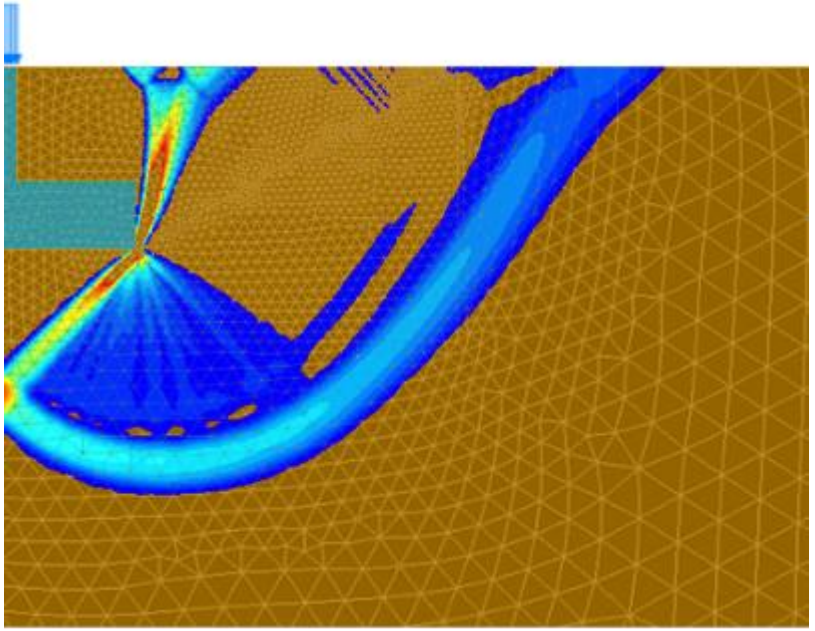
Problemas de capacidad de carga

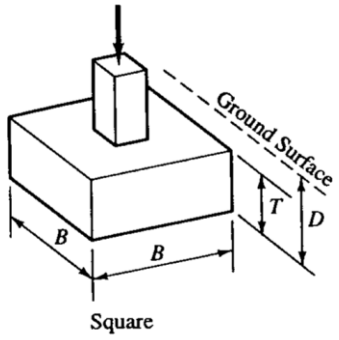


Definición de capacidad de carga

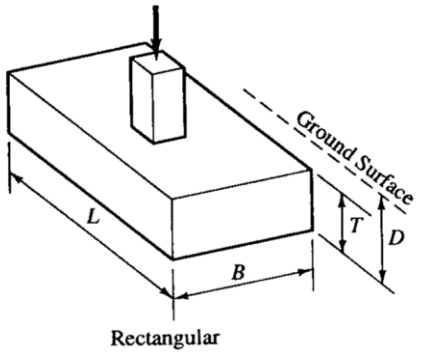
Capacidad de carga: carga que produce **hundimiento permanente** de la fundación en el terreno

El hundimiento debe estar asociado a una superficie en la que el terreno falla por corte

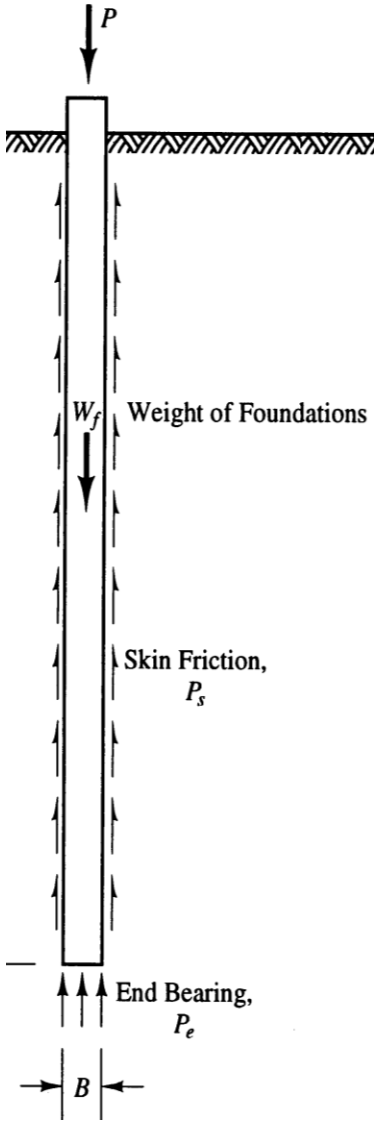
Excluye lo hundimientos por compresión elastoplástica del terreno (p.e. consolidación)



Square



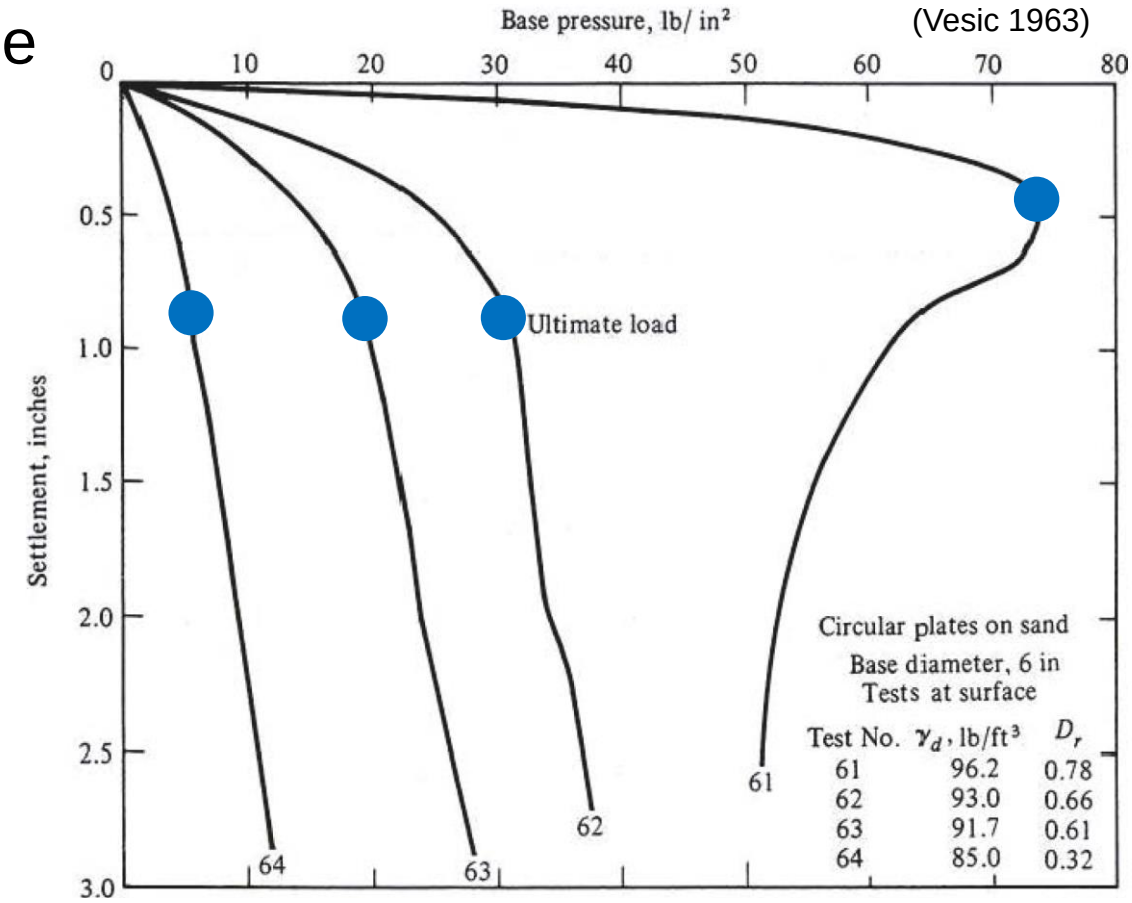
Rectangular



Incertidumbre en la definición de la carga última en los ensayos de carga

Las zapatas no muestran una “carga última” bien definida

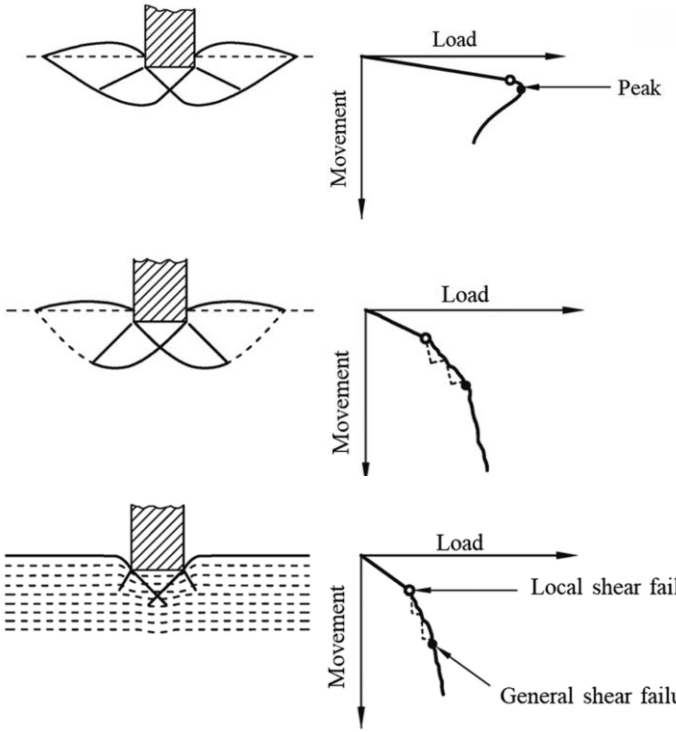
- A medida que la zapata se entierra, aumenta su “tapada”
- Las zapatas tienden a girar cuando se acercan a su carga última



Modos de falla por capacidad de carga

La capacidad portante no depende únicamente de la resistencia del suelo. También se ve afectada por la compresibilidad del suelo.

- Fallas general por corte (Arenas densas / Arcillas rígidas)
- Comportamiento intermedio (Falla local)
- Falla por punzonamiento (Arenas sueltas / Arcillas blandas)



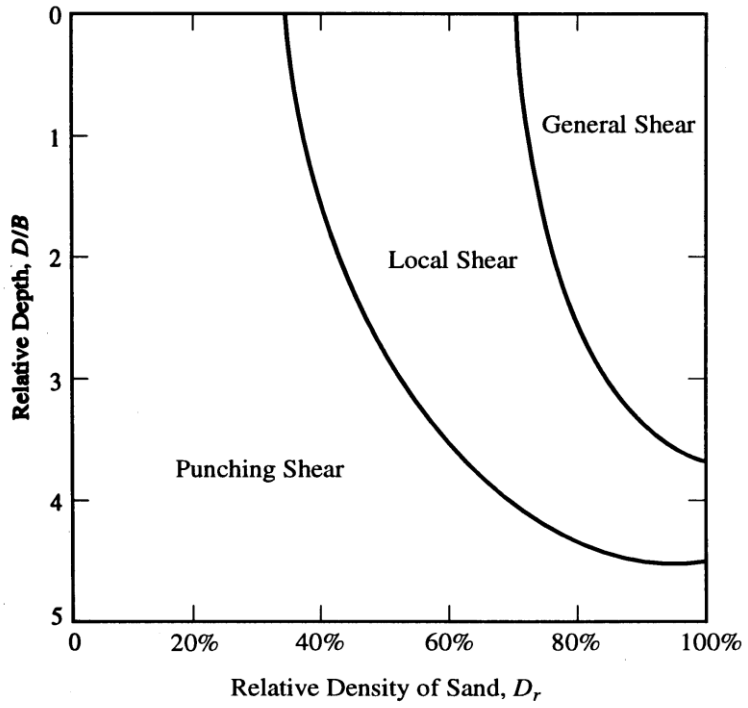
Modos de falla por capacidad de carga

La capacidad portante no depende únicamente de la resistencia del suelo. También se ve afectada por la compresibilidad del suelo.

	Cohesionless soil (e.g. sand)			*Cohesive soil (e.g. clay)*	
Failure mode	*Density condition*	*Relative density (D_r)*	*$(N_1)_{60}$*	*Consistency*	*Undrained shear strength (s_u)*
General shear failure (Figure 4.2a)	Dense to very dense	65%–100%	> 20	Very stiff to hard	> 100 kPa
Local shear failure (Figure 4.2b)	Medium dense	35%–65%	5–20	Medium to stiff	25–100 kPa
Punching shear failure (Figure 4.2c)	Loose to very loose	0%–35%	< 5	Soft to very soft	< 25 kPa

Source: data from Day 2006

Note: $(N_1)_{60}$ = N value of standard penetration test corrected for both testing procedures and vertical effective stress.



(Vesic 1973)

Métodos de diseño de fundaciones superficiales

Métodos directos: se verifica cada estado límite en forma independiente

1. *ULS*: asumiendo comportamiento rígido plástico (métodos de equilibrio o estado límite, Vesic o Brinch-Hansen)
2. *SLS*: asumiendo comportamiento elástico (por ej. Schmertmann) y (eventualmente) compresión edométrica

Métodos indirectos: correlaciones con ensayos de campo o laboratorio (por ej. SPT o CPT), "cubren" *ULS* y *SLS* a la vez

Métodos numéricos: resuelven *ULS* y *SLS* a la vez pero no permiten aislar cada estado límite para su análisis independiente

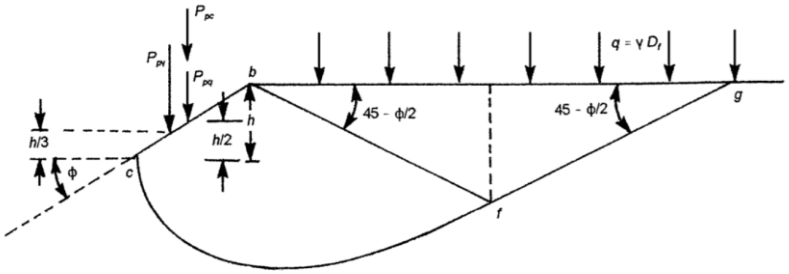
Métodos experimentales: ensayos de carga, medidas prescriptivas (experiencia), método observacional

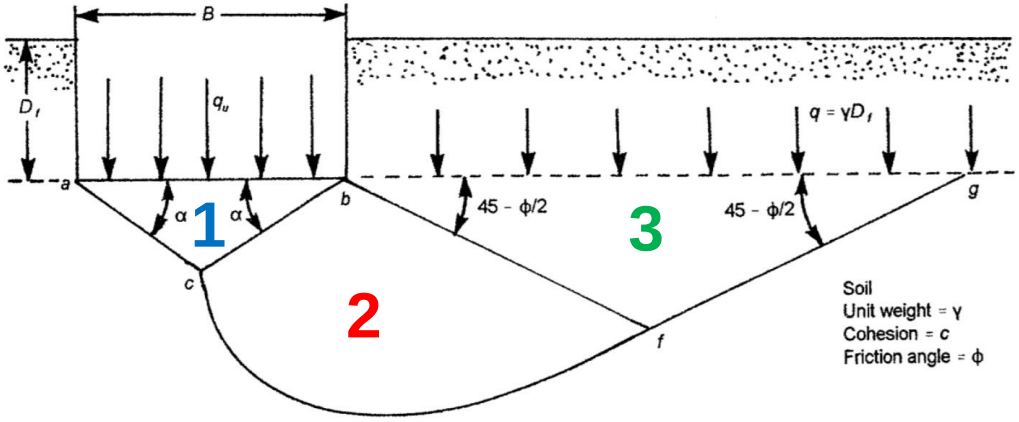
Capacidad de Carga (Terzagui 1943)

La superficie de falla en el suelo frente a la carga ultima fue dividida en tres zonas (Terzagui 1943)

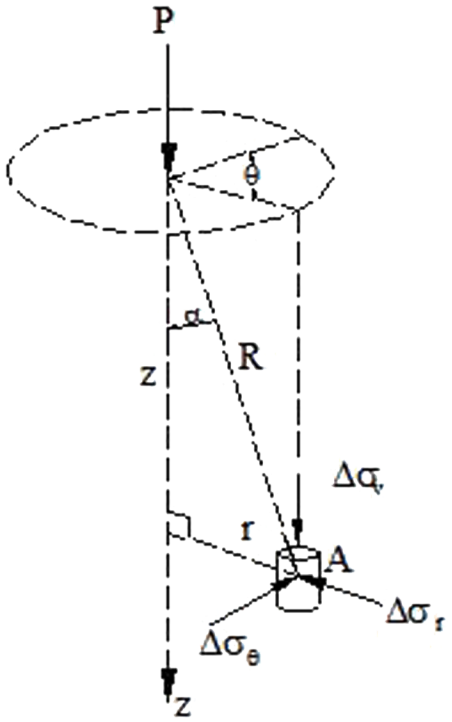
1. Zona elástica ($\alpha = \phi'$)
2. Zona de corte radial de Prandtl
3. Zona pasiva de Rankine

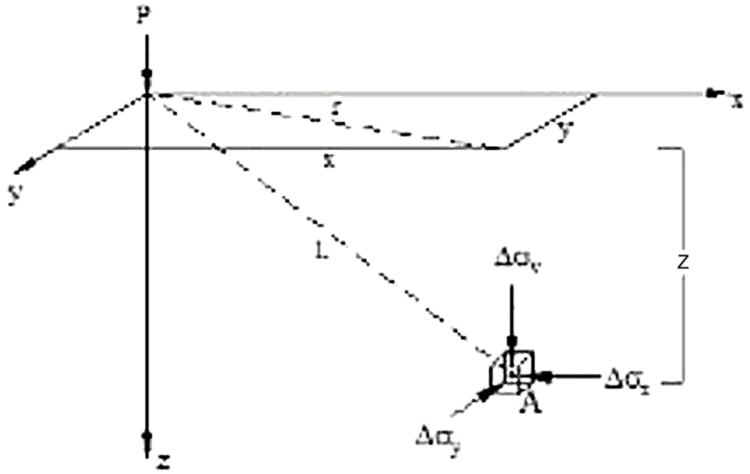
$$P_p = P_{pc} + P_{pq} + P_{p\gamma}$$

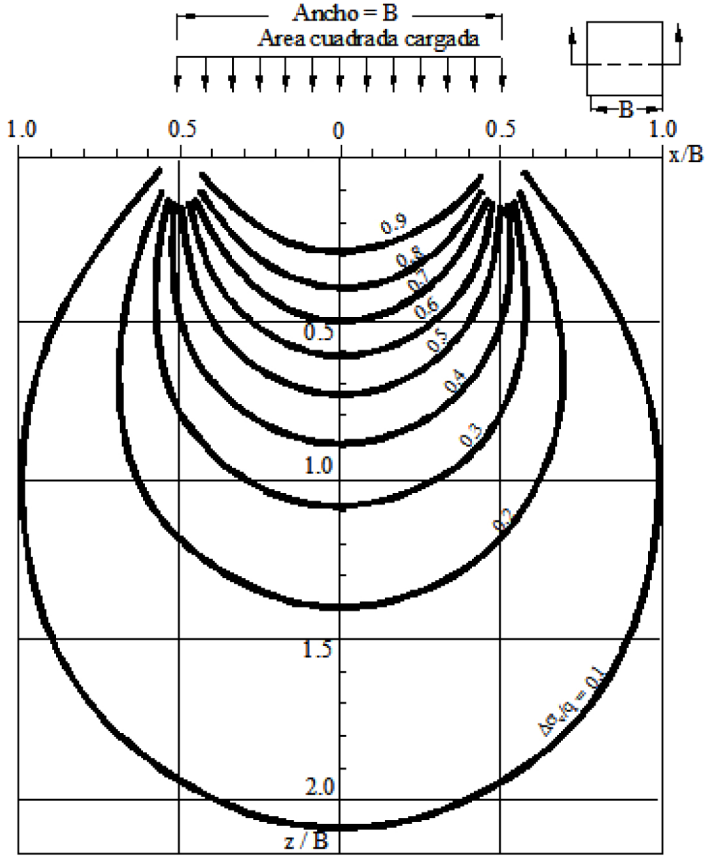




Capacidad de Carga (Terzagui 1943)

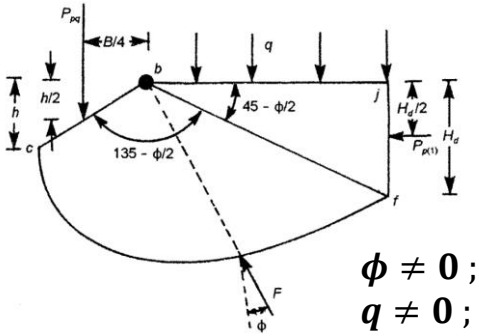






Capacidad de Carga (Primera estimación)

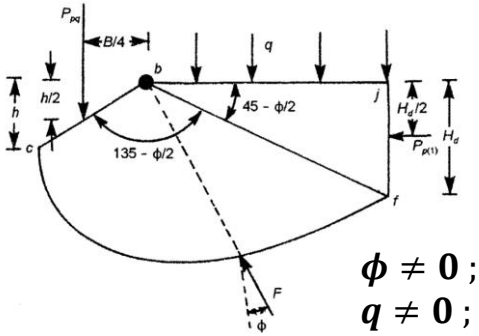
- $P_{pq} = q\,N_q = q\left(\frac{e^{2\,tan\phi\,(0.75\,\pi - 0.5\,\phi)}}{2\,cos^2(45+0.5\,\phi)}\right)$



$\phi \neq 0\,;\, c = 0\,;$
$q \neq 0\,;\, \gamma = 0$

Capacidad de Carga (Primera estimación)

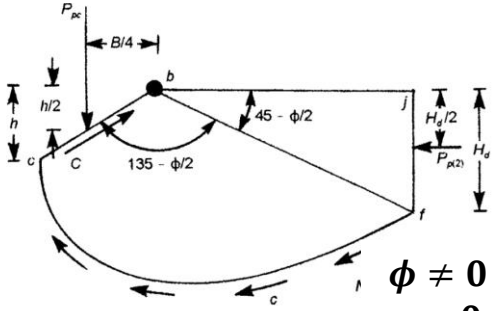
- $P_{pq} = q\,N_q = q\left(\frac{e^{2\,tan\phi\,(0.75\,\pi - 0.5\,\phi)}}{2\,cos^2(45+0.5\,\phi)}\right)$



$\phi \neq 0\,;\, c = 0\,;$
$q \neq 0\,;\, \gamma = 0$

- $P_{pc} = c\,N_c = c\,cot\,\phi\left(\frac{e^{2\,tan\phi\,(0.75\,\pi - 0.5\,\phi)}}{2\,cos^2(45+0.5\,\phi)}\right)$

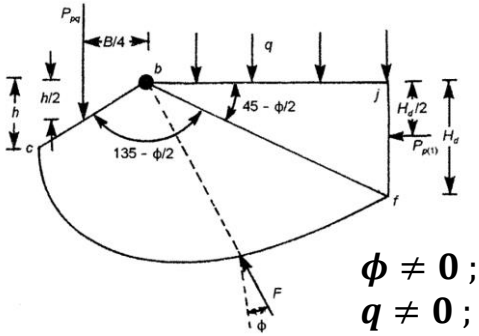
  $P_{pc} = c\,N_c = c\,cot\,\phi\,(N_q - 1)$



$\phi \neq 0\,;\, c \neq 0\,;$
$q = 0\,;\, \gamma = 0$

Capacidad de Carga (Primera estimación)

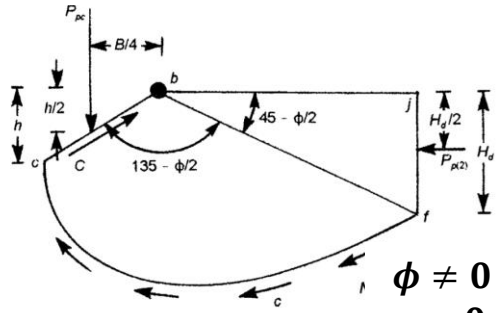
- $P_{pq} = q\,N_q = q\left(\frac{e^{2\,tan\phi\,(0.75\,\pi - 0.5\,\phi)}}{2\,cos^2(45+0.5\,\phi)}\right)$



$\phi \neq 0\,;\, c = 0\,;$
$q \neq 0\,;\, \gamma = 0$

- $P_{pc} = c\,N_c = c\,cot\,\phi\left(\frac{e^{2\,tan\phi\,(0.75\,\pi - 0.5\,\phi)}}{2\,cos^2(45+0.5\,\phi)}\right)$

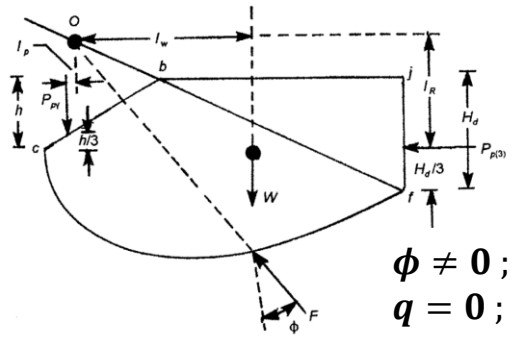
  $P_{pc} = c\,N_c = c\,cot\,\phi\,(N_q - 1)$



$\phi \neq 0\,;\, c \neq 0\,;$
$q = 0\,;\, \gamma = 0$

- $P_{p\gamma} = 1/2\;B\;\gamma\;N_\gamma$

  $P_{p\gamma} = \frac{1}{2}\,B\,\gamma\left(\frac{1}{2}\,K_{p\gamma}\,tan^2\phi - \frac{1}{2}\,tan\,\phi\right)$



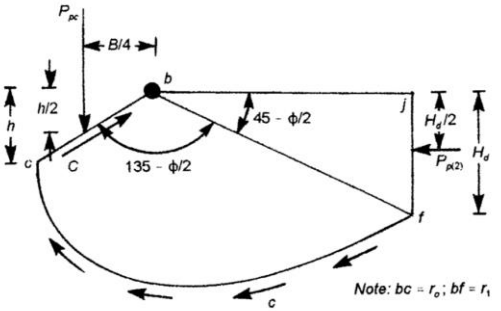
$\phi \neq 0\,;\, c = 0\,;$
$q = 0\,;\, \gamma \neq 0$

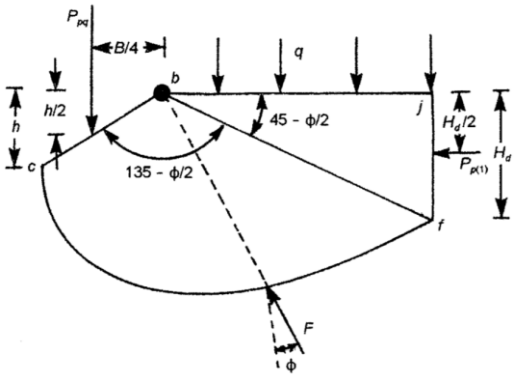
Capacidad de Carga (Primera estimación)

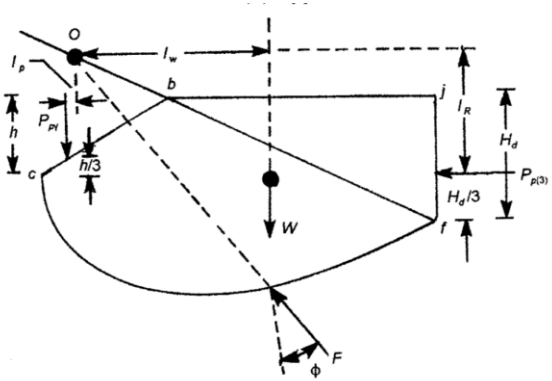
La resolución implica la superposición de efectos (El terreno en estado plástico no es lineal):

$$P_p = P_{pc} + P_{pq} + P_{p\gamma}$$

- $P_{pc} = c\, N_c$
  $(\phi \neq 0\,;\, c \neq 0\,;\, q = 0\,;\, \gamma = 0)$
- $P_{pq} = q\, N_q$
  $(\phi \neq 0\,;\, c = 0\,;\, q \neq 0\,;\, \gamma = 0)$
- $P_{p\gamma} = \frac{1}{2} B\, \gamma\, N_\gamma$
  $(\phi \neq 0\,;\, c = 0\,;\, q = 0\,;\, \gamma \neq 0)$







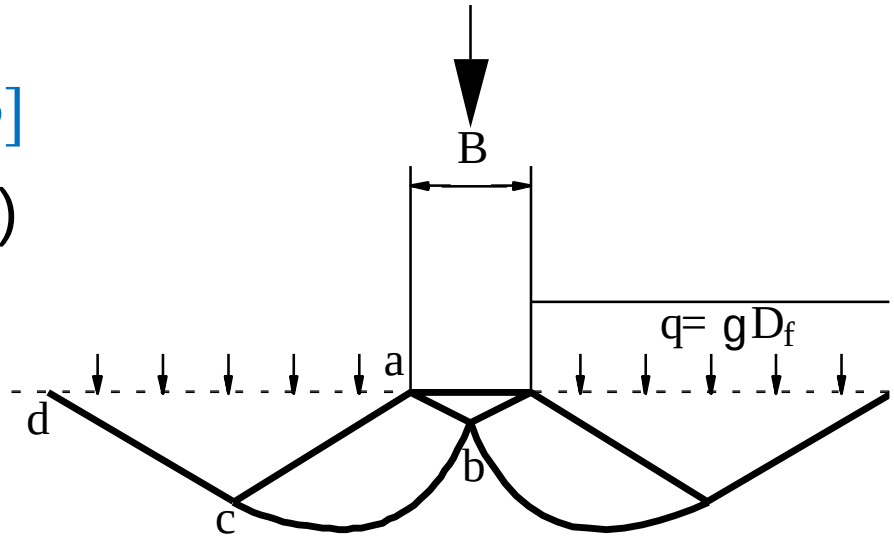
Zapatas: Fórmula de capacidad de carga de Terzaghi

La capacidad de carga total es la suma de tres mecanismos de falla diferentes

$$q_{ult} = cN_c[\phi] + qN_q[\phi] + \frac{1}{2}B\gamma N_\gamma[\phi]$$

Mecanismos de falla (incompatibles)

- $N_c = cot[\phi] \cdot (N_q - 1)$
- $N_q = e^{\pi\, tan[\phi]}\, tan^2[\pi/4 + \sigma/2]$
- $N_\gamma = 1.8 \cdot (N_q - 1) tan[\phi]$

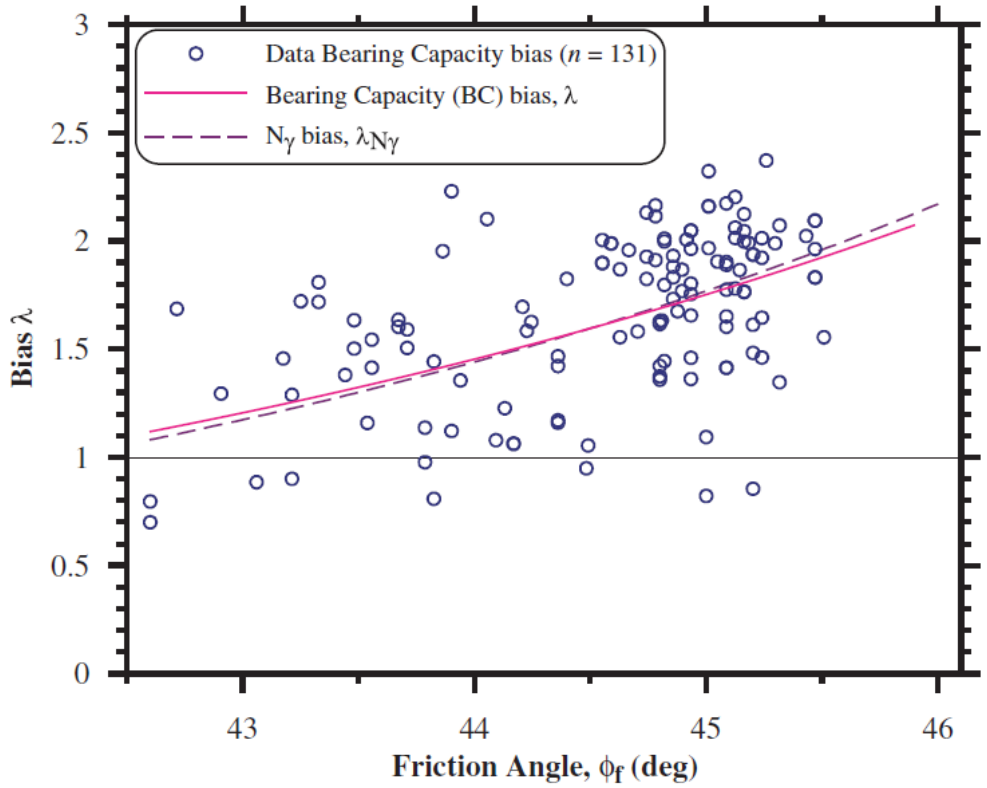


Todas las fórmulas trinómicas ignoran que el suelo reduce su volumen: sobre-estiman q_{ult}

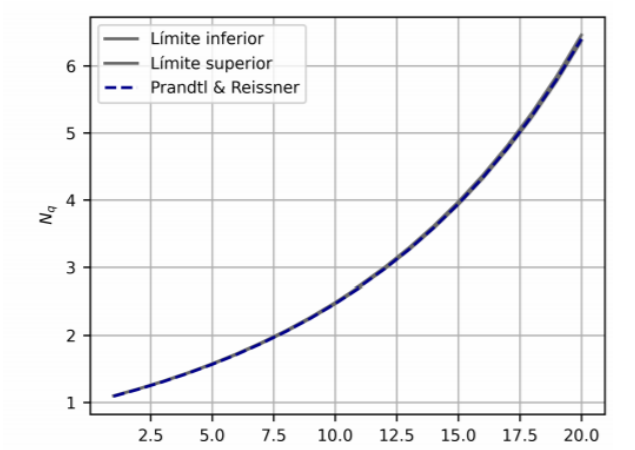
Distintas expresiones para el termino N_γ

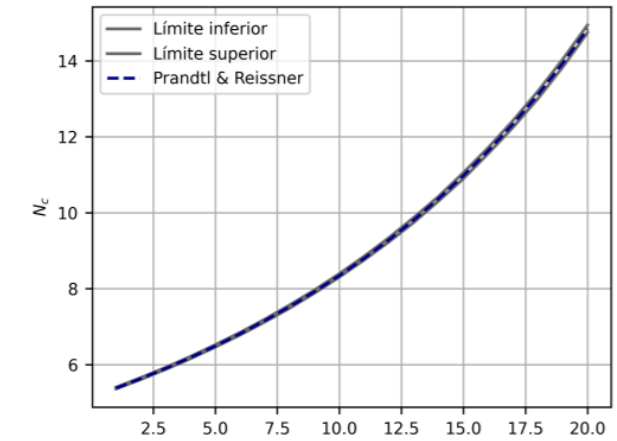
El término N_γ aporta casi todo el desvío de la fórmula de capacidad de carga (Solución no cerrada)

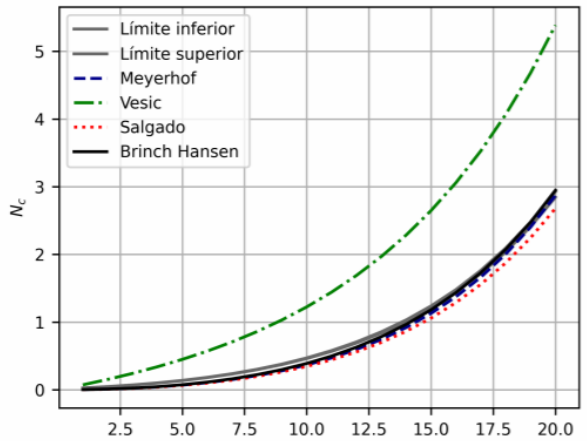
- Meyerhof (1963):
  $N_\gamma = \left(N_q - 1\right) \tan(1.4\,\phi)$
- Brinch Hansen (1970):
  $N_\gamma = 1.5\left(N_q - 1\right) \tan(\phi)$
- Vesic (1975):
  $N_\gamma = 2\left(N_q + 1\right) \tan(\phi)$
- Salgado (2008):
  $N_\gamma = \left(N_q - 1\right) \tan(1.32\,\phi)$

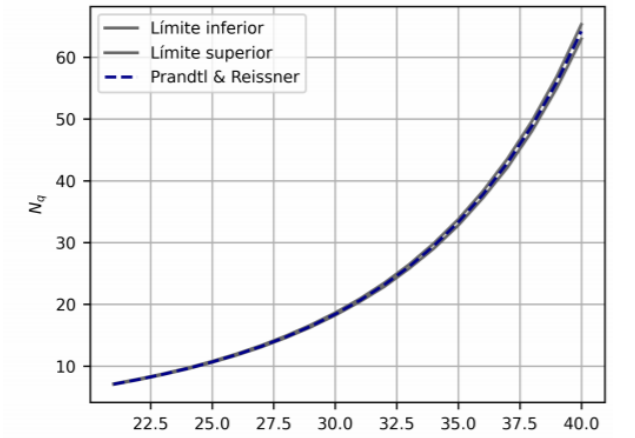


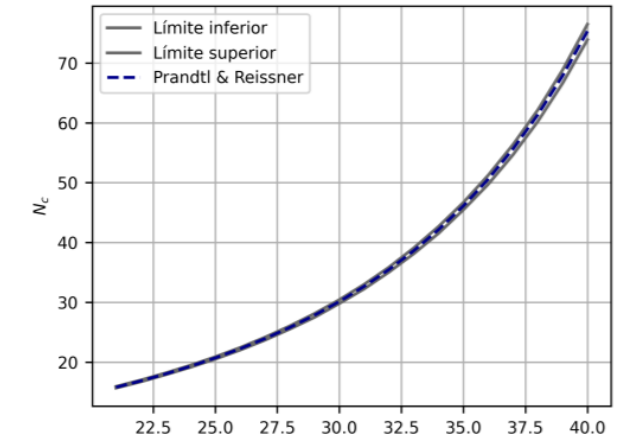
(NCHRP 2010)

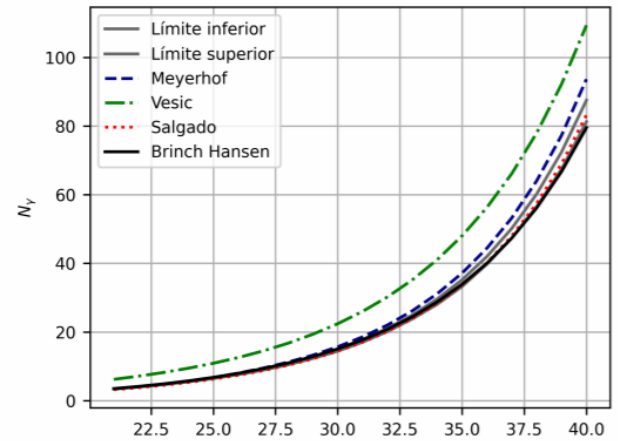

Límite inferior
Límite superior
Prandtl & Reissner
N_q

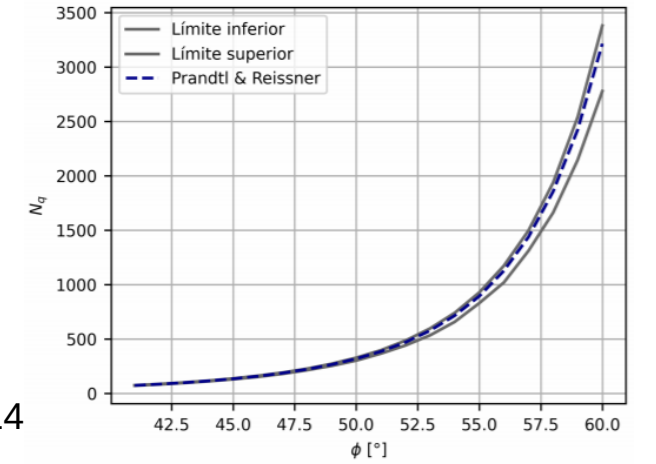

Límite inferior
Límite superior
Prandtl & Reissner
N_c

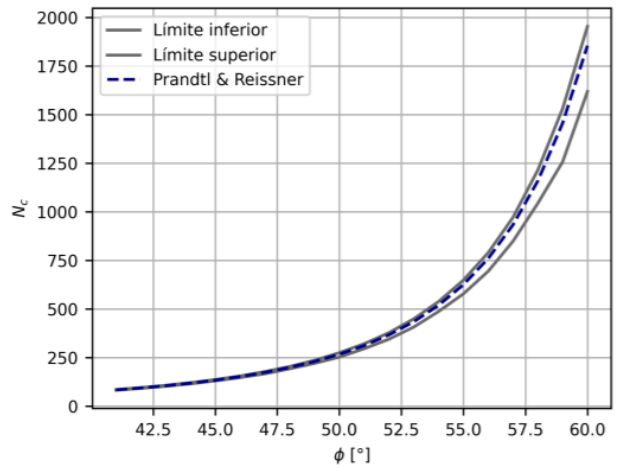

Límite inferior
Límite superior
Meyerhof
Vesic
Salgado
Brinch Hansen
N_c

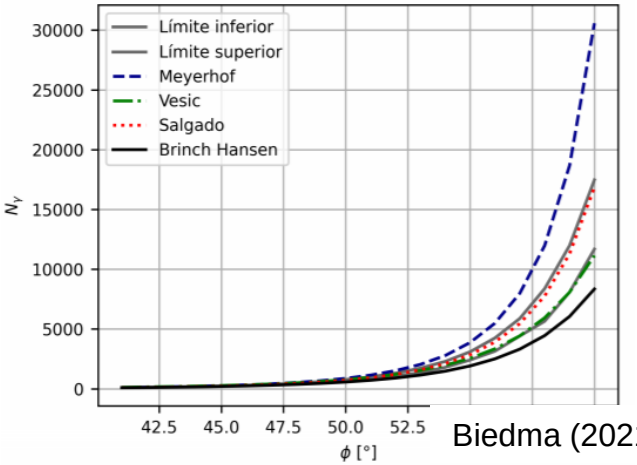

Límite inferior
Límite superior
Prandtl & Reissner
N_q


Límite inferior
Límite superior
Prandtl & Reissner
N_c


Límite inferior
Límite superior
Meyerhof
Vesic
Salgado
Brinch Hansen
N_γ


Límite inferior
Límite superior
Prandtl & Reissner
N_q
ϕ [°]


Límite inferior
Límite superior
Prandtl & Reissner
N_c
ϕ [°]

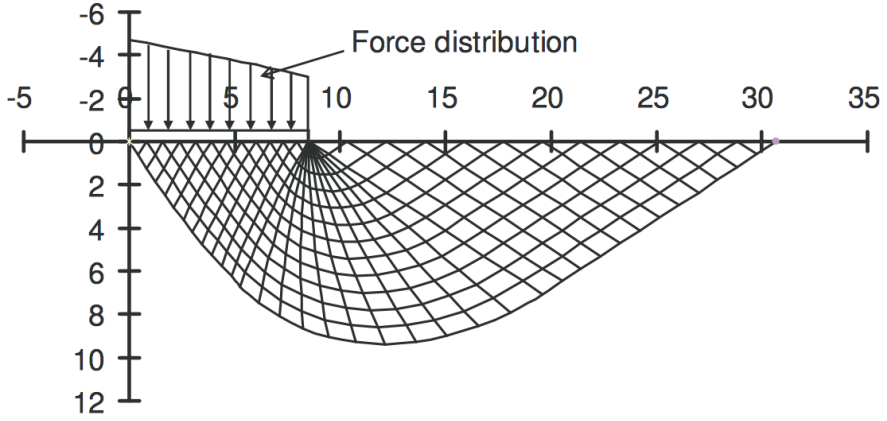

Límite inferior
Límite superior
Meyerhof
Vesic
Salgado
Brinch Hansen
N_γ
ϕ [°]

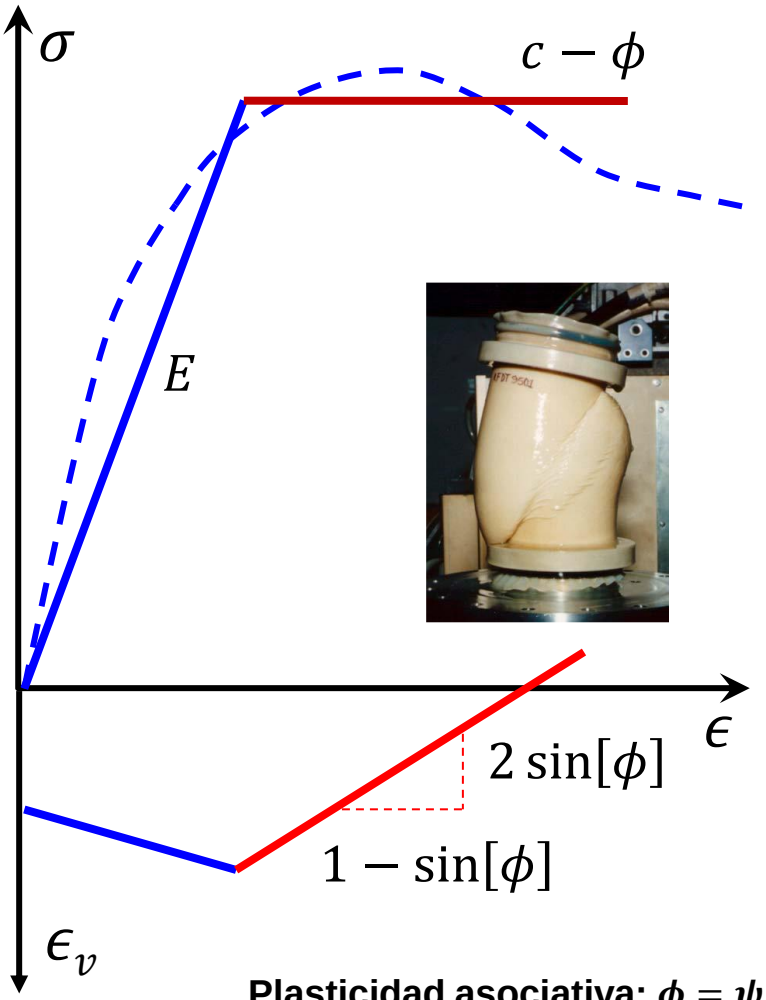
Biedma (2021)

¿Porqué andan mal las fórmulas de capacidad de carga?

Hipótesis: Suelo elastoplástico perfecto con plasticidad asociativa

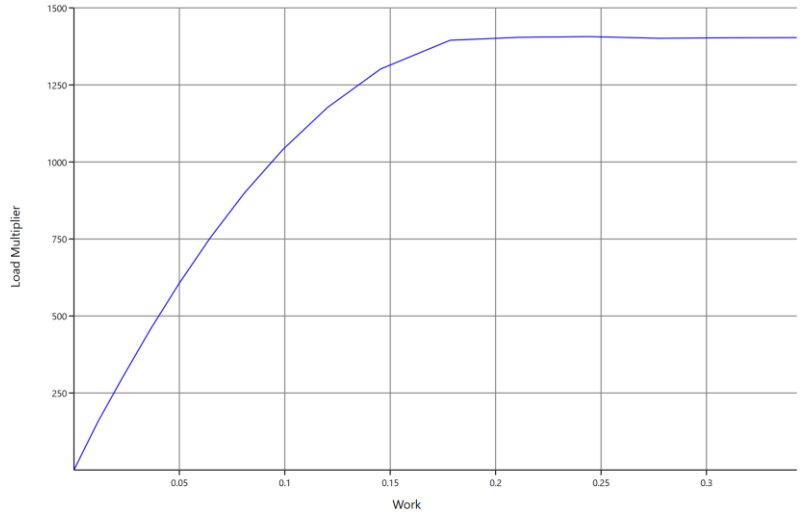
- Forma: espiral logarítmica
- El suelo dilata (muchísimo)
- Ignora compresión volumétrica por aumento de presión
- Ángulo de fricción interna constante



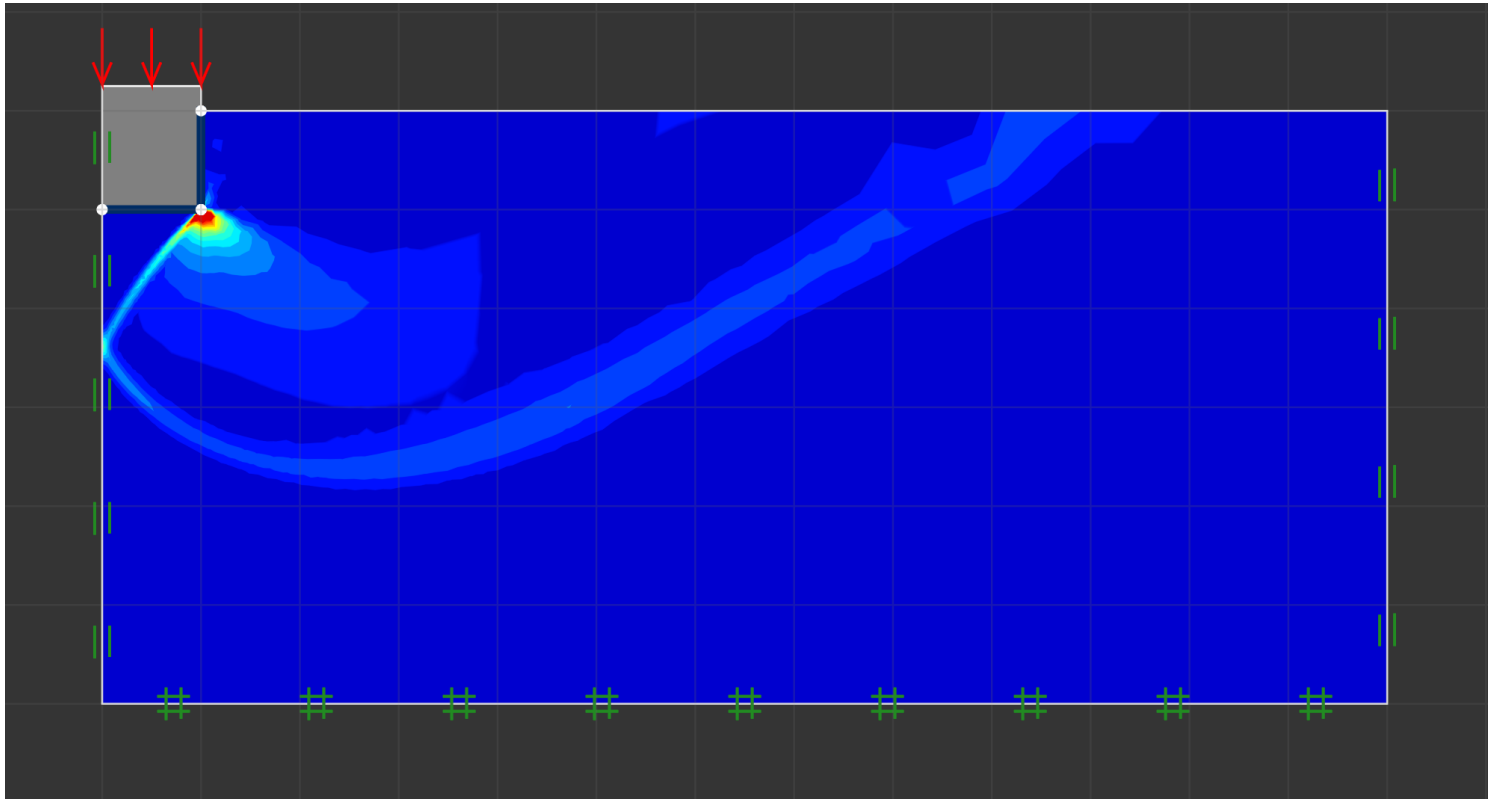


Plasticidad asociativa: $\phi = \psi$

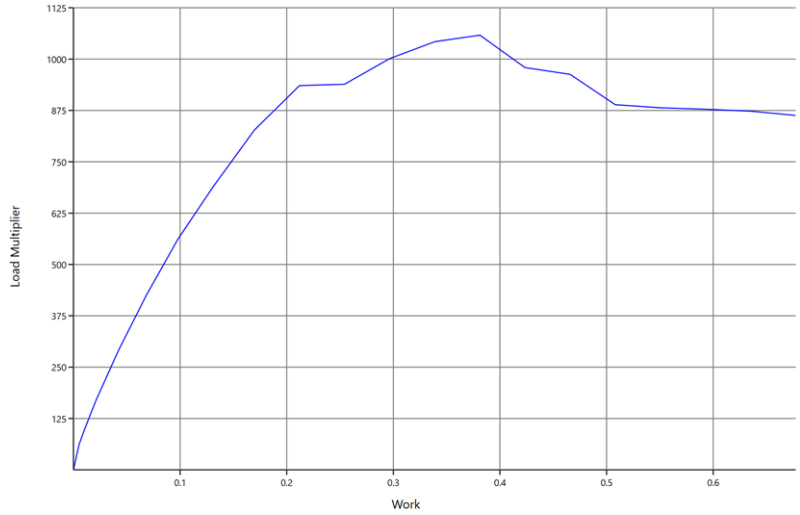
Influencia de la asociatividad



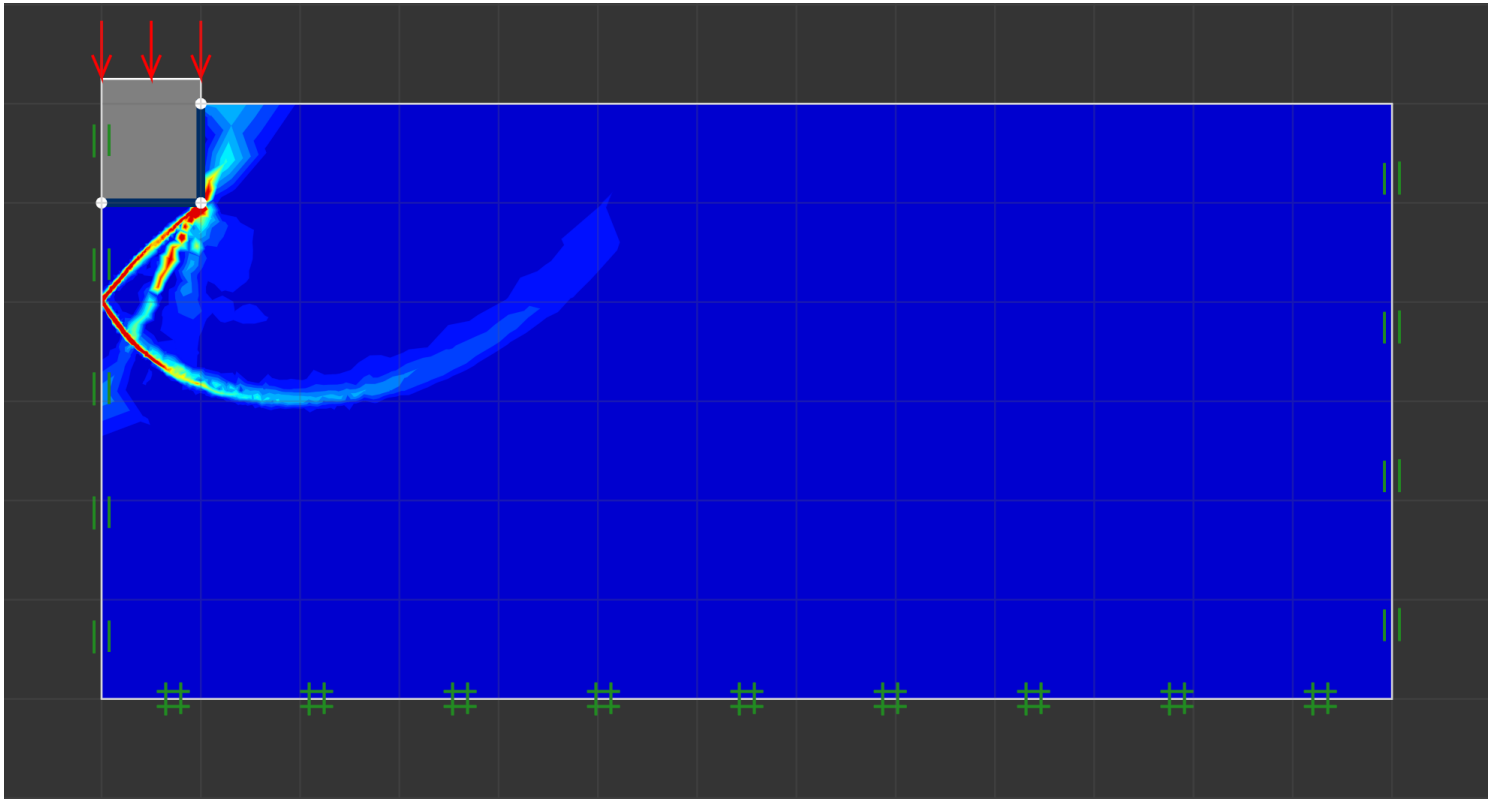
- Arena densa ($\phi = 35°$)
  Asociativo (1402 kN/m)



Influencia de la asociatividad



- Arena densa ($\phi = 35°$)
  No asociativo (863 kN/m)



Formula general de capacidad de carga

La formula generalizada de capacidad de carga incorpora factores (en general empíricos) que tienen en cuenta forma de la fundación, excentricidad, inclinación, profundidad:

$$q_u = \frac{Q_u}{B'\,L'} = cN_c\zeta_{cr}\zeta_{cs}\zeta_{ci}\zeta_{ct}\zeta_{cg}\zeta_{cd} + qN_q\zeta_{qr}\zeta_{qs}\zeta_{qi}\zeta_{qt}\zeta_{qg}\zeta_{qd} + 0.5\,\gamma B' N_\gamma \zeta_{\gamma r}\zeta_{\gamma s}\zeta_{\gamma i}\zeta_{\gamma t}\zeta_{\gamma g}\zeta_{\gamma d}$$

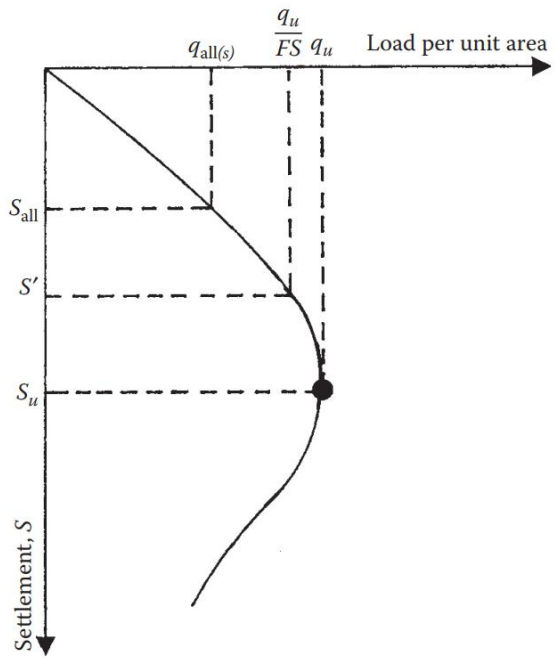
Esta expresión general no tiene en cuenta los efectos acoplados de la carga vertical (V), horizontal (H) y el momento (M).

El problema de los asentamientos

En la gran mayoría de los casos, el problema son los asentamientos y no las fallas por corte.

El asentamiento total de las fundaciones (S_T) puede estar asociado a numerosos factores:

- Cargas sobre la fundación
- Suelos expansivos
- Cambios en el nivel freático
- Problemas de erosión
- Vibraciones



Método de Schmertmann (1978)

$$S_i = C_1\, C_2\, C_3\, \boldsymbol{q_{net}} \sum_{z=0}^{z=z_2} \frac{I_z}{\boldsymbol{E_s}}\, \boldsymbol{\Delta z}$$

- $\boldsymbol{q_{net}}$: Presión neta de contacto: $q_{net} = q_{total} - \sigma'_0$
- σ'_0: Presión efectiva vertical en el plano de fundación
- q_{total}: Presión aplicada en el plano de la fundación
- $\boldsymbol{E_s}$: Módulo de elasticidad del terreno
- $\boldsymbol{\Delta z}$: Espesor de la capa de suelo

Método de Schmertmann (1978)

$$S_i = C_1\, C_2\, C_3\, q_{net} \sum_{z=0}^{z=z_2} \frac{I_z}{E_s}\, \Delta z$$

Factores de corrección:

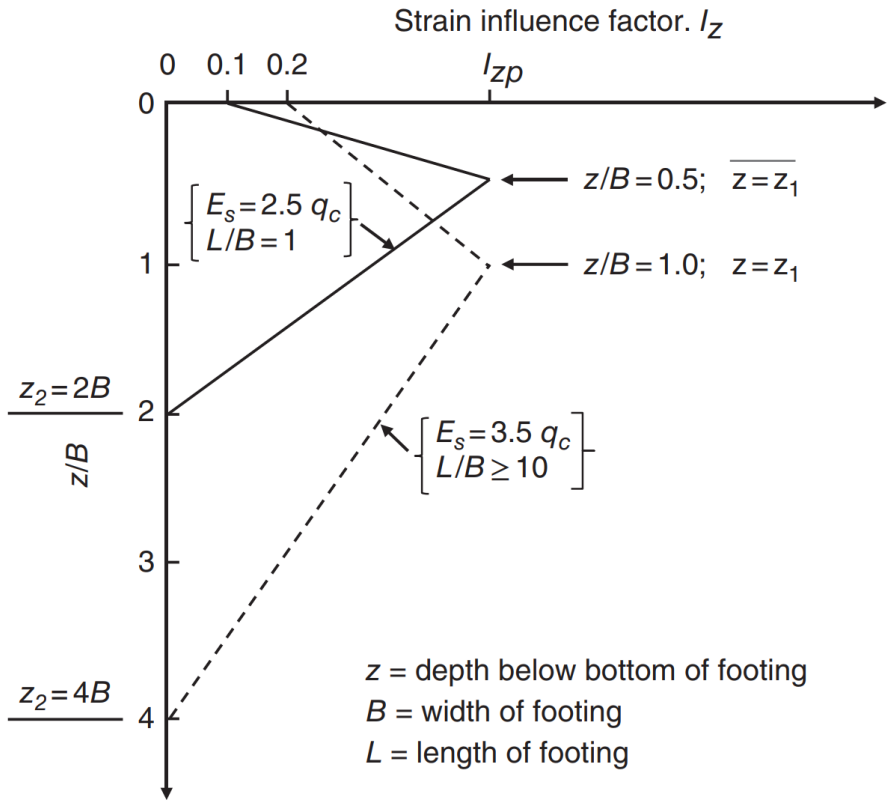
- C_1: Corrección por profundidad: $C_1 = 1 - 0.50\, \sigma_0' / q_{net}$
- C_2: Corrección por creep: $C_2 = 1 + 0.20 \cdot \log(t/0.10)$
- C_3: Corrección por forma: $C_3 = 1.03 - 0.03\, (L/B) \geq 0.73$

Método de Schmertmann (1978)

$$S_i = C_1\, C_2\, C_3\, q_{net} \sum_{z=0}^{z=z_2} \frac{I_z}{E_s}\, \Delta z$$

- z_2: Profundidad en la cual I_z es nulo
- I_z: Factor de influencia

$$I_{zp} = 0.5 + 0.1 \sqrt{q_{net}/\sigma'_{zp}}$$



Cálculo de capacidad de carga de fundaciones superficiales

Fundación circular en la Formación Pampeano

- $B = 3.0\ m$ | $\mathrm{D} = 1.5\ \mathrm{m}$
- $\gamma_s = 19\ kN/m^3$ | $\phi' = 32°$ | $c' = 10\ kPa$ | $E_{50}^{ref} = 50\ MPa$

Capacidad de carga por Brinch – Hansen:

$$q_u = 2200\ kPa \mid Q_u = 15500\ kN \mid Q_{adm} = 5200\ kN$$

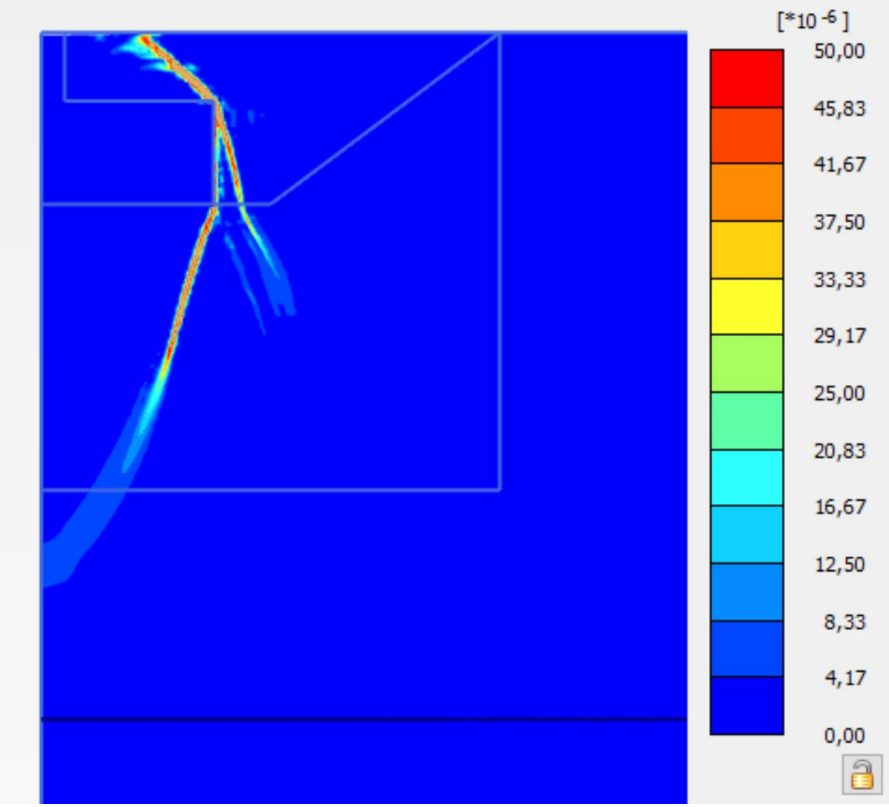
Carga para un asentamiento de 25 mm (Schmertmann):

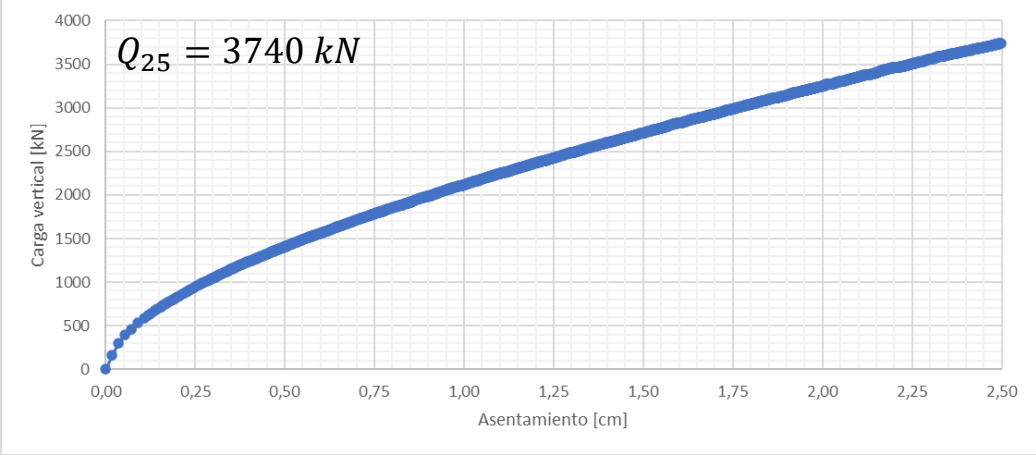
$$Q_{25} = 3250\ kN$$

Cálculo de capacidad de carga de fundaciones superficiales

.UBAfiuba
FACULTAD DE INGENIERÍA

Verificación mediante modelo numérico





El concepto de la “presión admisible”

La presión de trabajo depende del tamaño de la zapata

Entonces: es incorrecto usar la misma presión de contacto para zapatas de diferentes tamaños

Pero es práctico, y se usa en el 99% de los casos

Entonces, para elegir una “presión admisible”

- Se analiza la zapata mas cargada
- Se verifican los estados límites para esa zapata
- Se divide la carga máxima por el área $= p_{adm}$
- Se usa esa p_{adm} para calcular el área de todas las demás zapatas

El factor de seguridad a escala estructural

Category	Typical Structures	Characteristics of the Category	$FoS = Q_{ult}/P$	
			Thorough and Complete Soil Exploration	Limited Soil Exploration
A	Railway bridges, warehouses, blast furnaces, hydraulic, retaining walls, silos	Maximum design load likely to occur often; consequences of failure disastrous	3.0	4.0
B	Highway bridges, light industrial and public buildings	Maximum design loads may occur occasionally, consequences of failure serious	2.5	3.5
C	Apartment and office buildings	Maximum design load unlikely to occur	2.0	3.0