Universidad Politécnica de Cartagena

UNIDAD DIDÁCTICA V. REGIONES D Y ELEMENTOS DE CONTENCIÓN Y CIMENTACIÓN

LECCIÓN 21.1

CIMENTACIONES SUPERFICIALES. TIPOLOGÍAS, ASPECTOS ESTRUCTURALES Y CONSTRUCTIVOS

DPTO. DE INGENIERÍA MINERA Y CIVIL
ÁREA DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

INDICE

I. INTRODUCCIÓN

- Generalidades
- Definiciones
- Condicionantes de la construcción
- Condicionantes del terreno

II. TIPOLOGÍAS BÁSICAS CIMENTACIONES SUPERFICIALES

- Zapatas
- Losas

III. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

IV. PROCESO DE DISEÑO DE UNA CIMENTACIÓN

GENERALIDADES

De una manera u otra, todas las construcciones ...

... acaban dependiendo, para su equilibrio y supervivencia, ...

... del terreno sobre el que se sustentan,...

... apoyando sobre una cimentación.

La elección de una tipología u otra de cimentación dependerá de:

Las características del terreno sobre el que apoya.

Granulometría, plasticidad, humedad, nivel freático,...

Las características de la estructura que ha de soportar.

Asientos máximos admisibles, rigidez de la estructura,...

DEFINICIONES

- ***CIMENTACIÓN:*** **Parte de la estructura que transmite las cargas del edificio al terreno, de modo que éste no sea solicitado a presiones mayores de las que pueda soportar, ni se produzcan movimientos que la estructura no pueda admitir.**

- **Es un elemento de <u>transición</u> entre el suelo (poco resistente y flexible) y la estructura (muy resistente y rígida):**

Acero estructural	f_{yk} =	**275 MPa**
Hormigón	$f_{ck} \geq$	**25 MPa**
Suelo	σ_{adm} =	**0,1-0,2 MPa**

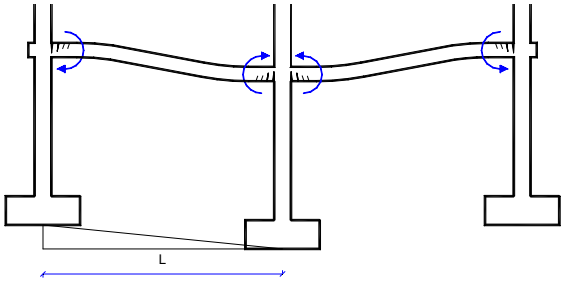
- **Previo al cálculo ⇒ <u>Estudio geotécnico</u> (granulometría, plasticidad, humedad, deformabilidad, agresividad, estratificación, resistencia de los distintos estratos, nivel freático, heladicidad, etc.)**

- **En el diseño de una cimentación hay dos tipos de comprobaciones:**
  - **Comprobaciones geotécnicas**
  - **Comprobaciones estructurales y constructivas**

CONDICIONANTES DE LA CONSTRUCCIÓN

Los asientos admisibles dependen de la mayor o menor rigidez de la estructura y de los elementos no estructurales (tabiques)

La cimentación estará condicionada por la compatibilidad entre el comportamiento de la estructura y el suelo



$$\delta = \frac{\Delta s}{L} \leq \delta_{adm}$$

δ Distorsión angular

Δs Asiento diferencial

L Distancia entre pilares

Tabla 2.2. Valores límite basados en la distorsión angular

Tipo de estructura	Limite
Estructuras isostáticas y muros de contención	1/300
Estructuras reticuladas con tabiquería de separación	1/500
Estructuras de paneles prefabricados	1/700
Muros de carga sin armar con flexión cóncava hacia arriba	1/1000
Muros de carga sin armar con flexión cóncava hacia abajo	1/2000

CONDICIONANTES DEL TERRENO

Clasificación de los terrenos (Anejo D. CTE DB SE-C)

I. ROCAS (Clasif.: Roca sana, … , meteorizada, … , suelo residual)

II. SUELOS GRUESOS (NO COHESIVOS o GRANULARES)

- **Gravas: Gruesas (20-60 mm), medias (6-20 mm) o finas (2-6 mm)**
- **Arenas: Gruesas (0,6-2 mm), medias (0,2-0,6 mm) o finas (0,06-0,2)**
- ***Compacidad* arenas: Muy floja (N_{SPT}<4), floja (4-10), media (11-30), densa (31-50) o muy densa (>50)**
- **Áng.Rozam.Int. φ (30-36º arenas, 34-45º gravas); Cohesión *c* (0 t/m²)**

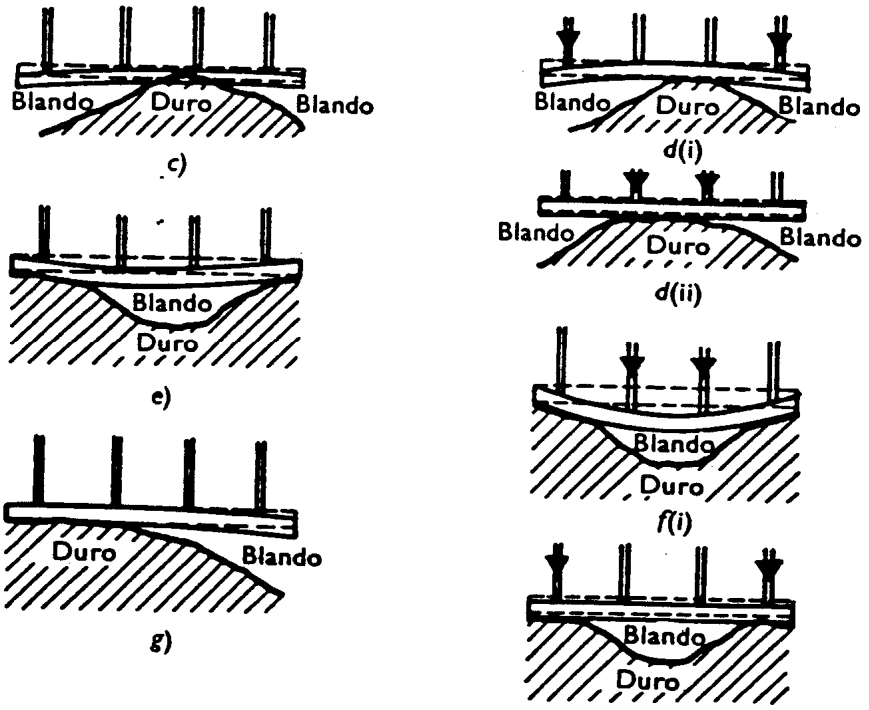
III. SUELOS FINOS (COHESIVOS o ARCILLOSOS)

- **Limos: Gruesos (0,02-0,06), medios (0,006-0,02), finos (0,002-0,006)**
- **Arcillas: < 0,002 mm**
- ***Consistencia* de arcillas: Muy blanda (q_u = 0-25 kPa), blanda (25-50), media (50-100), firme (100-200), muy firme (200-400) o dura (>400)**
- **A corto plazo: φ = 0, *c* = 10-100 kN/m². A largo: φ' (25-32º limos, 16-28º arcillas); *c'* = 10-25 kN/m²**

IV. SUELOS DEFICIENTES (fangos, orgánicos y algunos de relleno)

CONDICIONANTES DEL TERRENO

Estratificación del terreno

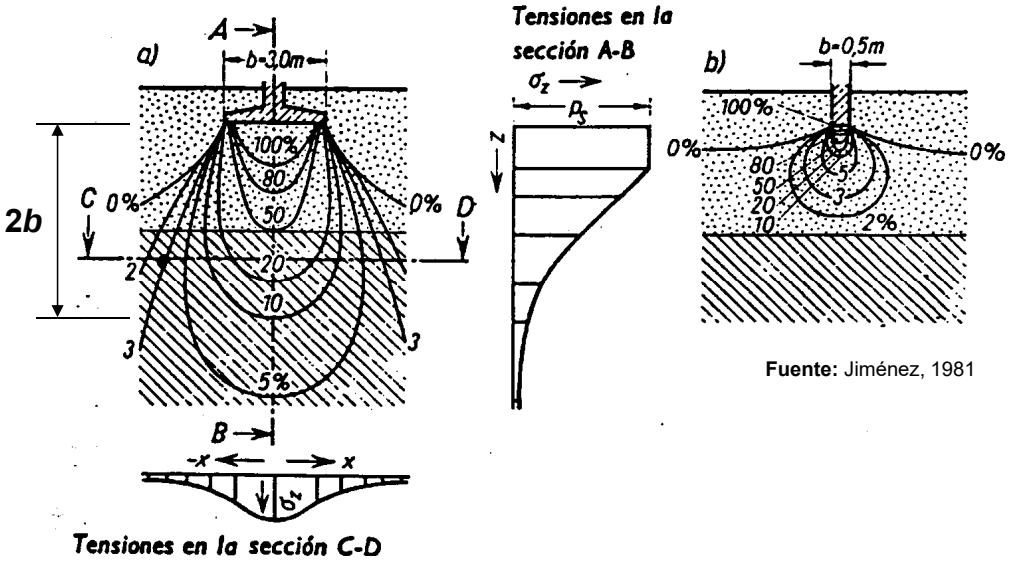


Fuente: Jiménez, 1981

CONDICIONANTES DEL TERRENO

Profundidad del estrato resistente

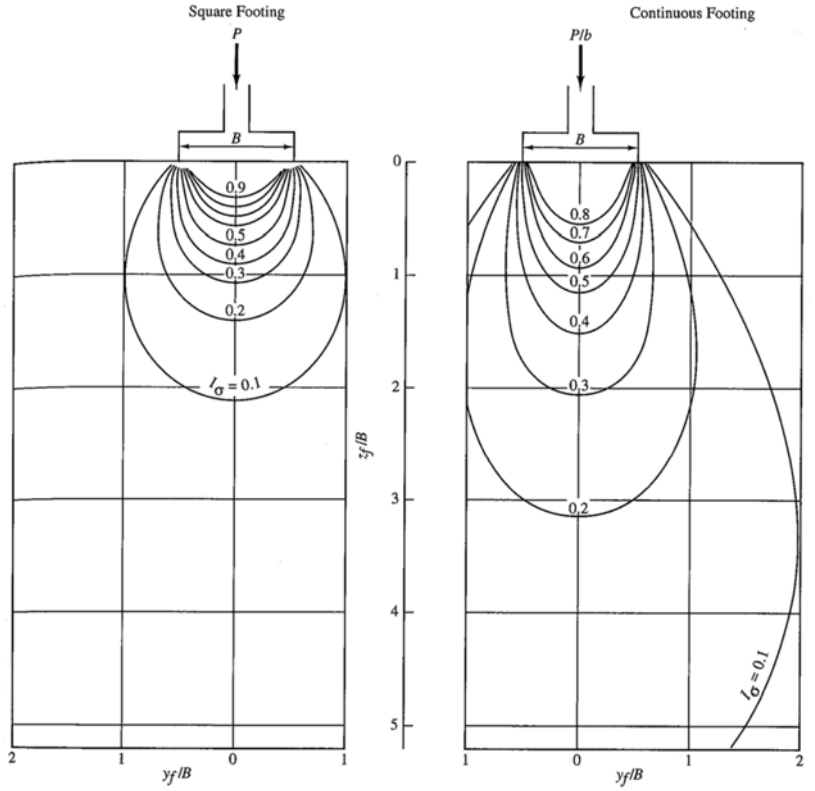
La distribución de presiones puede afectar a varios estratos, y en ocasiones el estrato o nivel de apoyo no siempre es el más resistente.



Fuente: Jiménez, 1981

Este efecto debe ser reflejado por el estudio geotécnico, indicando en función de la profundidad, la conveniencia de emplear *cimentaciones superficiales o cimentaciones profundas*

CONDICIONANTES DEL TERRENO



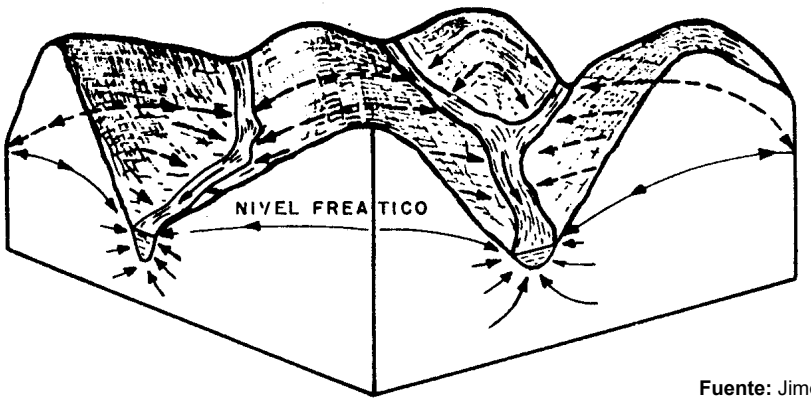
Fuente: Coduto, 2015

Figure 7.2 Stress bulbs based on Newmark's solution of Boussinesq's equation for square and continuous footings.

CONDICIONANTES DEL TERRENO

Nivel freático

Lugar geométrico de los puntos en los que la presión del agua es atmosférica (*Jiménez Salas)*



Fuente: Jiménez, 1981

El nivel freático tiende a mantenerse paralelo al nivel topográfico, pero su profundidad varía según las variaciones en las precipitaciones, presión atmosférica y, a lo largo de las costas, con las fluctuaciones de las mareas

TIPOLOGIAS DE CIMENTACIÓN

- **Zapatas**
- **Losas, emparrillados, …**
- **Pilotes**

→ Cimentación directa

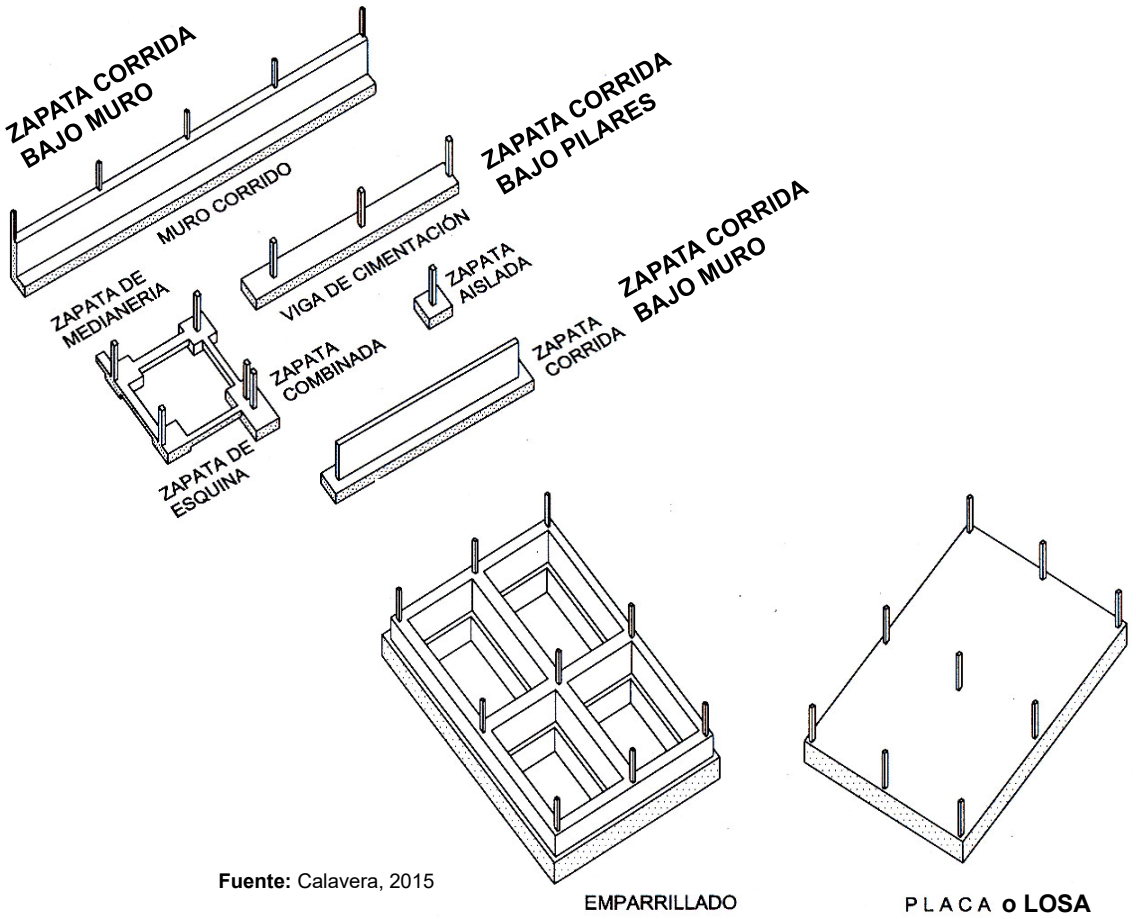
→ Cimentación profunda

Cimentación directa o superficial:

- Reparte las cargas de la estructura en un plano de apoyo horizontal, trasmitiendo al terreno las cargas de uno o varios pilares de la estructura, o de los muros de carga o de contención de tierras en los sótanos.
- Cuando el terreno sea firme y competente, se pueda transmitir presiones medias/altas y se esperen asientos pequeños/moderados, la cimentación normal de los pilares de un edificio estará basada en ***zapatas***.
- Para terrenos con baja capacidad de carga y elevada deformabilidad, o heterogeneidades que hagan prever importantes asientos diferenciales, se podrá cimentar mediante ***emparrillados*** o mediante ***losas***.

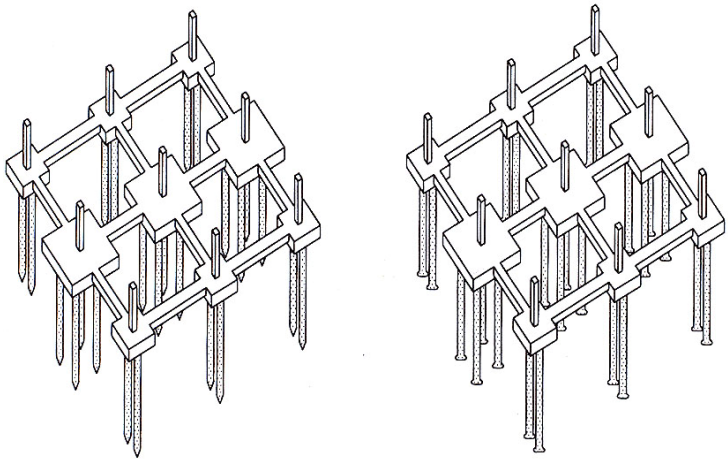
Si la ejecución de una cim. superf. no es viable, se acude a una **cimentación profunda** (apoyo a prof. > 8 x su ancho o diámetro) mediante ***pilotes***.

TIPOLOGIAS DE CIMENTACIÓN



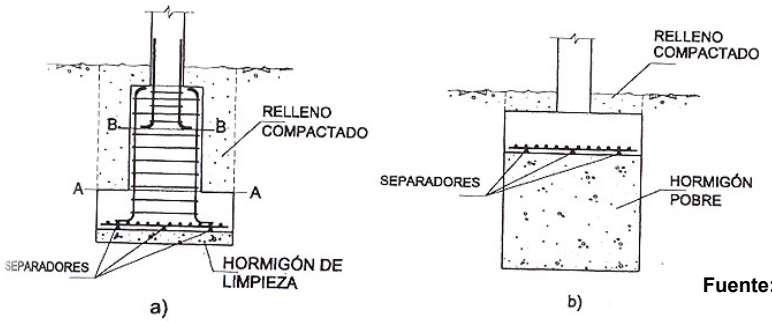
Fuente: Calavera, 2015

TIPOLOGIAS DE CIMENTACIÓN



PILOTES PREFABRICADOS — PILOTES " IN SITU "

Pozos de cimentación ⇒ Solución intermedia ~ 3-6 m profundidad

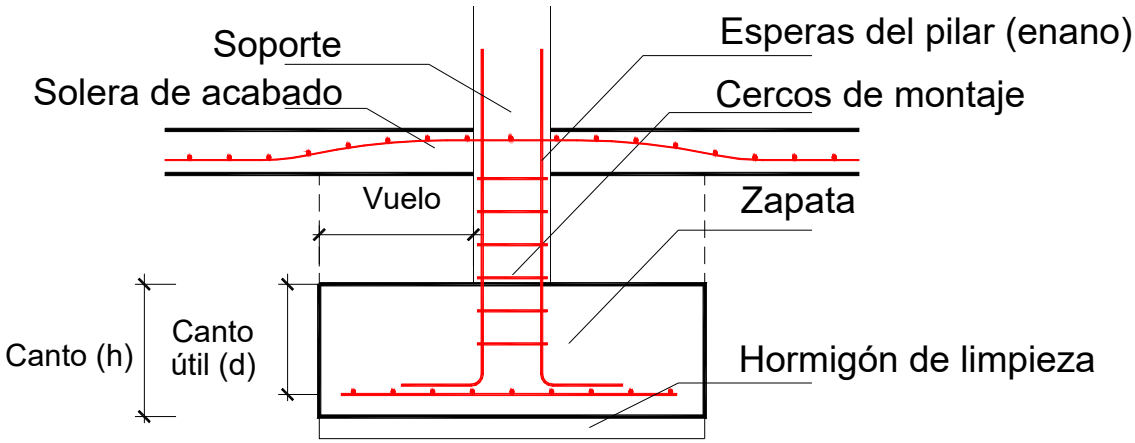


Fuente: Calavera, 2015

TIPOLOGIAS DE CIMENTACIÓN: ZAPATAS

Las zapatas es la solución más habitual y sencilla siempre que:

- **El terreno tenga una capacidad portante ≥ 1 kp/cm² (0,1 MPa)**
- **No exista influencia del nivel freático**
- **El firme de apoyo se sitúe a menos de 3 m prof., aunque esta situación puede paliarse mediante el empleo de pozos**



TIPOLOGIAS DE CIMENTACIÓN: ZAPATAS

Predimensionado de zapatas

En estructuras de hormigón armado ordinarias donde la planta de un edificio tiene un peso del orden de 10 kN/m², se tiene:

Presión admisible del terreno (MPa)	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30
Nº de forjados	Fracción del terreno ocupado por las zapatas (en %)					
1	21	10	7	5	4	3
2	42	21	14	10	8	7
3	62	31	21	16	12	10
4	83	42	28	21	17	14

Para un edificio habitual de oficinas (pilares ≤ 0,4×0,4 m, luces 5 m) con tres forjados (sanitario, 1ª planta y cubierta), los pilares soportan en su base una tensión $\sigma \geq$ 5 MPa, es decir, entre 30 y 50 veces la admisible para el terreno. Por tanto, las zapatas deben tener lados 5 a 7 veces los del soporte (o los de la placa base para pilares metálicos).

TIPOLOGIAS DE CIMENTACIÓN: ZAPATAS

- **Las zapatas se <u>predimensionan</u> con un axil igual a 1,30 el axil de servicio en el caso de zapatas de medianería, y de 1,15 en el caso de zapatas interiores:**

$$\sigma_{z,med} = \frac{1{,}30N}{ab} \leq \sigma_{adm}$$

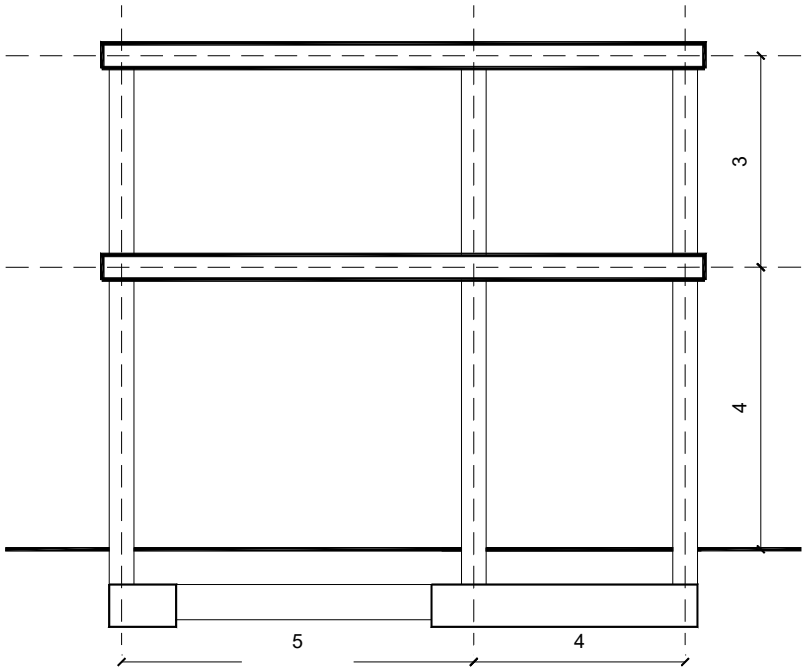
$$\sigma_{z,\text{int}} = \frac{1{,}15N}{ab} \leq \sigma_{adm}$$

- **El momento en la base de la cimentación es el resultado del modelo utilizado para analizar la estructura, debiendo cumplirse la hipótesis de compatibilidad de giros en la base.**
- **En el caso de un empotramiento, si no se garantiza el giro nulo en el elemento real de cimentación (zapata o losa), se puede modificar el esquema de esfuerzos de cálculo.**

TIPOLOGIAS DE CIMENTACIÓN: ZAPATAS

Zapatas combinadas

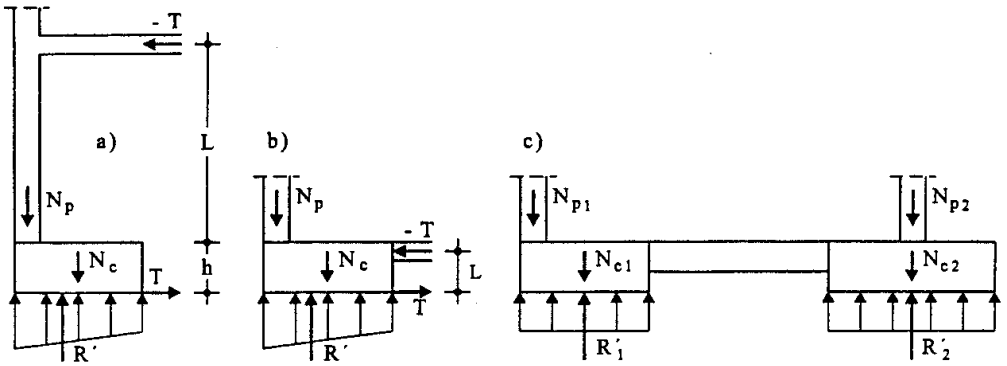
La presencia de pilares a distancias cortas obliga a la disposición de zapatas comunes a dos de ellos, conocidas como zapatas combinadas.



TIPOLOGIAS DE CIMENTACIÓN: ZAPATAS

Vigas centradoras, vigas de atado y soleras

- **En ocasiones es necesaria la ejecución de zapatas de esquina o medianería con fuertes excentricidades, que pueden generar concentración de tensiones en las esquinas.**
- **Para evitarlo centramos los axiles, bien con el forjado de planta 1ª, bien con vigas a nivel de cimentación (<u>vigas centradoras o vigas riostra</u>)**



Fuente: Calavera, 2015

- **La viga riostra no se considera apoyada en el terreno, es decir no es un elemento de cimentación**

TIPOLOGIAS DE CIMENTACIÓN: ZAPATAS

Canto de la zapata

A nivel <u>predimensionado</u>, podemos fijar un canto mínimo de la zapata con la condición de no necesidad de armadura a cortante:

Tensión admisible del terreno (MPa)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
Canto mínimo	0,2*v*	0,3*v*	0,3*v*	0,4*v*	0,5*v*

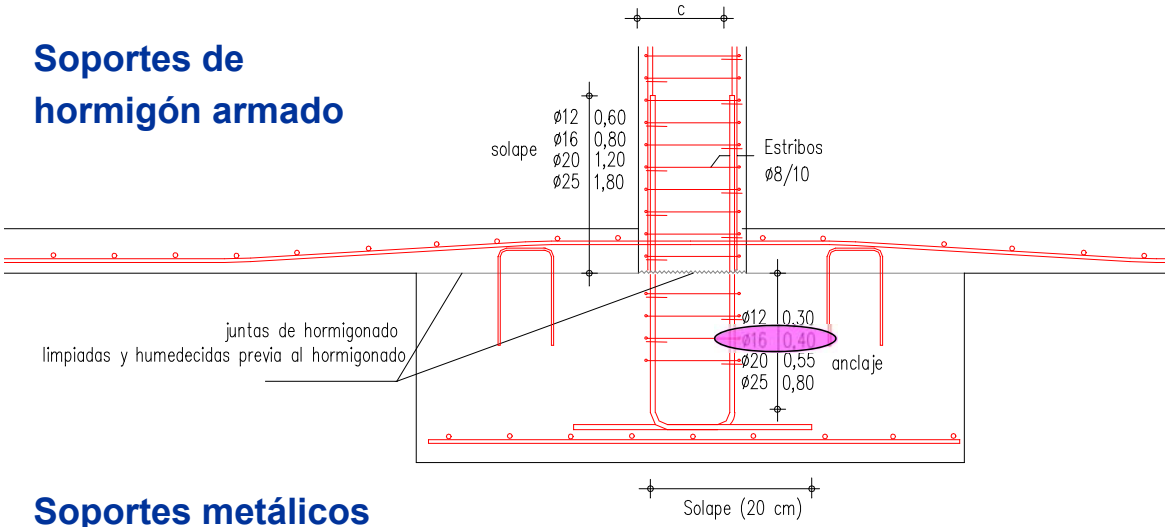
v **= vuelo** **Canto ≥ 25 cm (zap. HA, EHE-08)**

Enlace de soportes-zapata

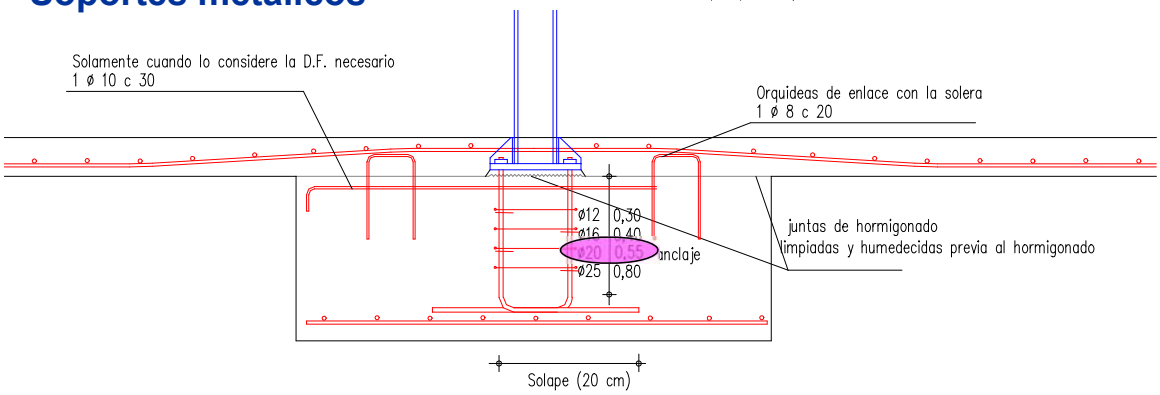
- ***<u>Soportes de acero laminado</u>*: No es posible disponer directamente el perfil sobre la zapata. Es necesario disponer una placa base o de anclaje soldada al perfil que reparta las compresiones al hormigón**
- ***<u>Soportes de hormigón</u>*: Apoyo directo del pilar en la zapata con armadura pasante de un elemento al otro**
- **Un aspecto a cuidar es la transferencia de esfuerzos a través de los pernos de la placa de anclaje (estructuras metálicas) o a través de los redondos del pilar (estructuras de hormigón armado)**

TIPOLOGIAS DE CIMENTACIÓN: ZAPATAS

Soportes de hormigón armado

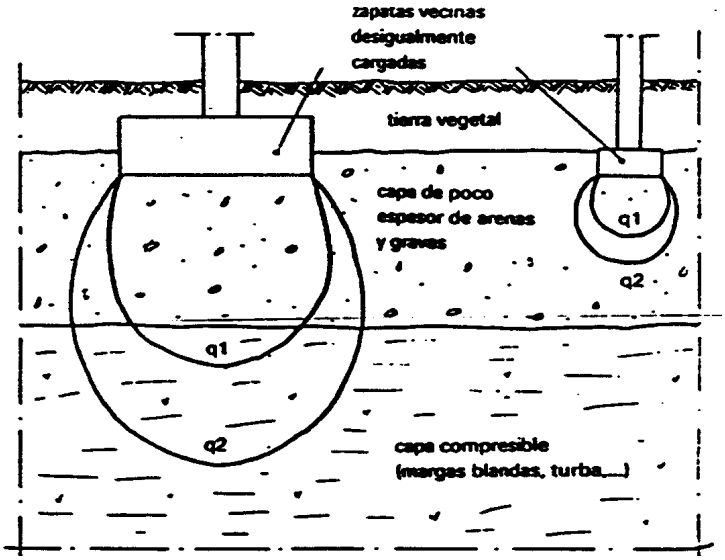


Soportes metálicos



TIPOLOGIAS DE CIMENTACIÓN: LOSAS

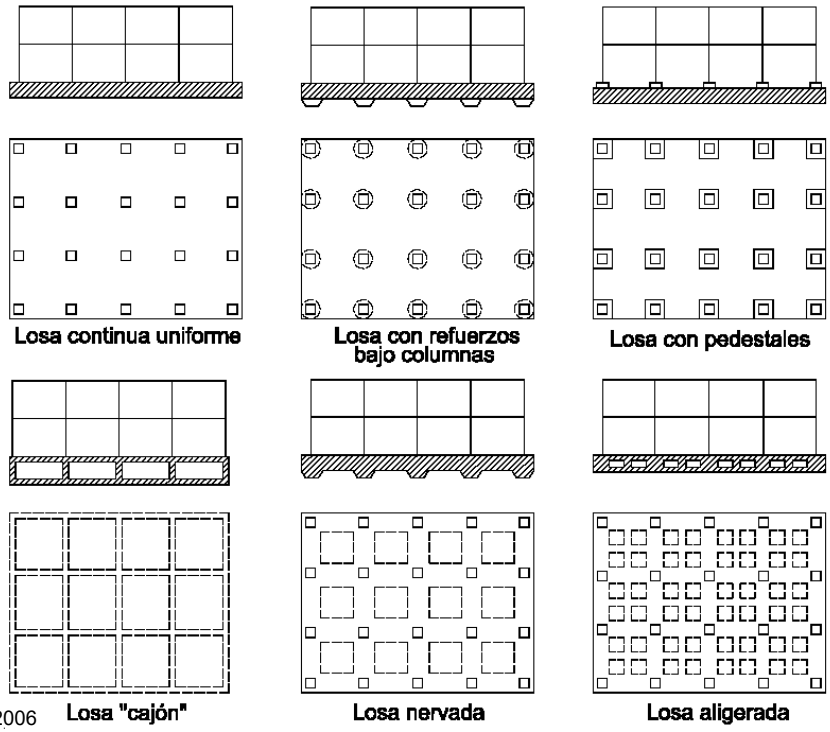
- **La cimentación por losa se debe adoptar cuando el terreno tenga poca resistencia (~ 0,05 MPa), o sea relativamente heterogéneo, para repartir mejor la carga y reducir los asientos diferenciales**
- **La losa suele resultar más barata si:**
  Superficie total de zapatas > 50 % Superficie cubierta por el edificio
- **El bulbo de presiones que genera la losa afecta a estratos más profundos que en las zapatas**



Fuente: Jiménez, 1981

TIPOLOGIAS DE CIMENTACIÓN: LOSAS

- **También se emplea la losa en el caso de sótanos por debajo del n.f., de modo que ésta colabore a la impermeabilización, y sirva de carga para soportar la subpresiones generadas por el empuje del agua**
- **Tipos:**



Fuente: CTE DB SE-C, 2006

TIPOLOGIAS DE CIMENTACIÓN: LOSAS

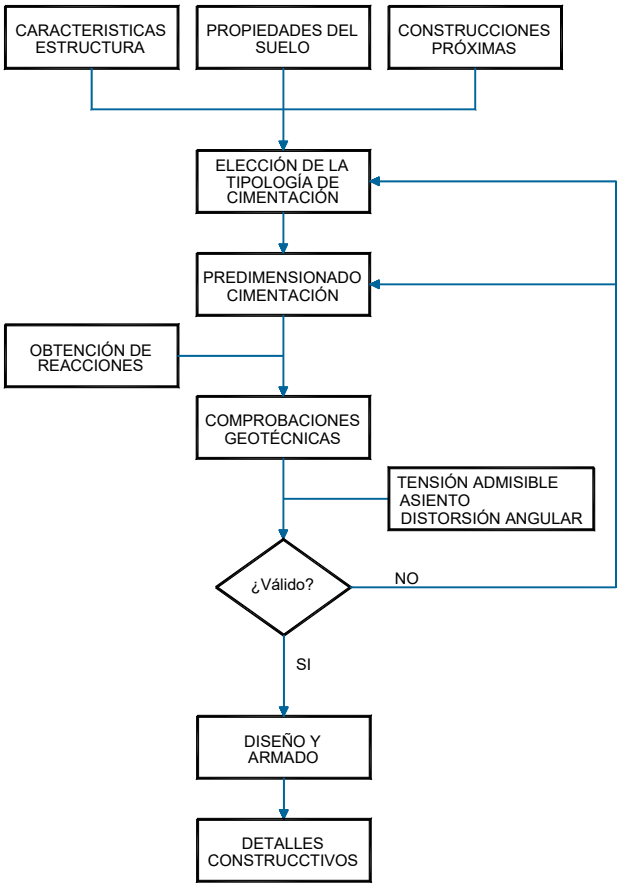
ASPECTOS A TENER EN CUENTA:

- Su mayor bulbo de presiones puede afectar a construcciones vecinas, y llegar a estratos deformables más profundos
- Las estructuras rígidas requieren uniformidad de asientos, por lo que se restringe el empleo de losas flexibles (más económicas)
- Si la distribución de cargas no es equilibrada pueden aparecer problemas de estabilidad o basculamiento globales
- Si se transmite una presión excesiva, puede situarse el plano de ciment. más profundo, aumentando así la carga de hundimiento
- Comportamiento conjunto suelo-losa: El dimensionamiento de la losa ha de tener en cuenta la deformabilidad relativa terreno-cimentación, dejando la distribución de presiones de ser lineal
- Hay que definir el valor del módulo de balasto, que relaciona la presión unitaria en un punto con su asiento, y se define como el cociente entre ambos, por tanto sus dimensiones son t/m^3 o kN/m^3. El módulo de balasto no sólo depende de la deformabilidad del terreno, sino también de la geometría y rigidez de la cimentación

RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

- **Dimensiones:** Múltiplos de 10 cm
- **Canto mínimo:** 25 cm (zapatas de HA) ó 35 cm (zapatas de HM)
- **Canto > 1 m →** disponer armadura de alma (retracc. y Tª)
- **Diámetros de barras:** Recomendable ≥ 12 mm
- **Separación entre armaduras:** 10 a 30 cm
- **Disposición de armado:** Recomendable en forma de malla de igual armadura y separación en las dos direcciones
- **Recubrimiento:** 70+10 mm en elementos en contacto con el terreno
- **Juntas de dilatación:** No tienen porqué prolongarse en cimentación
- **Juntas de hormigonado en losas:** Si son necesarias, se disponen cada 20 m en época fría y cada 16 m en época calurosa
- **Zona sísmica:** Obligatorio unir la cimentación en todas direcciones mediante vigas de atado
- **Unión pilar-cimentación:** Debe estudiarse cuidadosamente
- **Construcciones colindantes:** Tenerlas en cuenta para evitar daños

PROCESO DE DISEÑO DE UNA CIMENTACIÓN



Universidad Politécnica de Cartagena

UNIDAD DIDÁCTICA V. REGIONES D Y ELEMENTOS DE CONTENCIÓN Y CIMENTACIÓN

LECCIÓN 21.2

DISEÑO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES. ZAPATAS

DPTO. DE INGENIERÍA MINERA Y CIVIL
ÁREA DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

INDICE

I. Generalidades

II. Métodos de análisis

III. Criterios generales de proyecto

IV. Mecanismo resistente

V. Distribución de presiones del terreno

VI. Determinación de la presión máxima

VII. Cálculo de zapatas rígidas

VIII. Cálculo de zapatas flexibles

GENERALIDADES

DEFINICIÓN DE CIMENTACIONES

Elementos constructivos (normalmente de hormigón armado) ...

... encargados de transmitir las cargas al terreno ...

... distribuyéndolas de manera que no lo soliciten bajo presiones mayores que las que puede soportar.

En algunos casos esa presión puede estar limitada porque los asientos sean compatibles con la deformación de la estructura.

CIMENTACIÓN

- **GARANTÍA DE ESTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA**
- **ASIENTOS COMPATIBLES CON LAS TOLERANCIAS DE LA ESTRUCTURA**

MÉTODOS DE ANÁLISIS

I. MÉTODO CLÁSICO

- **Comportamiento lineal del terreno (distribuciones de presiones trapeciales o triangulares)**
- **La zapata se comporta como un sólido rígido (es indeformable y bajo las acciones de las cargas desciende sin flectar)**

II. MÉTODO DEL EMPARRILLADO

- **Se asimila la cimentación a una retícula de vigas en dos direcciones**
- **A cada viga se le atribuye su inercia a flexión**
- **Las cargas se reparten entre las vigas en las dos direcciones (o en los nudos de la malla si ésta es suficientemente tupida)**
- **Se adopta comportamiento no lineal del terreno con su rigidez real**

III. MEF

- **La cimentación se modeliza mediante elementos (cuadrad. o triang.)**
- **Incógnitas: Desplazamientos y sus derivadas en los vértices**
- **En cada elemento, los desplazamientos resultan de un polinomio de coef. definidos según los valores de las incógnit. en los vértices**
- **Condiciones de equilibrio de los elementos $\Rightarrow$ Stma. ec. lineal $\Rightarrow$ $\Rightarrow$ Desplazamientos y esfuerzos**

CRITERIOS GENERALES DE PROYECTO

ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS

ESTABILIDAD

- Al vuelco (para cargas horizontales y momentos importantes)
- Frente a la subpresión

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stb}$$

$E_{d,dst}$ valor de cálculo del efecto de las acciones desestabilizadoras

$E_{d,stb}$ valor de cálculo del efecto de las acciones estabilizadoras

RESISTENCIA DEL TERRENO

- Resistencia local (hundimiento y deslizamiento - elementos que soporten cargas horizontales -)
- Res. global o estabilidad global (deslizamiento de la cim. a lo largo de posibles superficies pésimas que la engloben. Se producen en coronación de taludes de excavación o relleno, o en medias laderas)

$$E_d \leq R_d$$

E_d valor de cálculo del efecto de las acciones

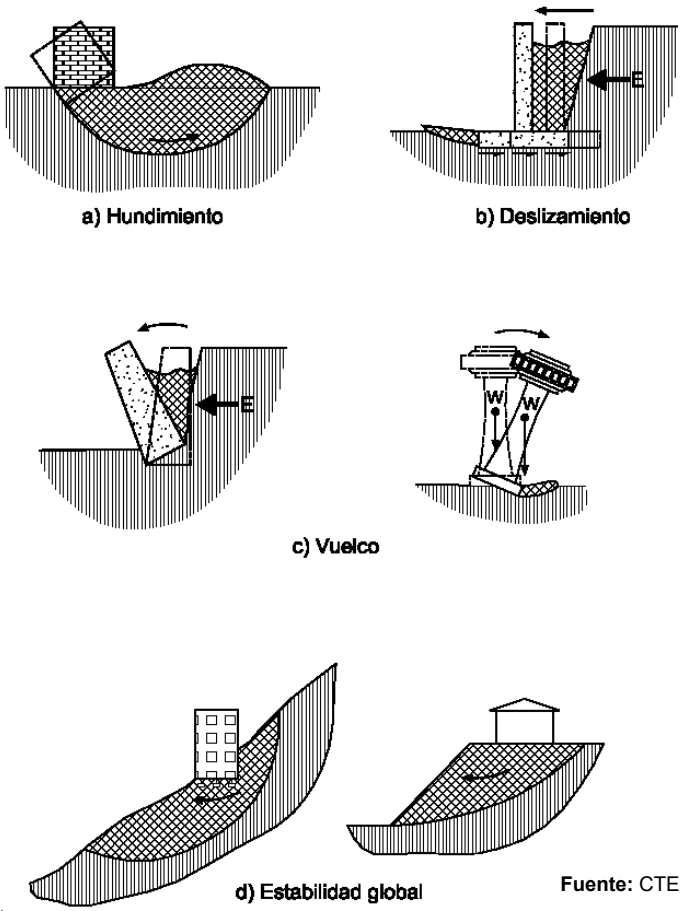
R_d valor de cálculo de la resistencia del terreno

CAPACIDAD ESTRUCTURAL DE LA CIM. ⇒ Según EHE-08

Dpto. de Ing. Minera y Civil
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
CONSTRUCCIÓN EN HORMIGÓN
1º curso Máster Ing. de Caminos
LECCIÓN 21.2
BASES DE DISEÑO DE CIMENTACIONES. ZAPATAS

CRITERIOS GENERALES DE PROYECTO

EJEMPLOS



Fuente: CTE DB SE-C, 2006

CRITERIOS GENERALES DE PROYECTO

COEFICIENTES DE SEGURIDAD (Tabla 2.1 CTE DB SE-C)

Situación de dimensionado	Tipo	Materiales γ_R	Materiales γ_M	Acciones γ_E	Acciones γ_F
Persistente o transitoria	Hundimiento	3,0 (1)	1,0	1,0	1,0
	Deslizamiento	1,5 (2)	1,0	1,0	1,0
	Vuelco (2)				
	Acciones estabilizadoras	1,0	1,0	0,9 (3)	1,0
	Acciones desestabilizadoras	1,0	1,0	1,8	1,0
	Estabilidad global	1,0	1,8	1,0	1,0
	Capacidad estructural	- (4)	- (4)	1,6 (5)	1,0
	Pilotes				
	Arrancamiento	3,5	1,0	1,0	1,0
	Rotura horizontal	3,5	1,0	1,0	1,0
	Pantallas				
	Estabilidad fondo excavación	1,0	2,5 (6)	1,0	1,0
	Sifonamiento	1,0	2,0	1,0	1,0
	Rotación o traslación				
	Equilibrio límite	1	1,0	0,6 (7)	1,0
	Modelo de Winkler	1	1,0	0,6 (7)	1,0
	Elementos finitos	1,0	1,5	1,0	1,0

1,8/0,9=2

(3) En cimentaciones directas, no se considerará el empuje pasivo.

(5) Aplicable a nivel de control de ejecución intenso o normal según EHE-98. Para nivel de control reducido, γ_E = 1,8 para situaciones persistentes o transitorias.
Nota: En EHE-08 el coef. seg. es 1,35 (*G*) ó 1,5 (*G**, *Q*) y no depende del control.

Dpto. de Ing. Minera y Civil
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
CONSTRUCCIÓN EN HORMIGÓN
1º curso Máster Ing. de Caminos
LECCIÓN 21.2
BASES DE DISEÑO DE CIMENTACIONES. ZAPATAS

CRITERIOS GENERALES DE PROYECTO

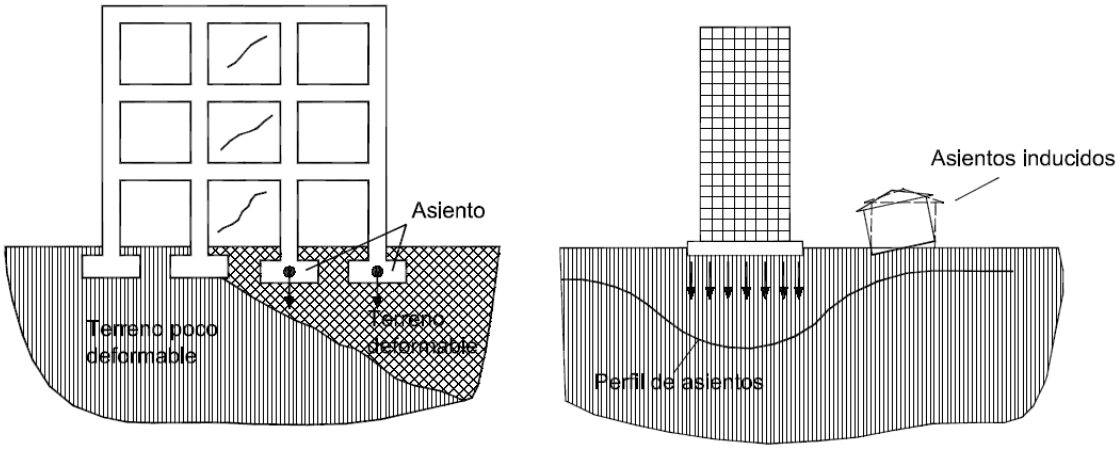
Situación de dimensionado	Tipo	Materiales γ_R	Materiales γ_M	Acciones γ_E	Acciones γ_F
Extraordinaria	Hundimiento	2,0 (8)	1,0	1,0	1,0
	Deslizamiento	1,1 (2)	1,0	1,0	1,0
	Vuelco (2)				
	Acciones estabilizadoras	1,0	1,0	0,9	1,0
	Acciones desestabilizadoras	1,0	1,0	1,2	1,0
	Estabilidad global	1,0	1,2	1,0	1,0
	Capacidad estructural	- (4)	- (4)	1,0	1,0
	Pilotes				
	Arrancamiento	2,3	1,0	1,0	1,0
	Rotura horizontal	2,3	1,0	1,0	1,0
	Pantallas				
	Rotación o traslación				
	Equilibrio límite	1,0	1,0	0,8	1,0
	Modelo de Winkler	1,0	1,0	0,8	1,0
	Elementos finitos	1,0	1,2	1,0	1,0

1,2/0,9=1,33

CRITERIOS GENERALES DE PROYECTO

ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO

- **Asientos del terreno admisibles para el edificio a construir**
- **Asientos inducidos en el entorno no afecten a edificios colindantes**



Fuente: CTE DB SE-C, 2006

Dpto. de Ing. Minera y Civil
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
CONSTRUCCIÓN EN HORMIGÓN
1º curso Máster Ing. de Caminos
LECCIÓN 21.2
BASES DE DISEÑO DE CIMENTACIONES. ZAPATAS

CRITERIOS GENERALES DE PROYECTO

ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO

$$E_{ser} \leq C_{lim}$$

E_{ser} **efecto de las acciones para una situación de dimensionado**

C_{lim} **el valor límite para el mismo efecto**

Tabla 2.2. Valores límite basados en la distorsión angular

Tipo de estructura	Limite
Estructuras isostáticas y muros de contención	1/300
Estructuras reticuladas con tabiquería de separación	1/500
Estructuras de paneles prefabricados	1/700
Muros de carga sin armar con flexión cóncava hacia arriba	1/1000
Muros de carga sin armar con flexión cóncava hacia abajo	1/2000

Tabla 2.3. Valores límite basados en la distorsión horizontal

Tipo de estructura	Limite
Muros de carga	1/2000

Distorsión angular: Asiento diferencial entre dos puntos dividido por la distancia

Distorsión horizontal: Desplazamiento horizontal diferencial entre dos puntos dividido por la distancia que los separa

CRITERIOS GENERALES DE PROYECTO

COMPROBACIÓN DEL E.L.U. HUNDIMIENTO (tensiones del terreno o reacciones de los pilotes) Y DEFINICIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA CIMENTACIÓN

Se combinan las siguientes acciones SIN MAYORAR (γ_E = 1,0):

- **Acciones transmitidas por la estructura**
- **Peso propio de la cimentación**
- **Peso del terreno sobre la cimentación**

Comprobación ELU de hundimiento en zapatas: $\sigma_{\max} \leq \sigma_{adm} = \begin{cases} q_h/3 & (\text{sit. persist. o transit.}) \\ q_h/2 & (\text{sit. extraordinaria}) \end{cases}$

COMPROBACIÓN DEL E.L.U. DE CAPACIDAD ESTRUCTURAL DE LA CIMENTACIÓN

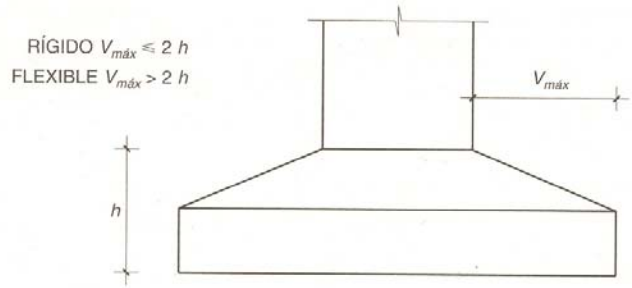
Se combinan las siguientes acciones MAYORADAS (γ_E = 1,35 ó 1,5 en sit. persist./transit. γ_E = 1,0 en sit. extraordin.):

- **Sólo acciones transmitidas por la estructura (los esfuerzos en cualquier sección, producto de la reacción debida al PP_{zap} o al PP_{terr}, se equilibran con dichos PP_{zap} o PP_{terr})**

MECANISMO RESISTENTE

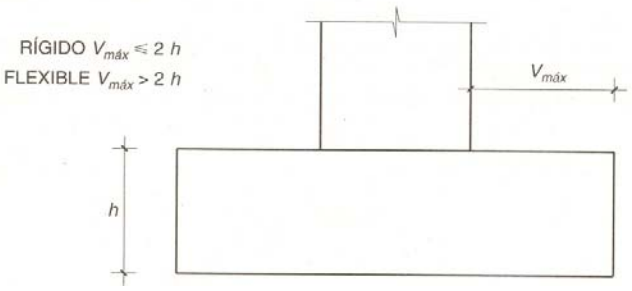
ZAPATAS FLEXIBLES

- **Vuelo máx. > 2*h***
- **Es aplicable la TEORÍA GENERAL DE LA FLEXIÓN**



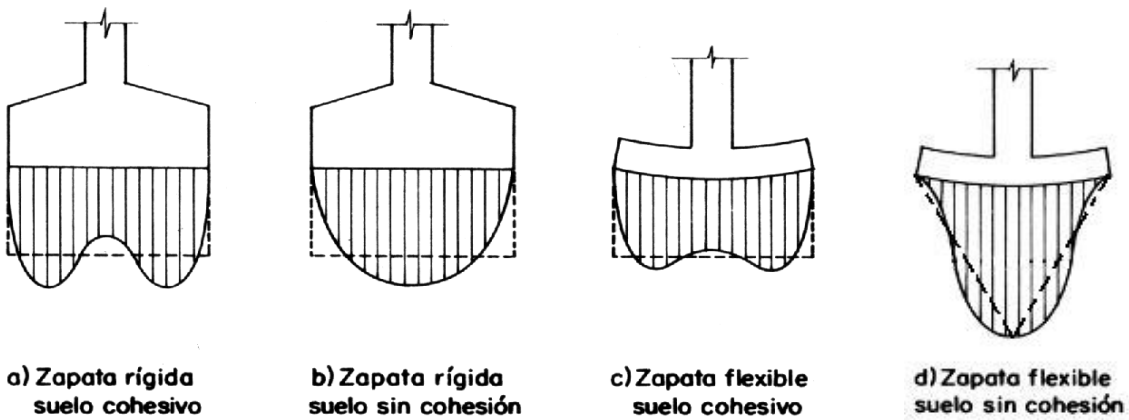
ZAPATAS RÍGIDAS

- **Vuelo máx. ≤ 2*h***
- **No es aplicable la Teoría General de la Flexión**
- **Es necesario definir un modelo de BIELAS Y TIRANTES**

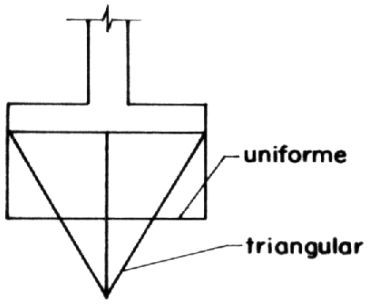


Fuente: EHE-08, 2011

DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES DEL TERRENO



Fuente: Arroyo *et al*, 2018



e) Distribuciones empleadas en la práctica

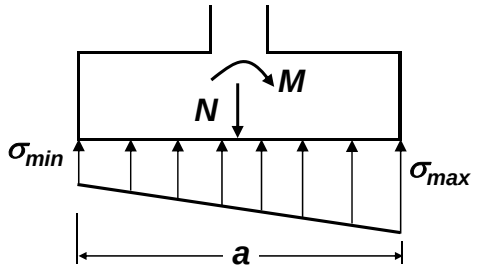
	TERRENO	
ZAPATA	**Cohesivo**	**Sin cohesión**
Rígida	Uniforme	Uniforme
Flexible	Uniforme	Triangular

DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN MÁXIMA

Caso *M/N* ≤ *a*/6 (Ley trapecial de presiones, RECOMENDABLE)

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{ab} + \frac{6M}{a^2 b}$$

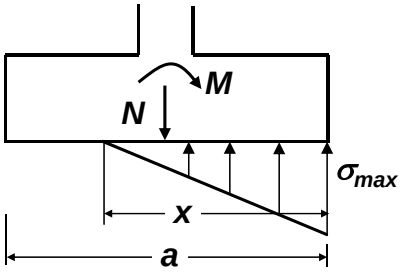
$$\sigma_{\min} = \frac{N}{ab} - \frac{6M}{a^2 b}$$



$$\sigma_{\max} = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} = \frac{N}{A} + \frac{M}{I/(a/2)} = \frac{N}{ab} + \frac{M\,a/2}{ba^3/12} = \frac{N}{ab} + \frac{6M}{a^2 b}$$

Caso *M/N* > *a*/6 (Distribución triangular de presiones)

$$\sigma_{\max} = \frac{2N}{3b\left(\frac{a}{2} - \frac{M}{N}\right)} \;;\; x = \frac{2N}{\sigma_{\max} b}$$



***a*, *b* = Dimensiones en planta de la zapata**

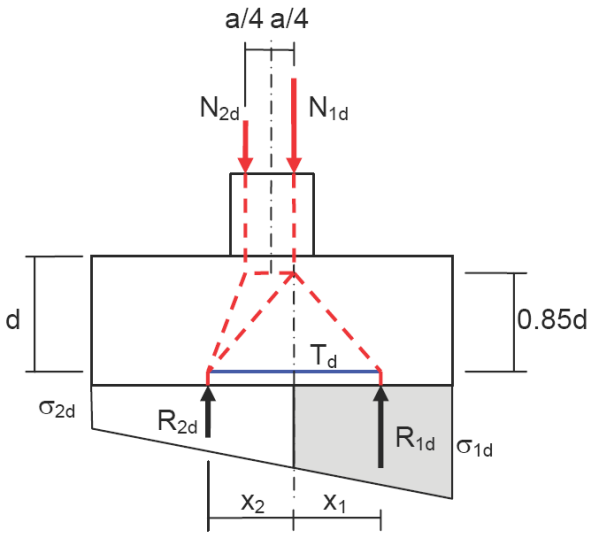
Se recomienda que *x* ≥ 2*a*/3 (ó *a*/2) ⇒ Comprobar seguridad a vuelco

CÁLCULO DE ZAPATAS H.A. RÍGIDAS

DIMENSIONAMIENTO DE LA ARMADURA (Caso *M/N* ≤ a/6)

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

- f_{yd} ≤ 400 MPa
- R_{1d} resultante de tensiones del bloque sombreado
- x_1 distancia de R_{1d} a la línea de N_{1d}
- σ_{1d} , σ_{2d} tensiones mayoradas teniendo en cuenta sólo las acciones transmitidas por la estructura



Fuente: EHE-08, 2011

COMPROBACIONES

- NO es necesario realizar la comprobación a Cortante y a Punzonamiento

Dpto. de Ing. Minera y Civil
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
CONSTRUCCIÓN EN HORMIGÓN
1º curso Máster Ing. de Caminos
LECCIÓN 21.2
BASES DE DISEÑO DE CIMENTACIONES. ZAPATAS

CÁLCULO DE ZAPATAS H.A. RÍGIDAS

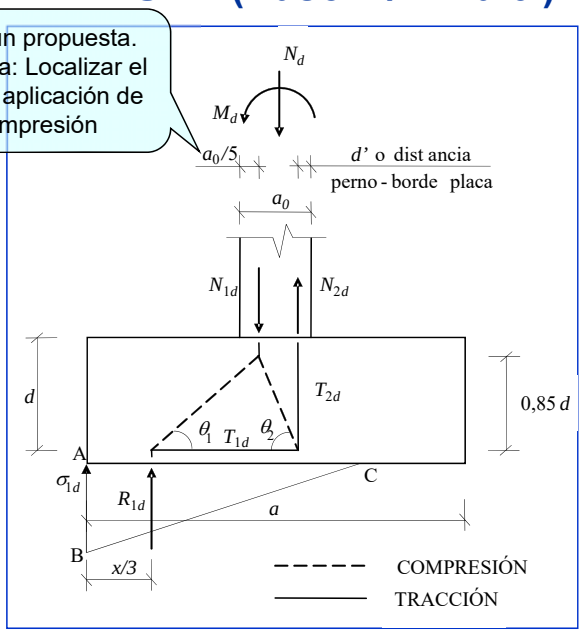
DIMENSIONAMIENTO DE LA ARMADURA (Caso *M/N* > a/6)

$$T_{1d} = \frac{R_{1d}}{\tan\theta_1} = A_s f_{yd}$$

$$T_{2d} = \frac{M_d}{a_0 - d' - a_0/5} - \frac{N_d}{2} = A_s f_{yd}$$

$a_0/5$ es un propuesta. Alternativa: Localizar el punto de aplicación de la compresión

- f_{yd} ≤ 400 MPa
- R_{1d} resultante del bloque ABC
- x distancia AC
- σ_{1d} tensión mayorada debida a las acciones transmitidas por la estructura
- θ_1 $\tan\theta_1 = \dfrac{0{,}85d}{(a-a_0)/2 + a_0/5 - x/3}$



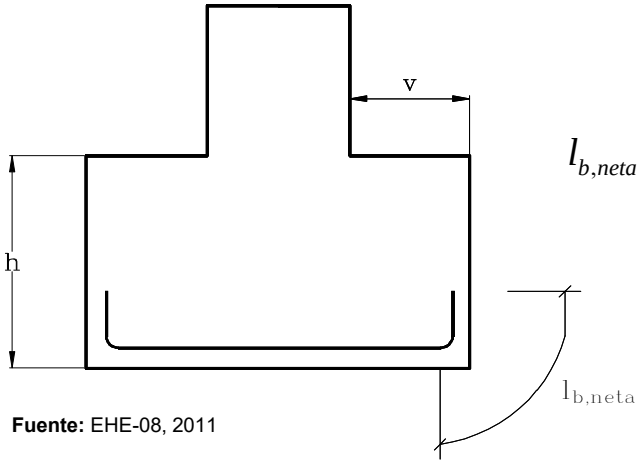
Fuente: Martí, Sánchez y Tomás, 2006

COMPROBACIONES

- Compresión σ_{1cd} en el nudo donde llega N_{1d} $\quad \sigma_{1cd} = \dfrac{N_d + T_{2d}}{2(a_0/5)b_0} \le f_{cd}$
- No comprobar a Cortante y Punzonamiento
- Prolongar y anclar la armadura del pilar sobre la de la zapata
- Se recomienda disponer armadura en la cara superior de la zapata

ANCLAJE DE LAS ARMADURAS EN ZAPATAS RÍGIDAS

LONGITUDES BASICAS DE ANCLAJE (l_b) EN ZAPATAS (cm)										
Diámetro	HA-25		HA-30		HA-35		HA-40		HA-45 y HA-50	
	B 400 S	B 500 S	B 400 S	B 500 S	B 400 S	B 500 S	B 400 S	B 500 S	B 400 S	B 500 S
6	12	15	12	15	12	15	12	15	12	15
8	16	20	16	20	16	20	16	20	16	20
10	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25
12	24	30	24	30	24	30	24	30	24	30
14	28	35	28	35	28	35	28	35	28	35
16	32	40	32	40	32	40	32	40	32	40
20	48	60	40	52	40	50	40	50	40	50
25	75	94	63	81	56	75	50	69	50	63
32	123	154	102	133	92	123	82	113	72	102



Fuente: EHE-08, 2011

$$l_{b,neta} = l_b \frac{A_{s,cálculo}}{A_{s,real}} \geq \begin{cases} 10\phi \\ 15\text{ cm} \\ \frac{1}{3} l_b \end{cases}$$

Anclaje clásico.

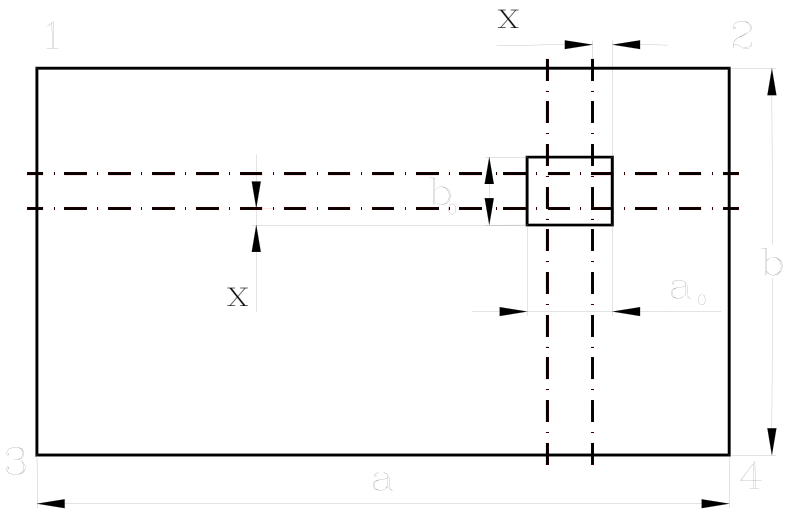
Según modelo biela-tirante:

¡No existe equilibrio!

CÁLCULO DE ZAPATAS H.A. FLEXIBLES

SECCIONES DE CÁLCULO

Secciones S_1 de cálculo a flexión



Fuente: Martí, Sánchez y Tomás, 2006

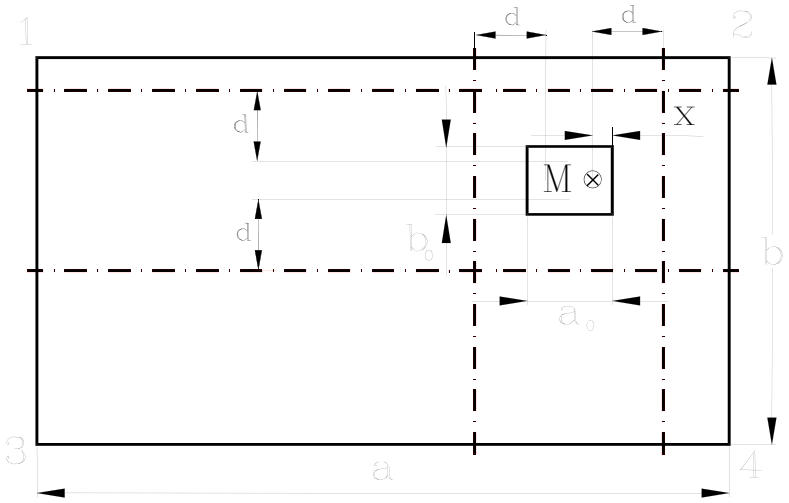
x = 0,15a_0 (soporte de hormigón)

= Punto medio entre la cara del soporte y el borde de la placa de anclaje (soporte metálico)

CÁLCULO DE ZAPATAS H.A. FLEXIBLES

SECCIONES DE CÁLCULO

Secciones S_2 de cálculo a cortante



Fuente: Martí, Sánchez y Tomás, 2006

x **= 0 (soporte de hormigón)**

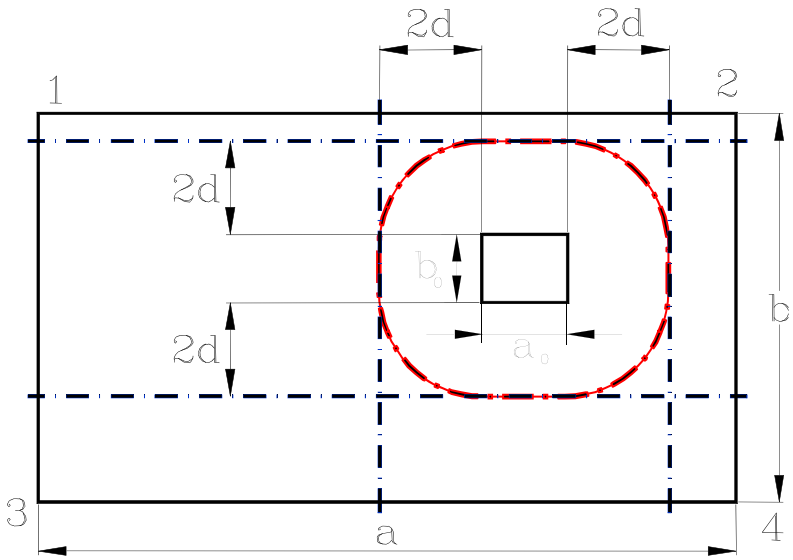
= distancia del borde de la placa de anclaje al punto M (sop. metálico)

M = Punto medio entre la cara del soporte y el borde de la placa anclaje

CÁLCULO DE ZAPATAS H.A. FLEXIBLES

SECCIONES DE CÁLCULO

Sección S_2' de cálculo a punzonamiento



Fuente: Martí, Sánchez y Tomás, 2006

CÁLCULO DE ZAPATAS H.A. FLEXIBLES

DETERMINACIÓN DE MOMENTOS FLECTORES

- **Longitudes de los voladizos:**

$$l_d = \frac{a}{2} - e - \frac{a_0}{2} + x \;;\; l_i = \frac{a}{2} + e - \frac{a_0}{2} + x$$

- **Tensiones de cálculo en el terreno a la altura de las secciones:**

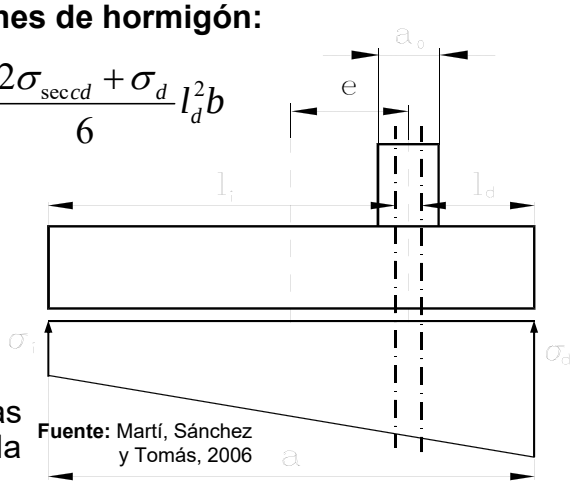
$$\sigma_{secc,d} = \frac{l_d}{a}(\sigma_i - \sigma_d) + \sigma_d \;;\; \sigma_{secc,i} = \frac{l_i}{a}(\sigma_d - \sigma_i) + \sigma_i$$

- **Momentos flectores en las secciones de hormigón:**

$$M_{fli} = \frac{2\sigma_i + \sigma_{secci}}{6} l_i^2 b \;;\; M_{fld} = \frac{2\sigma_{seccd} + \sigma_d}{6} l_d^2 b$$

- **Momento de cálculo:**

$$\boxed{M_d = \max\left[M_{fli}, M_{fld}\right]}$$



Fuente: Martí, Sánchez y Tomás, 2006

Nota: Estas expresiones son válidas para el caso de toda la base comprimida

Dpto. de Ing. Minera y Civil
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
CONSTRUCCIÓN EN HORMIGÓN
1º curso Máster Ing. de Caminos
LECCIÓN 21.2
BASES DE DISEÑO DE CIMENTACIONES. ZAPATAS

CÁLCULO DE ZAPATAS H.A. FLEXIBLES

DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS CORTANTES

- **Longitudes de los voladizos:**

$$l_d = \frac{a}{2} - e - \frac{a_0}{2} + x - d \;;\; l_i = \frac{a}{2} + e - \frac{a_0}{2} + x - d$$

- **Tensiones de cálculo en el terreno a la altura de las secciones:**

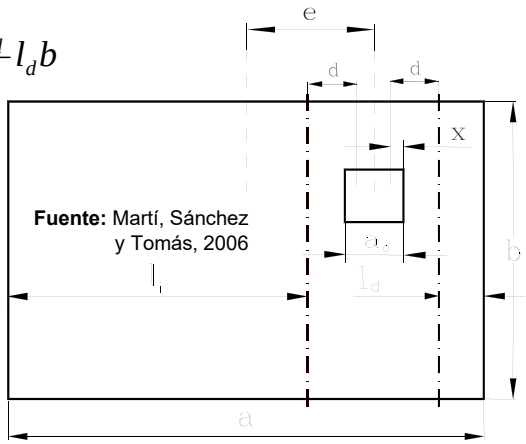
$$\sigma_{secc,d} = \frac{l_d}{a}(\sigma_i - \sigma_d) + \sigma_d \;;\; \sigma_{secc,i} = \frac{l_i}{a}(\sigma_d - \sigma_i) + \sigma_i$$

- **Esfuerzos cortantes de cálculo en las secciones de hormigón:**

$$V_{fli} = \frac{\sigma_i + \sigma_{secci}}{2} l_i b \;;\; V_{fld} = \frac{\sigma_{seccd} + \sigma_d}{2} l_d b$$

- **Cortante de cálculo:**

$$\boxed{V_d = \max\left[V_{fli}, V_{fld}\right]}$$



Fuente: Martí, Sánchez y Tomás, 2006

Nota: Estas expresiones son válidas para el caso de toda la base comprimida

CÁLCULO DE ZAPATAS H.A. FLEXIBLES

ÁREA Y C.D.G. DE UN TRAPECIO

$$A = \frac{a+b}{2} h$$

$$y_{cdg} = \frac{2a+b}{3(a+b)} h$$

donde:

- ***a*** **= base menor**
- ***b*** **= base mayor**
- ***h*** **= altura**
- y_{cdg} **= posición del c.d.g. (medida desde la base mayor *b*)**

CÁLCULO DE ZAPATAS H.A. FLEXIBLES

DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO DE PUNZONAMIENTO

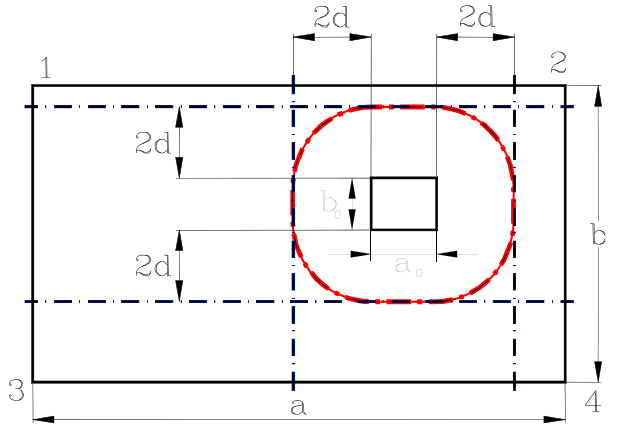
- **Esfuerzo de punzonamiento de cálculo (F_{sd}):**

  Axil de cálculo menos reacción neta actuando dentro del perímetro crítico a una distancia *h*/2 de la sección del soporte = $N_d - (\sigma_d A_{crit,h/2} - PP_{zap,crit,h/2})$

- **Esfuerzo efectivo de punzonamiento:**

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

	N	N+M			
		Sop. inter.	Sop. borde	Sop. esq.	Losa cimen.
β	1,00	1,15	1,40	1,50	1,05



Fuente: Martí, Sánchez y Tomás, 2006

CÁLCULO DE ZAPATAS H.A. FLEXIBLES

DETERMINACIÓN DE LA ARMADURA DE FLEXIÓN

Armadura resistente

- $M_d \leq 0{,}375 U_0 d$ $\quad U_{s1} = U_0\left(1-\sqrt{1-\frac{2M_d}{U_0 d}}\right)$ con $U_0 = f_{cd} bd$
- $M_d > 0{,}375 U_0 d$ $\quad U_{s2} = \frac{M_d - 0{,}375 U_0 d}{d - d'}$

$$U_{s1} = 0{,}5 U_0 + U_{s2}$$

Armadura mínima (para todos los tipos - rígidas y flexibles -)

- **Cuantía mecánica mínima:**

$$A_s \geq 0{,}04 A_c \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \quad \text{con} \quad A_c = \text{área sección hormigón}$$

admitiéndose la reducción $\alpha = 1{,}5 - 12{,}5 \frac{A_s f_{yd}}{A_c f_{cd}} \geq 1$

- **Cuantía geométrica mínima:**

  Armadura dispuesta en la cara inferior en cada dirección

	Tipo Acero	
	B 400 S	B 500 S
Armadura mínima	$0{,}001 A_c$	$0{,}0009 A_c$

CÁLCULO DE ZAPATAS H.A. FLEXIBLES

COMPROBACIÓN DE CORTANTE

$$V_d \leq V_{u2} = [(0{,}18/\gamma_c)\, \xi\, (100\rho_1 f_{cv})^{1/3}]bd \geq [(0{,}075/\gamma_c)\, \xi^{3/2} f_{cv}^{1/2}]bd$$

siendo:

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} <= 2 \quad d \text{ en mm;}$$

$f_{cv} = f_{ck} \leq 60$ **MPa**

d **canto útil**

b **ancho de la sección de cálculo S_2**

ρ_1 **cuantía geométrica armadura longitudinal traccionada:**

$$\rho_1 = \frac{A_s}{bd} \leq 0{,}02$$

- **Si no se cumple la desigualdad, habría que disponer armadura de cortante (art. 44 EHE-08)**
- **Normalmente es una solución antieconómica y es preferible un aumento de canto, si es posible**

CÁLCULO DE ZAPATAS H.A. FLEXIBLES

COMPROBACIÓN DE PUNZONAMIENTO (I)

- **Superficie crítica sobre la que actúa $F_{sd,ef}$:**

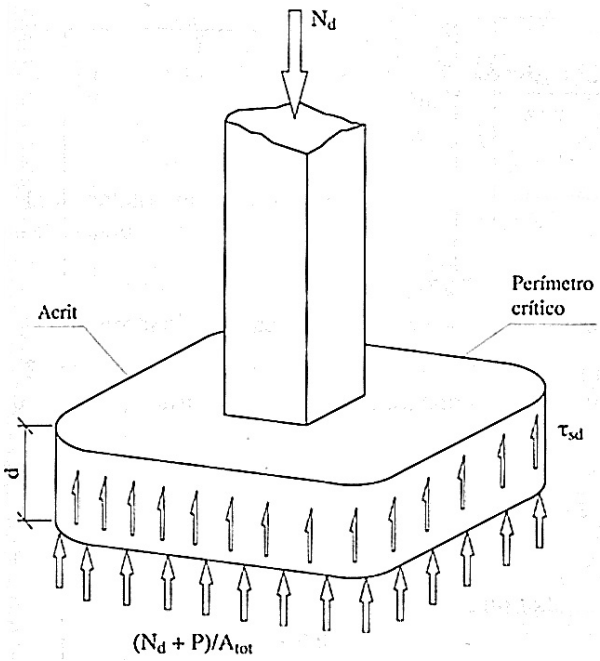
$$Sup = u_1 d$$

siendo u_1 perímetro crítico de la sección de cálculo S_2':

$$u_1 = 2(a_0 + b_0 + 2\pi d)$$

- **Tensión tangencial de cálculo en el perímetro crítico:**

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd,ef}}{Sup}$$



Dpto. de Ing. Minera y Civil
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
CONSTRUCCIÓN EN HORMIGÓN
1º curso Máster Ing. de Caminos
LECCIÓN 21.2
BASES DE DISEÑO DE CIMENTACIONES. ZAPATAS

CÁLCULO DE ZAPATAS H.A. FLEXIBLES

COMPROBACIÓN DE PUNZONAMIENTO (II)

- **Comprobación:**

$$\tau_{sd} \leq \tau_{rd} = (0{,}18/\gamma_c)\ \xi\,(100\rho_l f_{cv})^{1/3} \geq (0{,}075/\gamma_c)\ \xi^{3/2}\ f_{cv}^{1/2}$$

ρ_l cuantía geométrica armadura longitudinal traccionada:

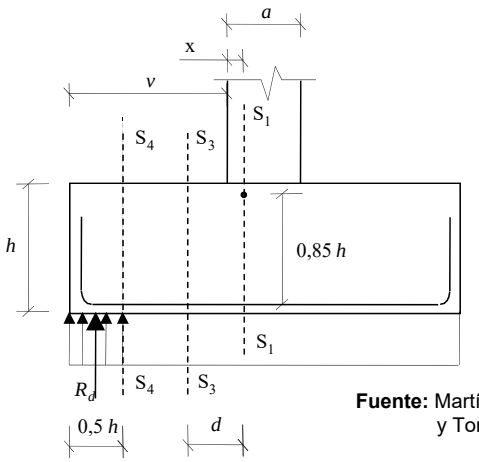
$$\rho_l = \sqrt{\rho_x \rho_y} <= 0{,}02$$

ρ_x , ρ_y cuantías en dos direcc. perpendiculares. En cada dirección es la que hay en un ancho = dimensión del soporte + 3*d* a cada lado del soporte (o hasta el borde de la losa, si se trata de un soporte de borde o esquina)

- **Si no se cumple la desigualdad, habría que disponer armadura de punzonamiento (art. 46 EHE-08)**
- **Normalmente es una solución antieconómica y es preferible un aumento de canto, si es posible**
- **Si u_1 es exterior a la zapata en parte, no hay rotura a punzonamiento**

ANCLAJE DE LAS ARMADURAS EN ZAPATAS FLEXIBLES

LONGITUDES BASICAS DE ANCLAJE (l_b) EN ZAPATAS (cm)										
Diámetro	HA-25		HA-30		HA-35		HA-40		HA-45 y HA-50	
	B 400 S	B 500 S	B 400 S	B 500 S	B 400 S	B 500 S	B 400 S	B 500 S	B 400 S	B 500 S
6	12	15	12	15	12	15	12	15	12	15
8	16	20	16	20	16	20	16	20	16	20
10	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25
12	24	30	24	30	24	30	24	30	24	30
14	28	35	28	35	28	35	28	35	28	35
16	32	40	32	40	32	40	32	40	32	40
20	48	60	40	52	40	50	40	50	40	50
25	75	94	63	81	56	75	50	69	50	63
32	123	154	102	133	92	123	82	113	72	102



Fuente: Martí, Sánchez y Tomás, 2006

La mayor de las dos siguientes:

A) Anclaje desde S_3

$$l_{b,neta,A} = l_b \frac{A_{s,cálculo}}{A_{s,real}} \geq \begin{cases} 10\phi \\ 15\text{ cm} \\ \frac{1}{3} l_b \end{cases}$$

B) Anclaje desde S_4

$$l_{b,neta,B} = l_b \frac{T_d}{A_{s,real} f_{yd}}$$

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

Nota: Para σ_{adm} < 0,2 MPa → ↓ *h*, pudiendo esta formulación conducir, innecesariamente, a disponer patilla (ver *Informes de la Construcción*, Vol. 61, Nº 516, oct-dic 2009)