

Curso: HORMIGÓN ESTRUCTURAL 1

MÓDULO 11: CIMENTACIONES

Agustin Spalvier (aspalvier@fing.edu.uy)

1^{er} Semestre - 2023

Universidad de la República - Uruguay



• Introducción

- Definición
- Clasificación y criterios de empleo

• Zapatas

- Generalidades
- Cálculos geotécnicos
- Cálculos estructurales
 - Zapatas rígidas
 - Zapatas flexibles
 - Zapatas corridas

• Cabezales

- Generalidades
- Cabezal de dos pilotes

ACLARACIÓN: Estas transparencias se preparan únicamente como una guía para las clases, las cuales cumplen la función de ser una presentación de los temas que el estudiante debe aprender para aprobar el curso, indicados en la bibliografía.

Notas basadas en los apuntes del curso 2017 de Ma. Laura Reboredo.

Bibliografía: Jiménez Montoya – 15ª Ed. – Cap. 25.1; 25.2.1, 25.2.2, 25.2.3, 25.2.6 (solo *intro* y casos *a*) y *c*), 25.3, 25.8.1, 25.8.2, 25.9.1, 25.9.2, 25.9.3

EHE-08 - Art. 58.1, 58.2 , 58.3 , 58.4 (No 58.4.1.2.2) , 58.4.2 (No 58.4.2.2) , 58.8

Introducción



*Ejecución de zapatas
Edificio Rambla – Montevideo*



*Losa de cimentación
Complejo industrial Montes del Plata – Colonia*

Introducción



*Ejecución de cimentación con pilotes
Puerto de Piriápolis - Maldonado*



*Ejecución de cimentación con pilotes
Edificio Lago - Canelones*

CIMENTACIONES: *parte de la estructura encargada de transmitir las cargas al terreno.*

Se clasifican, según la cota de apoyo sobre el terreno, en:

- **Superficiales o directas:**

- **Zapatas:** cimentaciones superficiales de zonas aisladas de la estructura. Se emplean cuando el terreno tiene, a poca profundidad, una resistencia media o alta respecto a las cargas a transmitir.
- **Losas de cimentación:** cimentaciones superficiales de toda la planta de la estructura. Se emplean en terrenos poco resistentes o bajo estructuras pesadas y poco deformables (p. ej. tanques de contención de líquidos). No las trataremos en este curso.

- **Profundas:**

- **Cabezales y pilotes:** se emplean cuando el terreno resistente está a grandes profundidades y, por lo tanto, no resulta económico cimentar con zapatas (la excavación necesaria para realizar cimentación directa sería muy costosa).

Para definir las cimentaciones se realizan dos tipos de cálculos:

- **Cálculos geotécnicos,**

en los que el elemento a verificar es el terreno. Para estos cálculos se trabaja con las **acciones características** (sin mayorar) y las comprobaciones se refieren a **valores admisibles** (que incluyen los coeficientes de seguridad). La información relativa al terreno se obtendrá de *informes geotécnicos*.

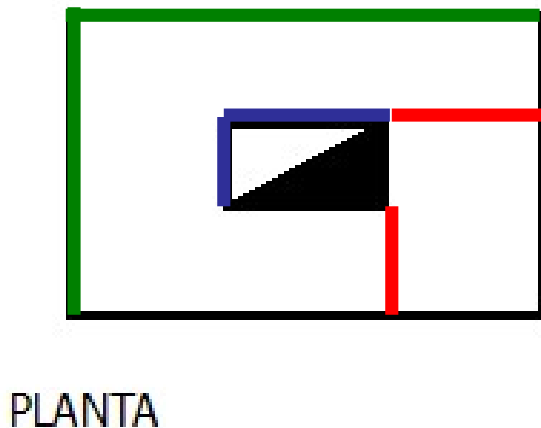
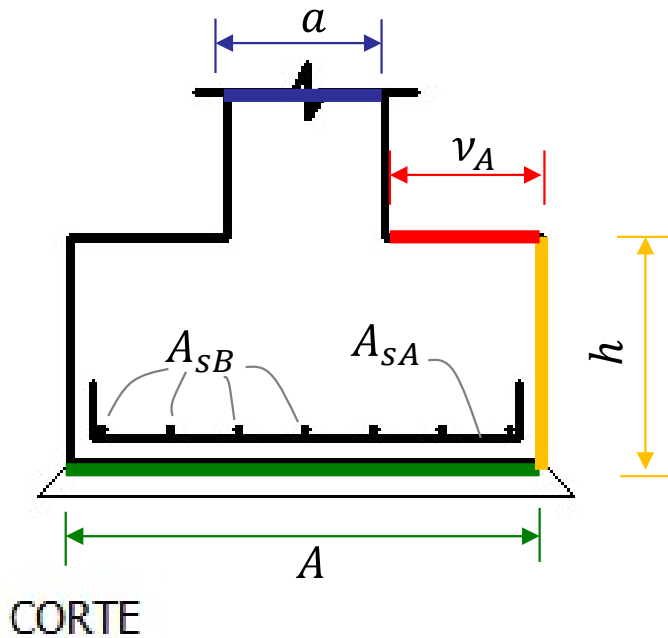
En este curso verificaremos únicamente la resistencia del suelo supuesta con distribución lineal. Los cálculos de asentamientos, estabilidad general, equilibrio, vuelco y deslizamiento se ven en el curso de Introducción a la Mecánica de Suelos.

- **Cálculos estructurales,**

en los que se **verifican los elementos de cimentación de hormigón armado**. Estos cálculos se efectúan en **Estado Límite**, por lo que se **deben utilizar los Coeficientes de Seguridad correspondientes** a materiales y acciones. **En H1**, como veremos únicamente el **ELU**, se trabajará con las acciones mayoradas y las capacidades resistentes minoradas.

Dentro de los cálculos estructurales, en este curso veremos únicamente las verificaciones de estados límites últimos. De todas formas vale remarcar que, en estas estructuras, los **problemas de durabilidad** son especialmente graves ya que, al estar enterradas, su conservación y reparación es dificultosa y cara. Por estas razones, los estados límite de servicio resultan, en muchos casos, dimensionantes.

Zapatas - Generalidades



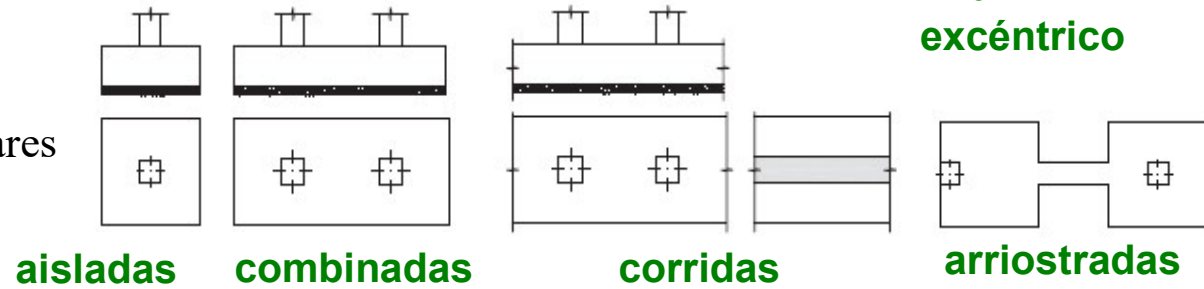
Nomenclatura utilizada:

- $a \times b$: dimensiones del pilar.
- $A \times B$: dimensiones en planta de la zapata; se obtienen del cálculo geotécnico.
- h : canto (altura) de la zapata; se obtiene del cálculo estructural.
- v_A, v_B : vuelo según cada dirección.
- A_{SA}, A_{SB} : armadura según cada dirección.

Hormigón de limpieza: capa de hormigón no estructural, de unos 10 cm de espesor. Su objetivo es generar una superficie limpia y uniforme para hormigonar directamente sobre ella (la cara inferior de la zapata no se encofra).

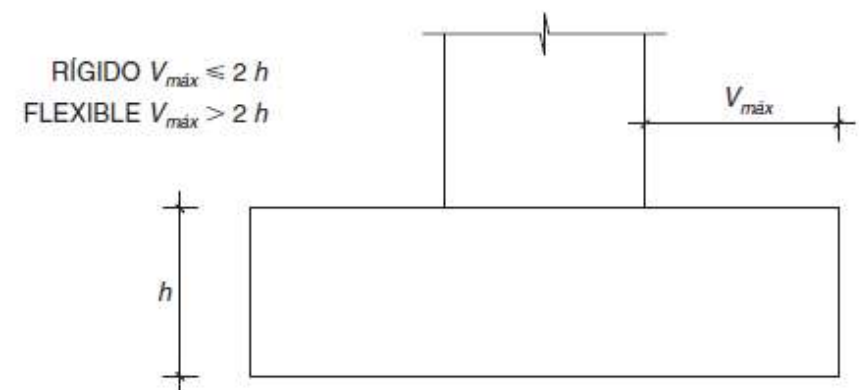
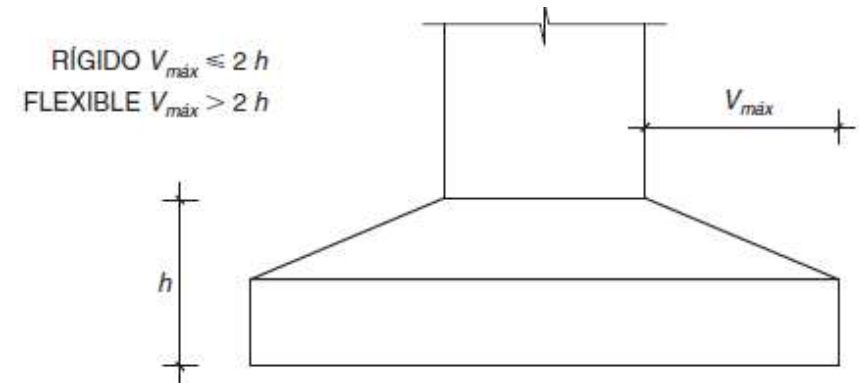
Por las descargas que reciben, pueden ser:

- **Aisladas**, si soportan un solo pilar.
- **Combinadas**, si soportan dos o más pilares (en número reducido)
- **Corridas**, bajo una serie de pilares alineados o bajo muro.
- **Arriostradas**: son casos particulares de los anteriores, cuando varias zapatas se unen por medio de vigas riostras para centrar la carga excéntrica (no lo trataremos en este curso).



Por la relación entre sus dimensiones, pueden ser:

- **Flexibles**, $v_{m\acute{a}x} > 2h$: su cálculo se hace mediante la teoría general de flexión, como si fuese una losa o una viga plana (dimensionamiento en base a los momentos flectores y esfuerzos cortantes).
- **Rígidas**, $v_{m\acute{a}x} \leq 2h$: para su cálculo es necesario aplicar el método de bielas y tirantes. **Zona D**



UNIT clasifica en 4 tipos: 2 tipos de rígidas, 2 de flexibles.

- Para **valores altos de tensión admisible del terreno** ($\sigma_{adm} > 0,25\text{MPa}$) bastan unas dimensiones en planta relativamente reducidas, y suelen resultar **zapatas rígidas**.
- Para **valores medios y bajos** de tensión admisible del terreno, son necesarias dimensiones en planta mayores, por lo que suelen resultar **zapatas flexibles**.

Por razones económicas, siempre **se busca** que el **canto de la zapata (h)** sea el **menor posible**, mientras se cumpla con lo siguiente:

- Si el pilar que descarga es de hormigón, **h deberá** ser tal que se pueda **alojar la longitud de anclaje** de las armaduras del pilar (armaduras en compresión)
- Recomendación: **$h \geq 0,30\text{m}$** .

– Ejemplo para referencia:

TABLAS DE TENSIÓN ADMISIBLE

Recomendados por la Norma brasileña de Fundaciones (NBR 6122)

Clase	Descripción	σ_{adm} (MPa)
1	Rocas sanas, sin laminación	3.0
2	Rocas laminadas	1.5
3	Rocas alteradas o en descomposición	depende
4	Suelos granulares conglomerados	1.0
5	Gravas compactas	0.6
6	Gravas sueltas	0.3
7	Arenas muy compactas	0.5
8	Arenas compactas	0.4
9	Arenas medianamente compactas	0.2
10	Arcillas duras	0.3
11	Arcillas rígidas	0.2
12	Arcillas medias	0.1
13	Limos duros (muy compactos)	0.3
14	Limos rígidos (compactos)	0.2
15	Limos medios (medianamente compactos)	0.1

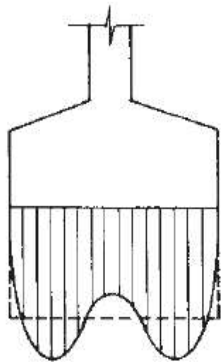
**Determinar
con ensayos
geotécnicos**

Zapatas – Cálculos geotécnicos

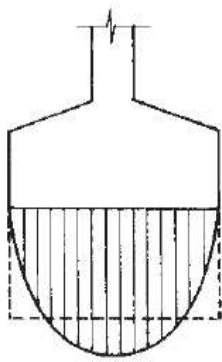
En general, se debe comprobar:

- Que las tensiones sobre el terreno no superen las admisibles.
- Que los asentamientos del terreno no superen los admisibles (no lo veremos en este curso).

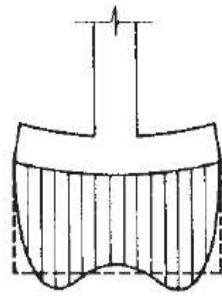
Distribución de tensiones sobre el terreno: depende del tipo de suelo y de la rigidez de la zapata.



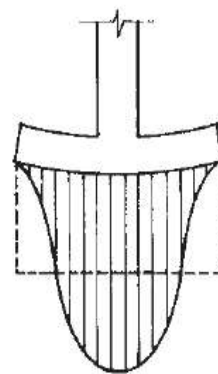
a) Zapata rígida
suelo cohesivo



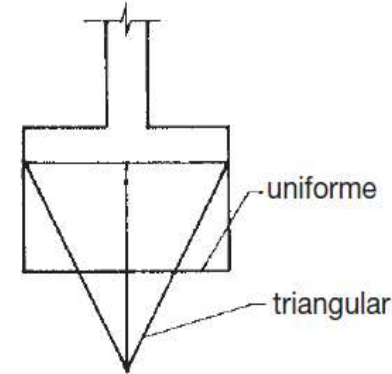
b) Zapata rígida
suelo sin cohesión



c) Zapata flexible
suelo cohesivo



d) Zapata flexible
suelo sin cohesión



e) Distribuciones
empleadas en
la práctica

En el caso d): ¿con qué distribución estoy del lado de la seguridad en el cálculo geotécnico?
¿y en el cálculo estructural?

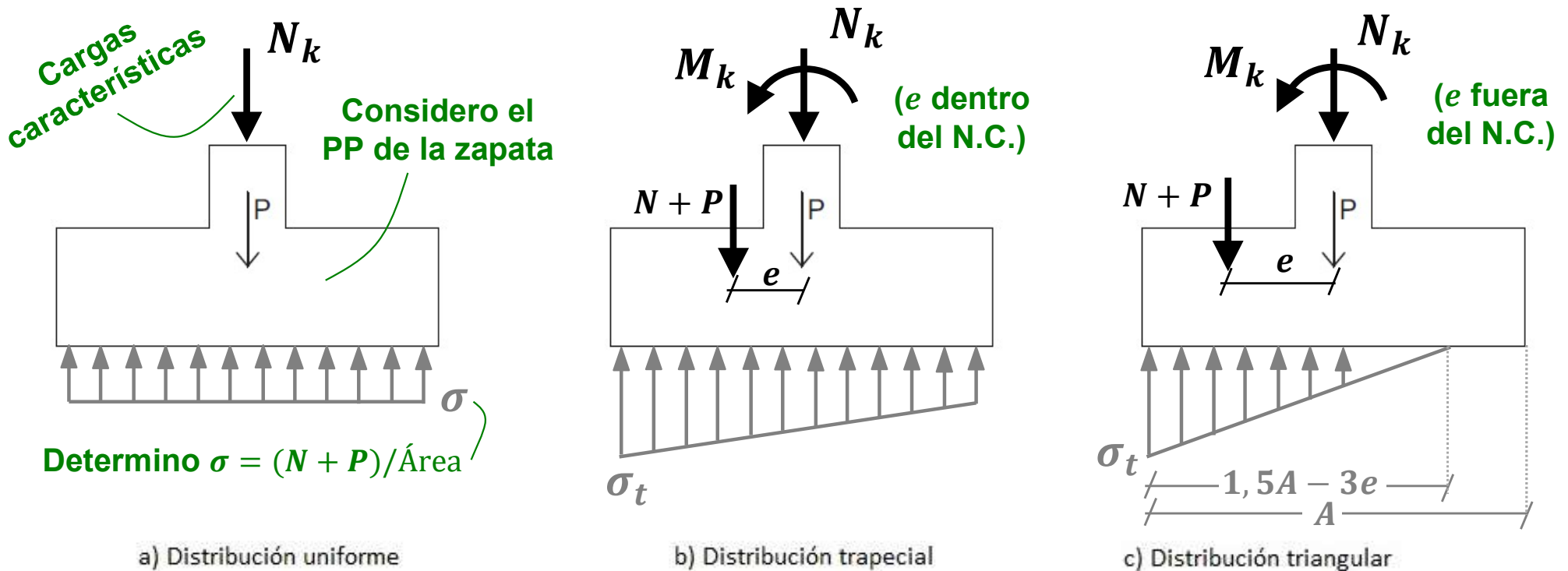
En la práctica (y en el curso), estas distribuciones se asumen uniformes (o variables linealmente si tenemos descargas excentricas).

Zapatas – Cálculos geotécnicos

Distribución simplificada de tensiones sobre el terreno (distribución elástica):

Zapatas con carga centrada: la tensión máxima obtenida no debe superar la tensión admisible del terreno.

Zapatas con carga excéntrica: se admite que la tensión máxima en el borde supere la tensión admisible del terreno en 1,25 veces.



Verfíco: $\sigma < \sigma_{adm}$

$\sigma_t < 1,25 \sigma_{adm}$

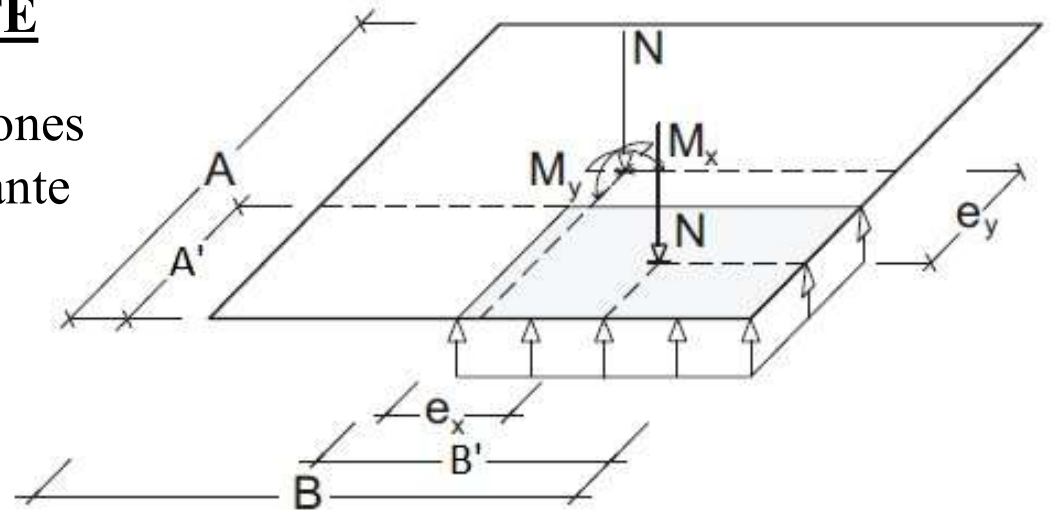
$\sigma_t < 1,25 \sigma_{adm}$

Obs: proceso iterativo para considerar el peso propio de la zapata

Si la descarga es excéntrica en dos direcciones, la determinación de la distribución de tensiones en el terreno se vuelve más compleja. Usaremos entonces el siguiente método simplificado (admitido por el CTE y el EC-7):

MÉTODO DEL ÁREA EQUIVALENTE

Supone una distribución plástica de tensiones en un *área cobaricéntrica* con la resultante vertical de las acciones sobre la zapata.



Los lados del área cobaricéntrica A' y B' cumplen: $A' \times B' = \frac{N}{\sigma_{adm}}$

Los lados de la zapata A y B se calculan según las siguientes expresiones:

$$A = 2e_y + A' \quad B = 2e_x + B'$$

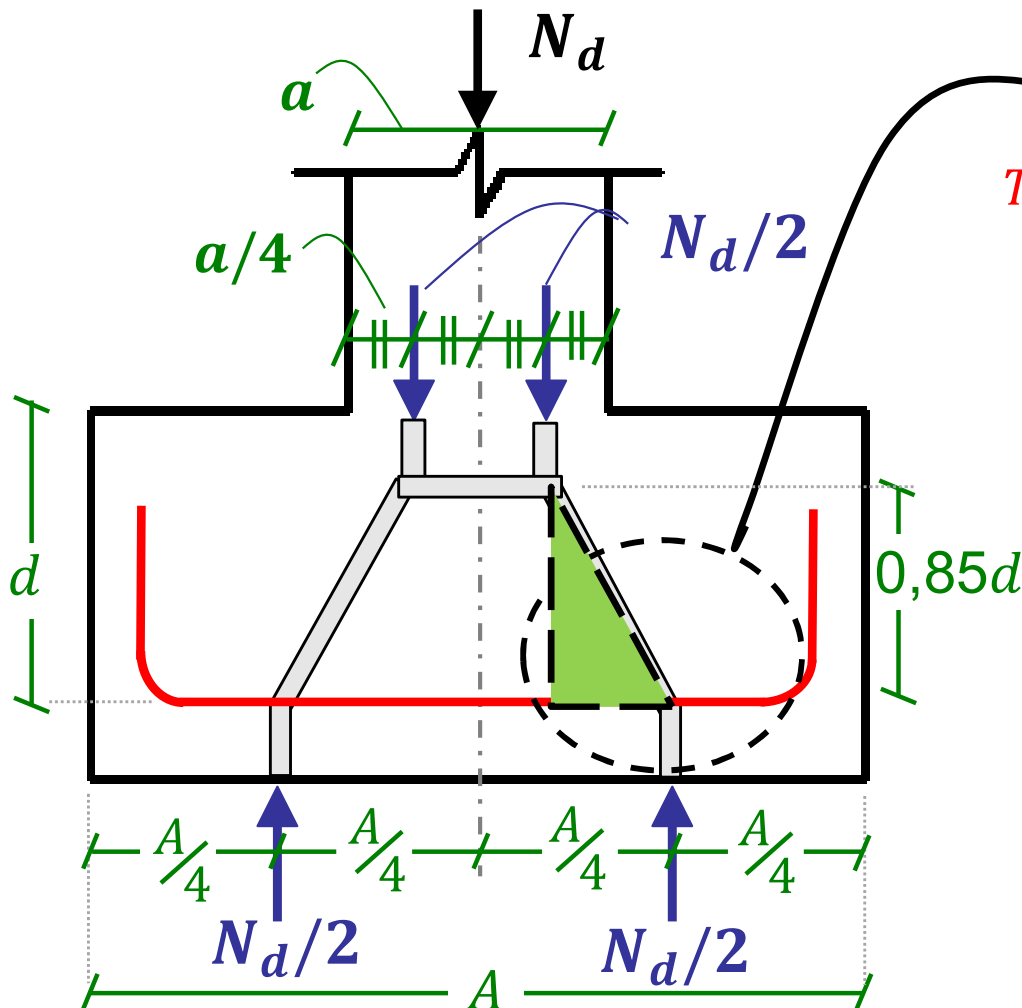
Para que la zapata resulte simétrica

Zapatas rígidas – Cálculo estructural

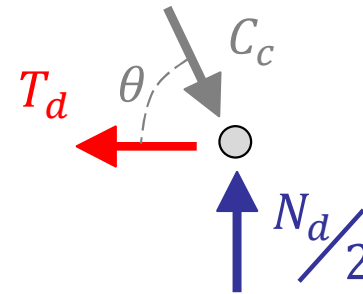
RECORDAR: como estamos trabajando con ByT, $f_{yd} \leq 400$ MPa.

CASO 1: DESCARGA CENTRADA

ESQUEMA GENERAL DE BIELAS Y TIRANTES



Equilibrio de nudo:



$$C_c \sin \theta = \frac{N_d}{2}$$

$$C_c \cos \theta = T_d \Rightarrow$$

$$\tan \theta = \frac{N_d}{2T_d} \Rightarrow$$

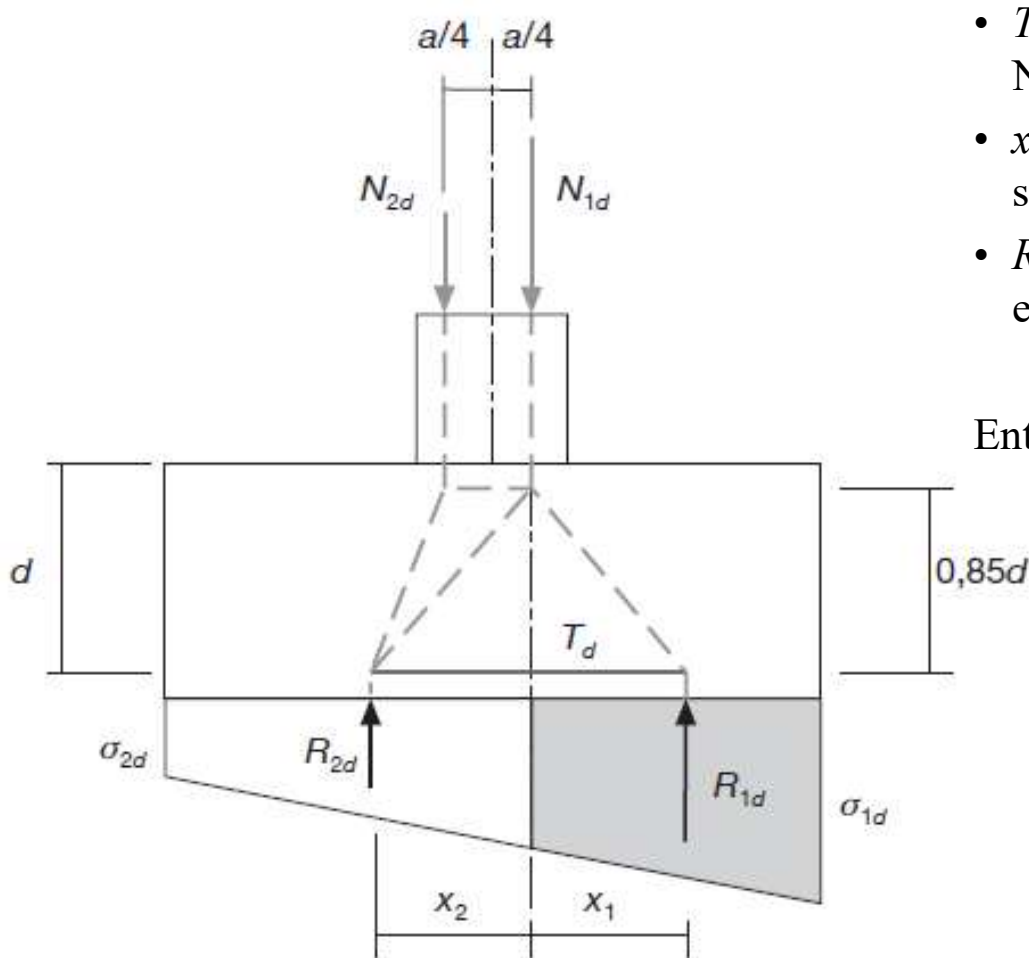
$$T_d = \frac{N_d}{2 \tan \theta} = \frac{N_d}{2} \frac{1}{\frac{0,85 d}{\frac{A}{4} - \frac{a}{4}}} \Rightarrow$$

$$T_d = \frac{N_d(A - a)}{6,8 d} \Rightarrow$$

Para hallar A_s calculo: $T_d = f_{yd} A_s$

(donde A_s es el área total de acero en la dirección de la dimensión A)

CASO 2: DESCARGA EXCÉNTRICA DENTRO DEL NÚCLEO CENTRAL



- *Trapezio sombreado*: dividido por la línea de acción de N_{1d} .
- x_1 : distancia del centro de gravedad del trapecio sombreado a la línea de carga de N_{1d} .
- R_{1d} : resultante de las tensiones del trapecio sombreado, en el ancho de la zapata.

Entonces:

$$T_d = \frac{R_{1d}}{0,85d} x_1 = A_s \cdot f_{yd}$$

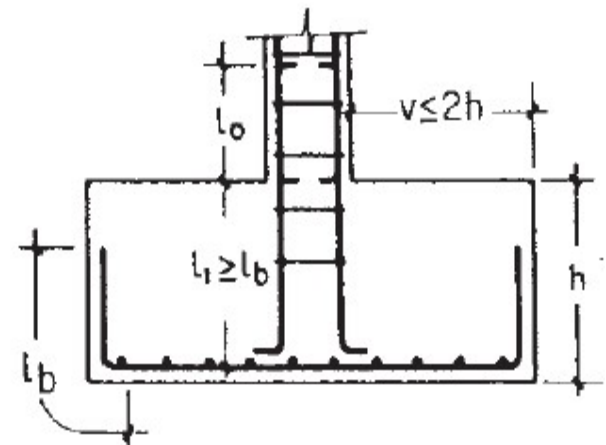
Queda de tarea deducir las expresiones de R_{1d} y de x_1 en función de M_d , N_d , a y A .

ESQUEMA GENERAL DE BIELAS Y TIRANTES

Zapatas rígidas – Anclaje y disposición de armaduras

- Deberá cumplirse con las cuantías geométricas mínimas exigidas por la EHE-08 (Tabla 42.3.5):
 - $\rho \geq 1 \text{ ‰}$ para acero B 400 SD
 - $\rho \geq 0,9 \text{ ‰}$ para acero B 500 SD
- Dichas cuantías se dispondrán en la cara inferior de la zapata, en cada dirección.
- Se recomienda no emplear barras con diámetros menores de 12mm, con separaciones máximas entre barras de 0,30m.
- Las armaduras formarán un emparrillado que se prolongará sin reducción hasta los bordes de la zapata.
- Su anclaje se realizará doblando las barras (con diámetro de doblado grande, según norma) y prolongándolas una longitud de anclaje.

(ver ByT de EHE y Calavera Cap. 63.7 por más info. de anclaje de armadura de zapatas)



Ejemplo

--	--	--

- **El dimensionamiento de zapatas flexibles consiste en:**

- 1. Comprobación a tensiones tangenciales (cortante y punzonamiento)
 - Determinación del canto de la zapata.
- 2. Cálculo a flexión:
 - dimensionamiento de la armadura principal.

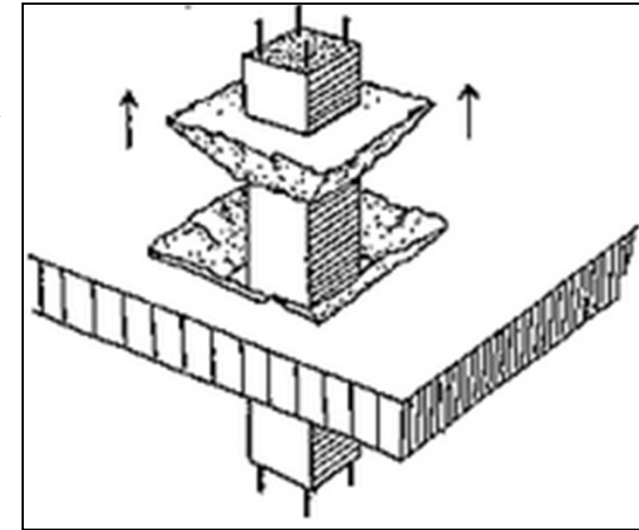
- **Punzonamiento**

- Es el esfuerzo cortante que se produce alrededor de una carga puntual.
 - Dicho de otra forma: mientras que el cortante aparece en elementos lineales, el punzonamiento aparece en elementos superficiales (caso típico: edificios de losas sin vigas).
 - Dimensionado en diapo. 19

- **Efecto de carga tangencial dominante:**

- Para zapatas largas y estrechas, que actúan esencialmente como vigas, el comportamiento de las tensiones tangenciales se asemejará al del cortante.
- Para zapatas trabajando a flexión en dos direcciones, el comportamiento de las tensiones tangenciales se asemejará al del punzonamiento.

- **El canto óptimo de una zapata flexible es el mínimo para el cual no se necesita disponer armadura de cortante ni de punzonamiento.**



• 1a. Comprobación a cortante

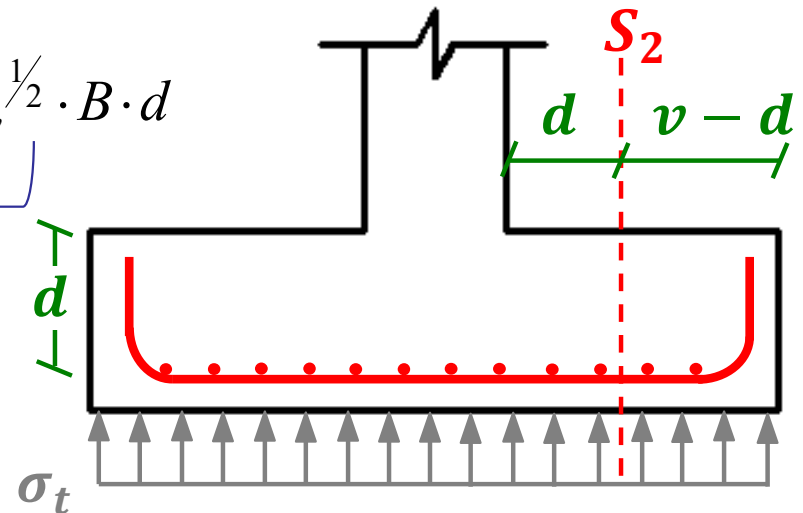
- *Art. de cimentaciones (Art. 58.4.2.1.2) remite a la verificación de cortante (Art. 44)*
- Se realizará en la *sección de referencia* S_2 , situada a una distancia d de la cara del soporte. Esta sección de referencia es plana, perpendicular a la base de la zapata, y tiene en cuenta la sección total de dicho elemento de cimentación.
- Se comprobará la resistencia a cortante en la dirección del vuelo mayor.
- Buscaremos no colocar armadura de cortante, por lo que la verificación será la de piezas sin armadura de corte: $V_d \leq V_{u2}$

• En caso de carga centrada: $\rightarrow V_d = \sigma_t \cdot B \cdot (v - d)$

donde σ_t será la tensión del terreno mayorada, y habiéndole descontado el peso propio del cimiento.

$$\rightarrow V_{u2} = \underbrace{\frac{0,18}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cv})^{1/3}}_{\tau_{rd}} \cdot B \cdot d \geq \underbrace{\frac{0,075}{\gamma_c} \cdot \xi^{3/2} \cdot f_{cv}^{1/2}}_{\tau_{rd,min}} \cdot B \cdot d$$

$$1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ con } d \text{ en mm,}$$



• 1b. Comprobación a punzonamiento:

- *Art. de cimentaciones (Art. 58.4.2.1.2) remite a la verificación de punzonado (Art. 46)*
- Se realizará en una sección crítica situada a una distancia $2d$ del perímetro del soporte. Esta sección crítica es perpendicular a la base de la zapata, y tiene en cuenta la sección total de dicho elemento de cimentación.
- Como buscaremos no colocar armadura de punzonamiento, la verificación será:

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd,ef}}{u_1 \cdot d} \leq \tau_{rd}$$

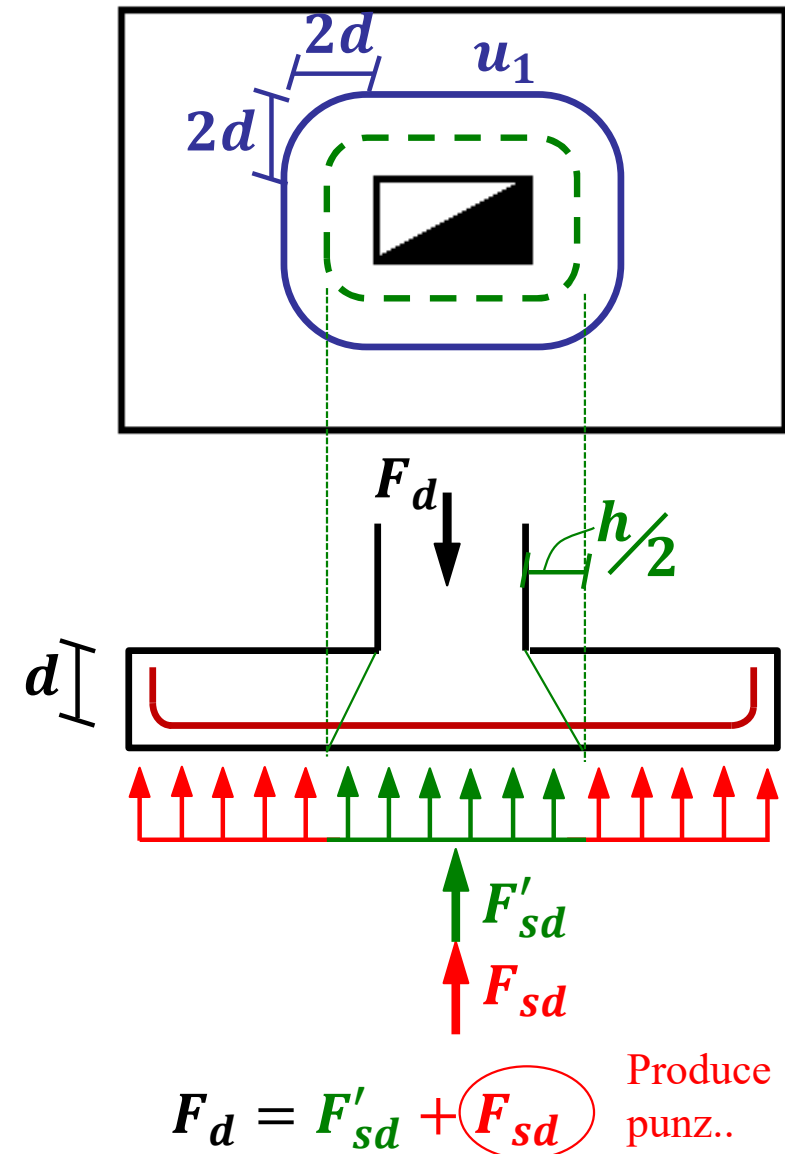
- donde (Art.: 46.3):

- τ_{sd} es la tensión tangencial de cálculo en el perímetro crítico, y
- τ_{rd} es la tensión máxima resistente en la sección crítica
- $F_{sd,ef}$ es el esfuerzo efectivo de punzonamiento de cálculo:

$$F_{sd,ef} = \beta \cdot F_{sd}$$

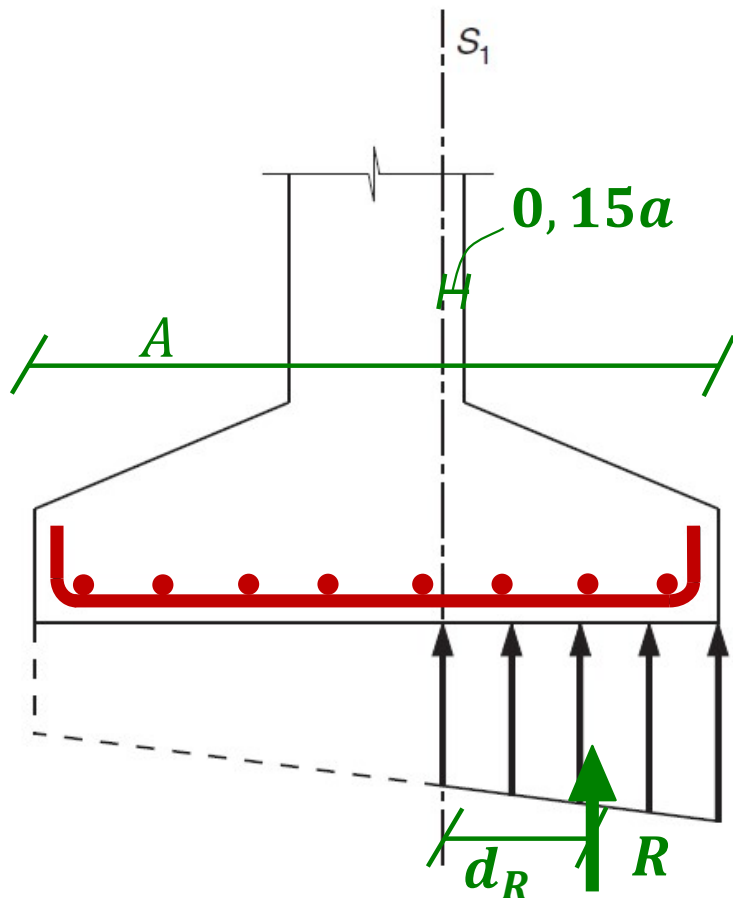
- donde:

- F_{sd} es el esfuerzo de punzonamiento de cálculo, que en zapatas será la descarga del soporte menos la resultante de la presión del terreno dentro del perímetro situado a una distancia $h/2$ del soporte (en diseño, y sin considerar el peso de la zapata).
- β es un coeficiente que tiene en cuenta la excentricidad de la descarga. Para pilares centrados en sus zapatas:
 - » Si la descarga es centrada: $\beta = 1,00$
 - » Si la descarga es excéntrica: $\beta = 1,15$



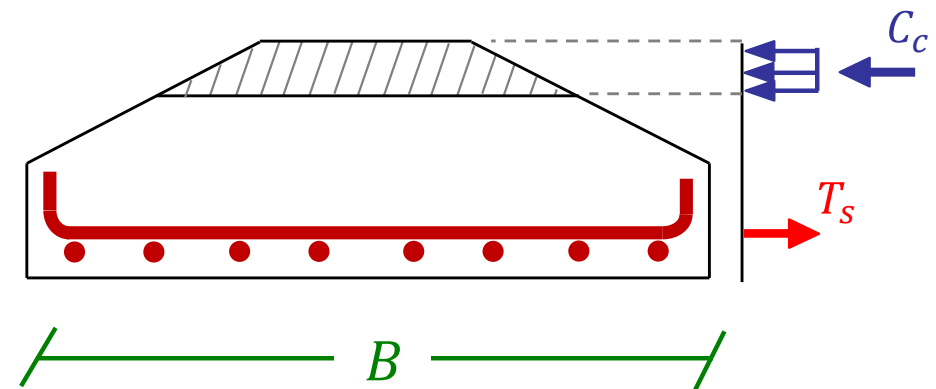
• 2. Cálculo a flexión – dimensionamiento de la armadura principal:

- Se diseñará la armadura para resistir el momento producido en la sección de referencia S_1 .
- **Sección de referencia S_1 :** paralela a la caras del soporte y situada detrás de dicha caras a una distancia igual a $0,15a$. Esta sección es plana y perpendicular a la base de la zapata. El canto útil se tomará igual al canto útil de una sección paralela a ella, situada en la cara del soporte.
- Se deberá realizar la verificación en ambas direcciones: a y b.



Además de las cuantías geométricas mencionadas anteriormente, para zapatas flexibles deberá cumplirse con la **cuantía mecánica mínima** de elementos a **flexión**.

Sección de cálculo (no contar soporte)



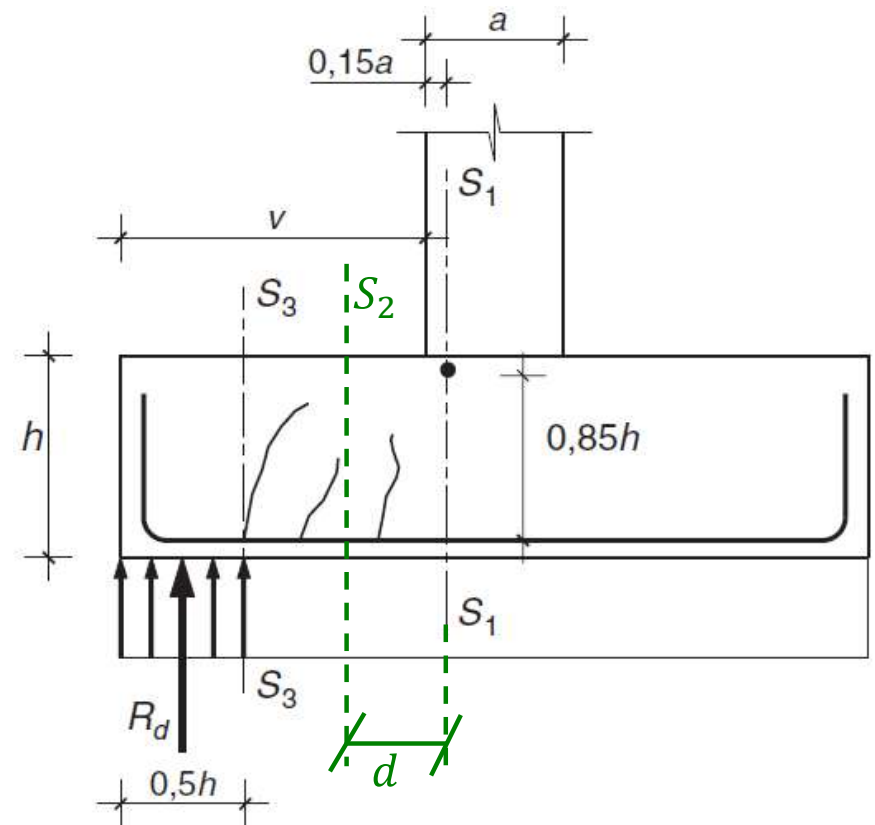
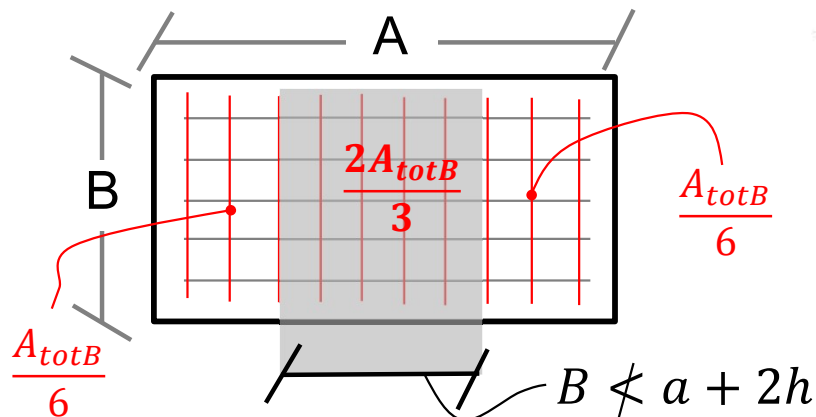
- La armadura calculada deberá ser anclada según el más desfavorable de los criterios siguientes:

- Desde la sección S_2 , situada a un canto útil d de la sección de referencia S_1 .
→ Debe haber al menos una longitud básica de anclaje desde S_2 .
- Desde la sección S_3 (ver figura), para una fuerza:

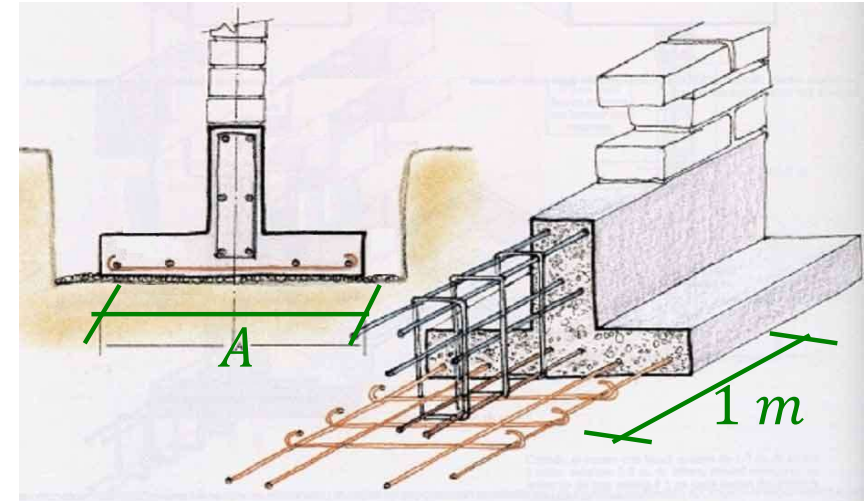
$$T_d = R_d \frac{(v + 0,15a - 0,25h)}{0,85h}$$

- Puede que no resulte necesario doblar las armaduras, pero siempre deben prolongarse hasta el extremo de la zapata.
- Se recomienda no emplear diámetros menores de 12 mm, con separaciones máximas entre barras de 0,30m.

Distribución de armaduras en zapatas rectangulares (ver JM 25.3.5)



- Zapata corrida bajo muro:
 - Solución muy usada en estructuras pequeñas (casas de una o dos plantas), en las cuales los muros de mampostería son estructurales y llevan la carga a la cimentación en forma lineal.
 - Es también el caso de los muros de contención con cimentación directa.
 - Se supone que longitudinalmente el conjunto muro-zapata es infinitamente rígido y la tensión uniforme.

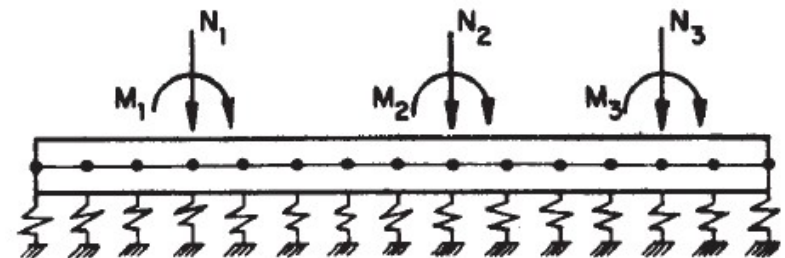


Zapata corrida bajo muro

- Se dimensiona por unidad de longitud, como zapata flexible o rígida según sus dimensiones transversales. **Solo dimensionamos A**
- En sentido longitudinal se dispondrá una armadura de reparto, no menor que el 20% de la principal.

- Zapata corrida bajo pilares:
 - Se calcula como viga flotante (no lo trataremos en este curso).

Hay que dimensionar la viga longitudinal además de la zapata.



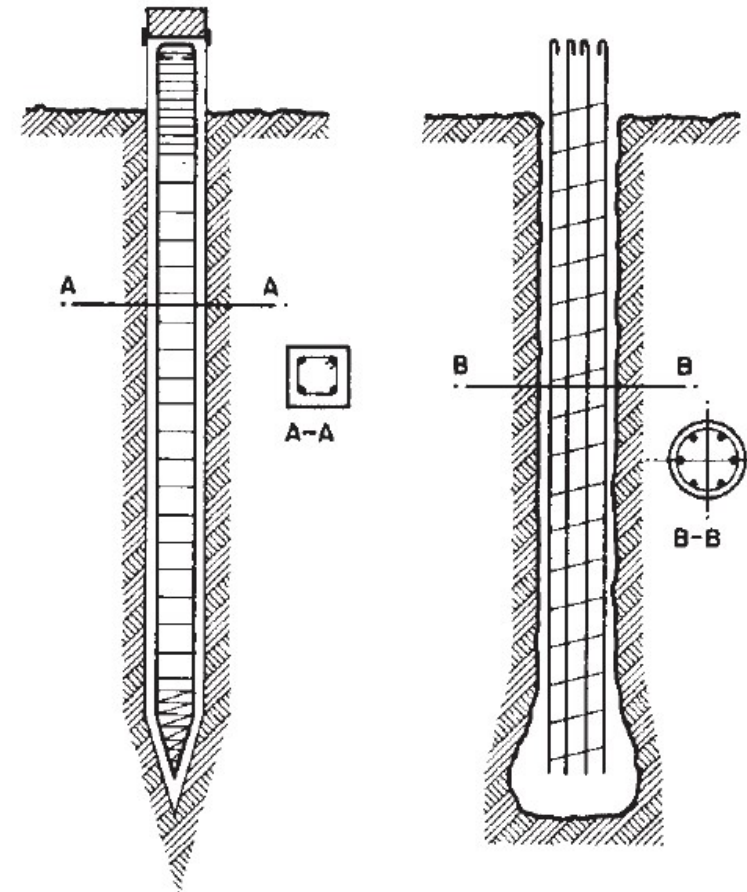
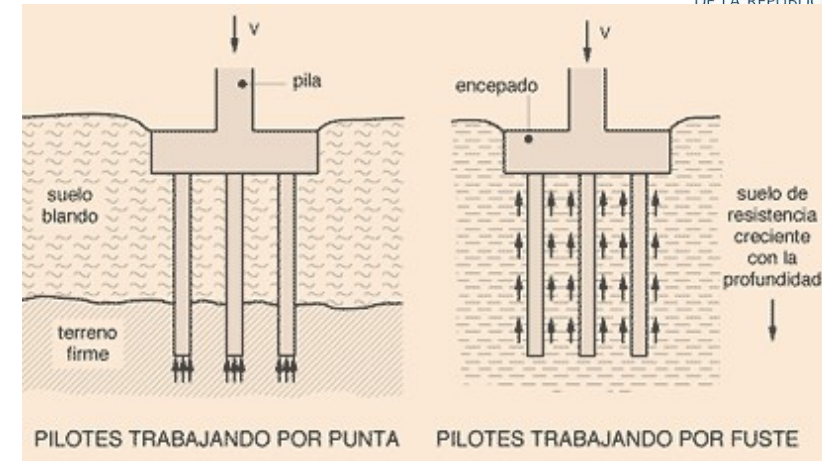
Analogía de la viga flotante

• Cimentación indirecta:

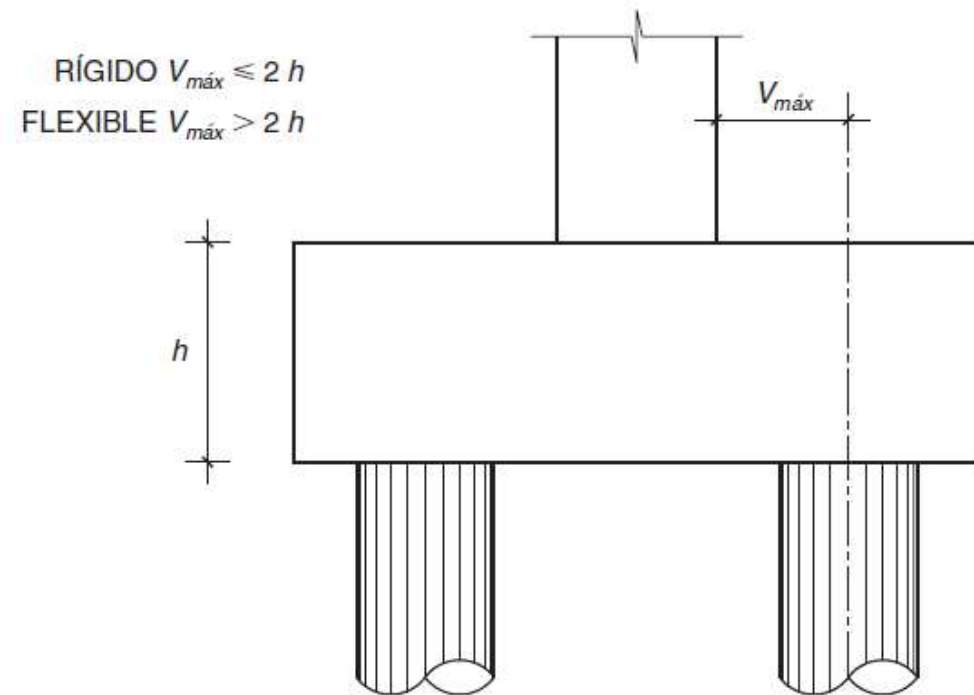
- Se realiza mediante un **cabezal** (“encepado”, en España), que recibe la descarga de la estructura y se apoya sobre un **grupo de pilotes**, los cuales se introducen profundamente en el terreno para transmitir su carga al mismo.

• PILOTES:

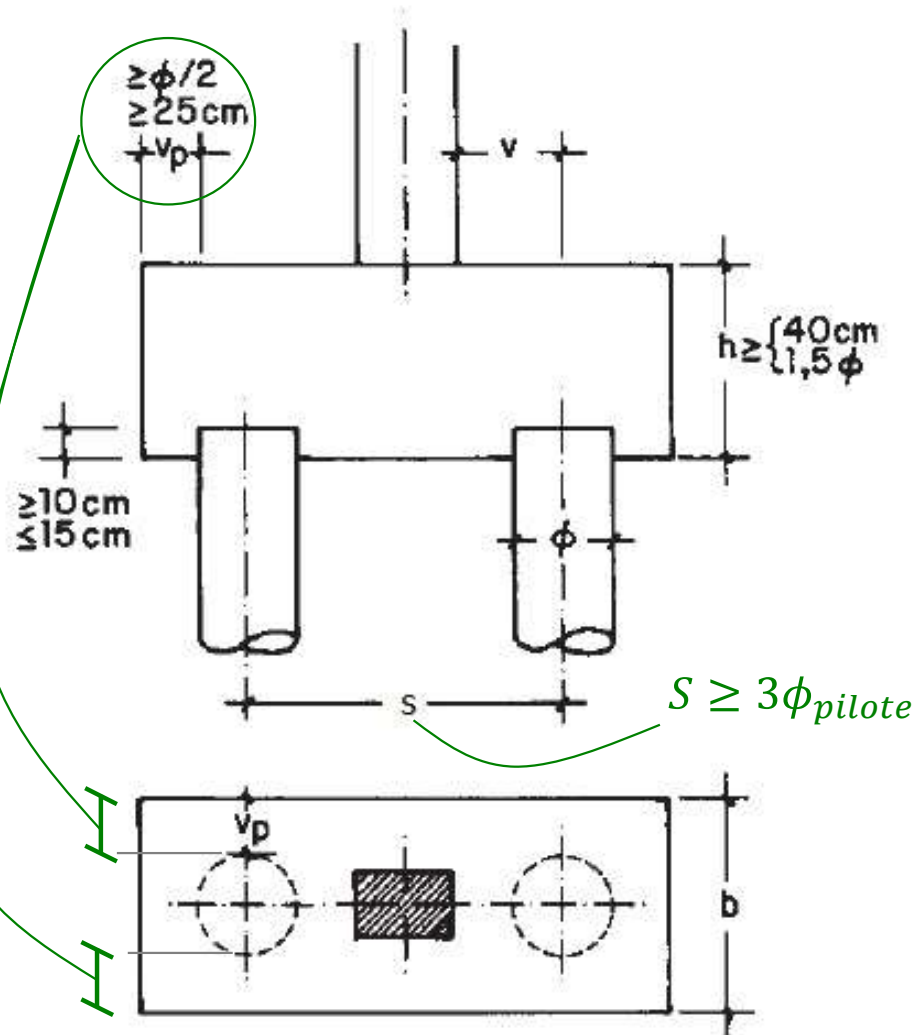
- Su **cálculo geotécnico** consiste en comprobar que la carga total del pilote no supera su **carga admisible**. En general, su **capacidad de carga es la suma de**:
 - Su resistencia **de punta**.
 - Su resistencia **por rozamiento** lateral del fuste contra el terreno.
 - *Podrá tener una, la otra, o ambas colaboraciones.*
- El **cálculo estructural de los pilotes** consiste en su comprobación como **elemento de hormigón armado**, bajo **condiciones particulares** (Ver JM. *No se verá en H1*)
- **En la práctica**, en los casos comunes de pilotes sometidos únicamente a esfuerzo axial, la **geometría y armadura de los pilotes es definida por la empresa pilotera**, por lo que el ingeniero **calculista** de la estructura debe únicamente **informar la directa característica** que el pilote deberá ser capaz de soportar.



- **Por la relación entre sus dimensiones, los cabezales pueden ser:**
 - Flexibles, $v_{m\acute{a}x} > 2h$: su cálculo se hace mediante la teoría general de flexión.
 - Rígidos, $v_{m\acute{a}x} \leq 2h$: para su cálculo es necesario aplicar el método de bielas y tirantes.
 - Donde: $v_{m\acute{a}x}$ es la distancia del borde del soporte al eje del pilote con mayor vuelo.
 - La EHE-08 distingue además, para el dimensionado de cabezales rígidos, entre:
 - Cabezales sobre 2 pilotes
 - Cabezales sobre varios pilotes (3, 4 y cabezal corrido).
- **En este curso trataremos únicamente el dimensionado de cabezales rígidos sobre 2 pilotes.**



Cabezales rígidos de 2 pilotes



Para definir la geometría del cabezal, debemos estimar el diámetro que tendrán los pilotes.

→ Número gordo:

$$N_{adm,pilote} = 5 \text{ MPa} \frac{A_{pilote}}{4}$$

Una vez estimado el diámetro de pilote necesario, se define la separación mínima entre ejes de pilotes:

$$s \geq 3\phi_{pilote}$$

Esta separación permite considerar como carga admisible del conjunto de pilotes la suma de las cargas admisibles de cada pilote (concepto de no interferencia).

Luego, siguiendo los criterios indicados en la figura, se define la geometría completa del cabezal.

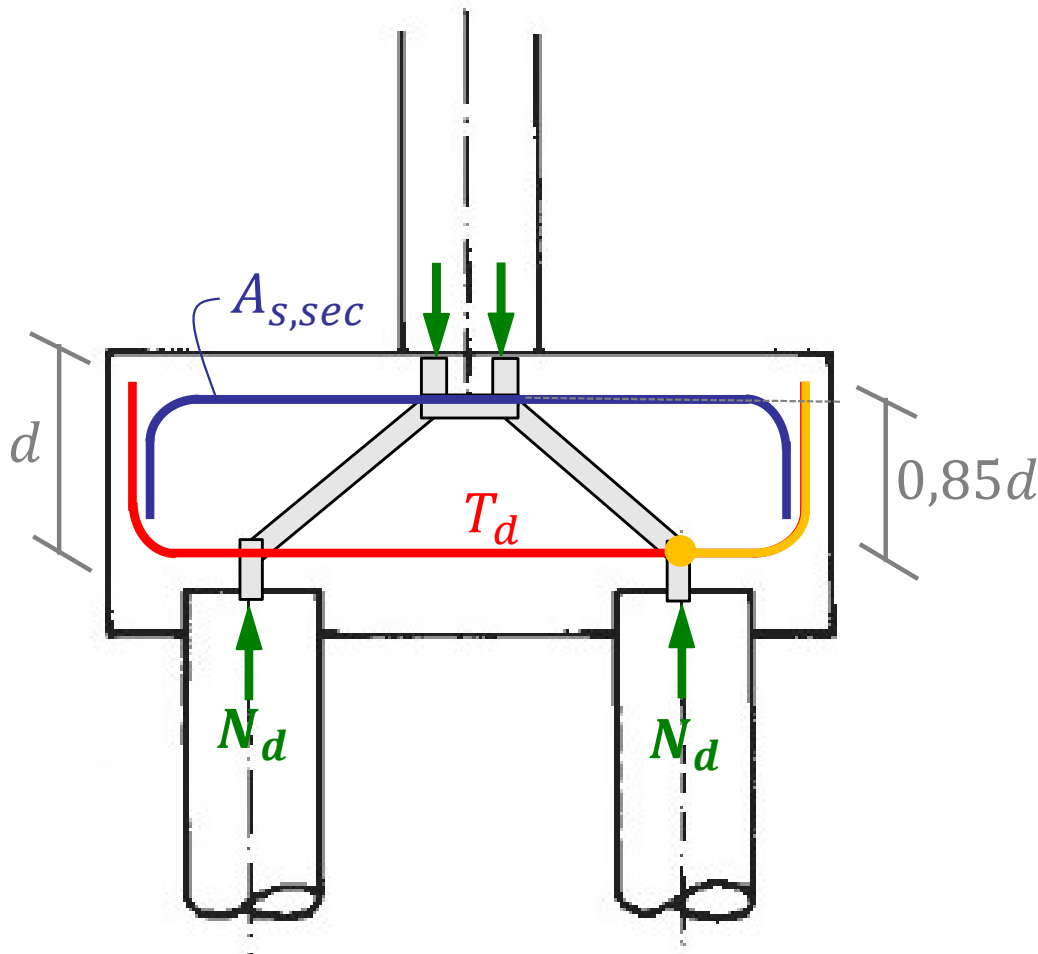
Cabezales rígidos de 2 pilotes

RECORDAR: como estamos trabajando con ByT, $f_{yd} \leq 400$ MPa.

- N_d : axil de cálculo del pilote más cargado.

La armadura longitudinal inferior (principal) se proyectará para resistir la tracción de cálculo:

$$T_d = N_d \frac{v + a/4}{0,85 d} = A_s f_{yd}$$



ESQUEMA GENERAL DE BIELAS Y TIRANTES

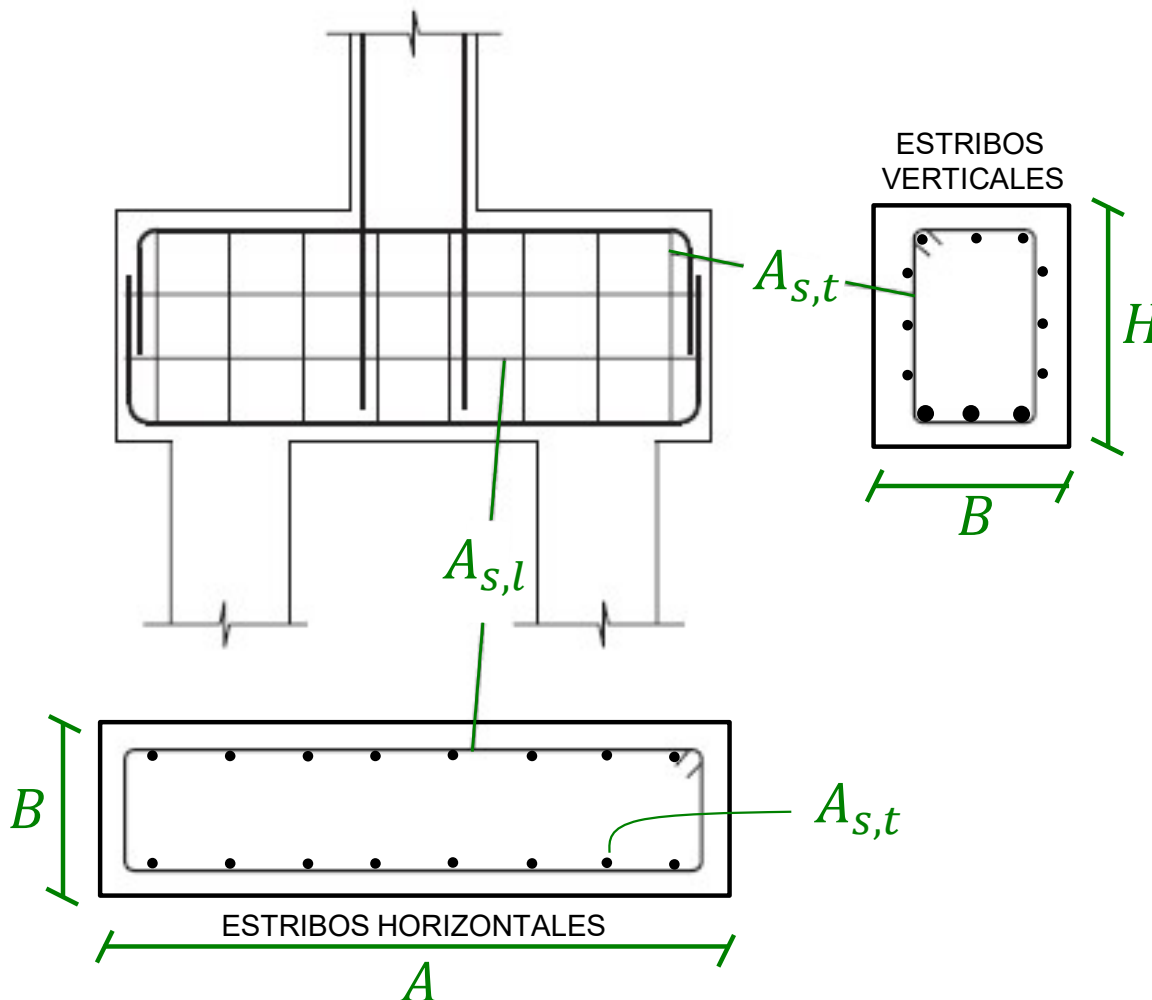
Además, se colocará una armadura longitudinal superior (secundaria), tal que:

$$A_{s,secundaria} = 0,10 \cdot A_{s,principal}$$

La armadura principal se colocará sin reducir su sección en toda la longitud del cabezal, y se anclará por prolongación recta a partir de planos verticales que pasen por el eje de cada pilote.

Cabezales rígidos de 2 pilotes

La ejecución de los pilotes en obra resulta, muchas veces, en un replanteo impreciso de los mismos. La armadura descrita está prevista para absorber las posibles excentricidades que se pueden producir en el cabezal por un desplazamiento accidental de los pilotes respecto a su posición teórica.



Por último, se colocarán estribos:

- verticales, que aten la armadura longitudinal inferior y superior.
- horizontales, que aten los estribos verticales.

La cuantía mínima de estas armaduras, referida al área de la sección de hormigón perpendicular a su dirección, será de 4‰:

$$A_{s,t} = 0,004 \cdot \min\left(B, \frac{H}{2}\right) \cdot A$$

$$A_{s,l} = 0,004 \cdot \min\left(B, \frac{H}{2}\right) \cdot H$$