(x)} = 0$$

- Solución de la ecuación diferencial homogénea

$$\eta_{(x)} = e^{\beta x} (A \sin(\beta x) + B \cos(\beta x)) + e^{-\beta x} (C \sin(\beta x) + D \cos(\beta x))$$

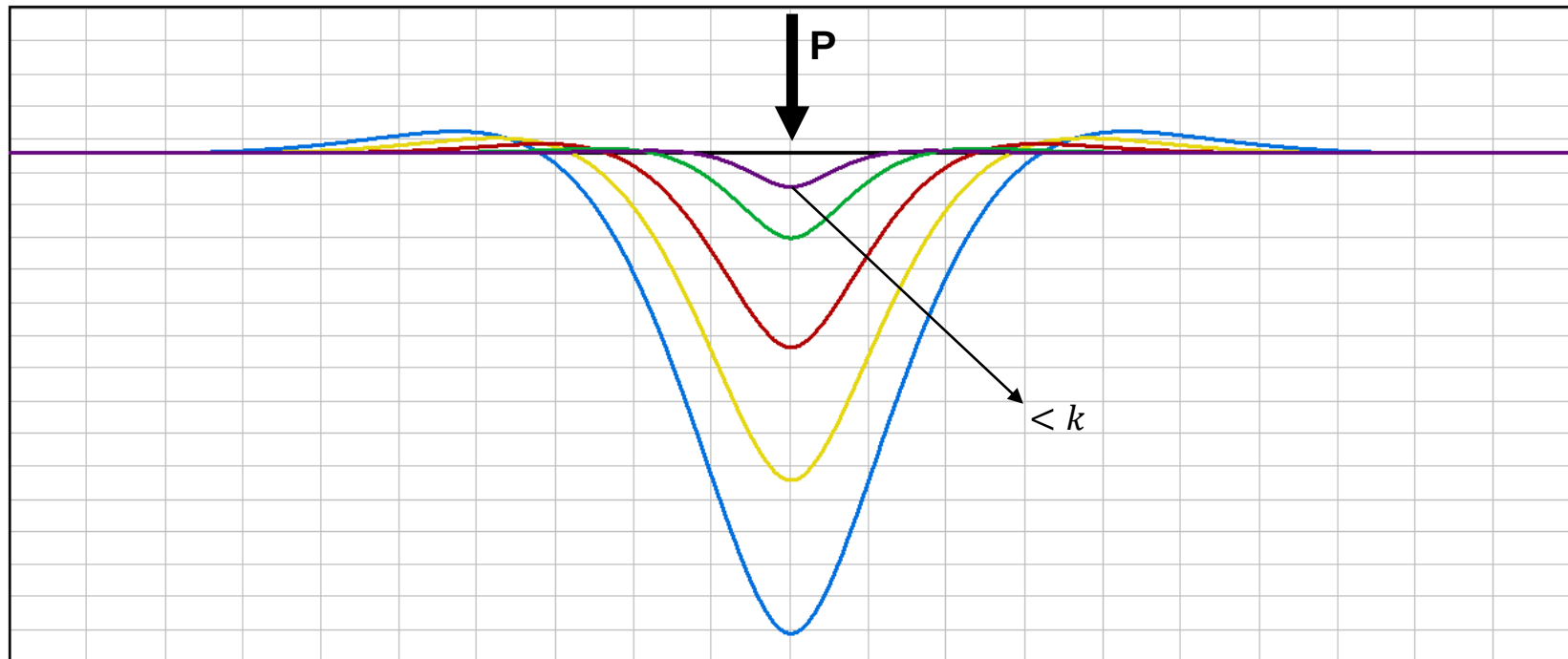
$$\beta = \sqrt[4]{b k / 4 E J}$$

- Longitud característica: $L = 1/\beta$



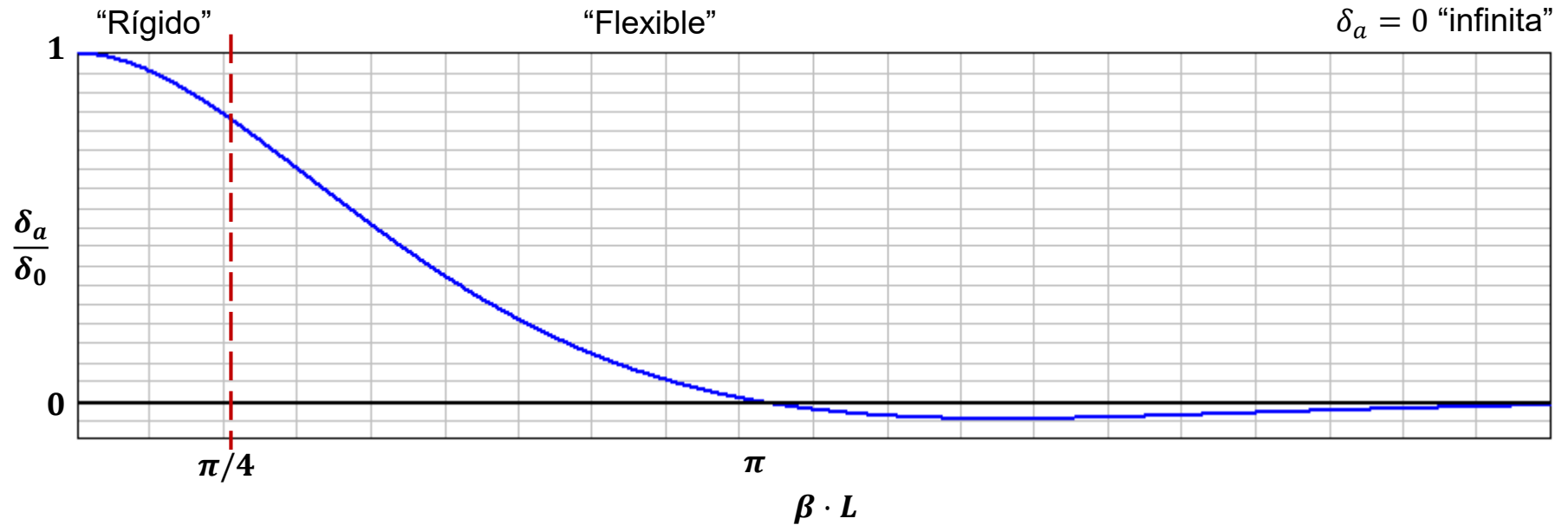
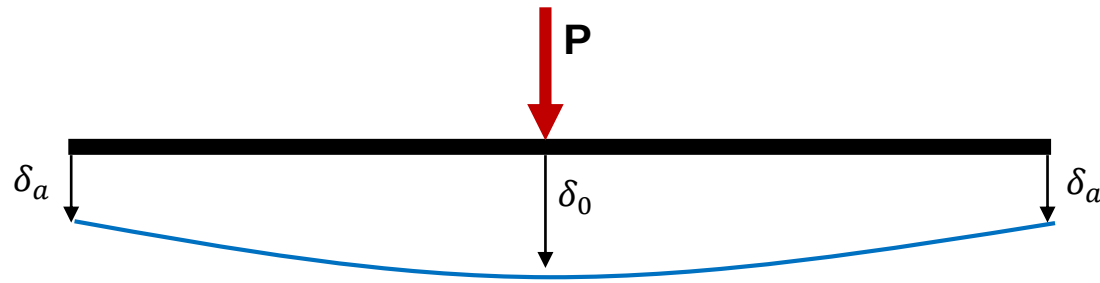
Viga infinita sobre fundación tipo Winkler sometida a una carga puntual

$$\eta(x) = -\frac{P e^{-\beta x}}{8 E J \beta^3} (\cos \beta x + \sin \beta x)$$





Viga infinita sobre fundación tipo Winkler sometida a una carga puntual



Qué hacemos en el trabajo práctico?



Referencias



- USACE. Bearing capacity of soils.
- Powrie - Soil Mechanics Concepts and Applications
- Bowles. Foundation Analysis and Design. 5^{ta} edición. Mc-Graw Hill