

## **8 PILOTES, ENCEPADOS Y VIGAS DE ATADO**

### **8.1 EL PILOTE COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL**

Anteriormente se ha determinado la carga de hundimiento de los pilotes, es decir, la capacidad del terreno para absorber la carga que los pilares le transmiten, pero el pilote por si mismo debe ser capaz de resistir ese esfuerzo de transmisión de carga. La carga máxima que el pilote puede soportar se conoce con el nombre de tope estructural. Este valor debe ser igual o inferior a la carga de hundimiento del pilote en el terreno y por lo tanto inferior a la carga transmitida por el pilar.

Los pilotes, normalmente para cimentación, se calculan para soportar compresiones pues los esfuerzos que los edificios transmiten a la cimentación son principalmente verticales. Los momentos que reciben los encepados son tan pequeños que se pueden despreciar, si además la cimentación está arriostrada con vigas que atan los encepados, los momentos que los pilotes reciben serán inapreciables, pues las vigas absorberán la mayor parte del momento, la cantidad de momento que cada elemento que confluye al encepado absorbe es proporcional a su rigidez.

El tope estructural es el producto del área de cálculo del pilote por el coeficiente de trabajo del hormigón del pilote:

$$Q_{\text{TOPE}} = \sigma \cdot A$$

Donde:

A el área de cálculo del pilote, que se calcula con el diámetro nominal del pilote si es encamisado, y con un 95% del diámetro nominal si es un pilote sin camisa de chapa (según la EHE, artículo 59.6. Además este diámetro de cálculo debe cumplir  $D_{\text{nom}} - 50 \text{ mm} \leq D_{\text{cal}} = 0,95 D_{\text{nom}} \leq D_{\text{nom}} - 20 \text{ mm}$ ). Como es frecuente no conocer con certeza el tipo de pilote hasta que se empiezan a ejecutar estos, conviene proyectar considerando que el pilote es in situ y sin camisa de chapa. Es decir, considerando:

$$A = \frac{\pi \cdot (0'95 \cdot d_{\text{nom}})^2}{4}$$

$\sigma$  Es el coeficiente de trabajo del hormigón que depende del grado de control del hormigonado de los pilotes.

En la Norma Tecnológica de Edificación (NTE) el coeficiente de trabajo del hormigón es de 40 Kp/cm<sup>2</sup> si el pilote se hormigona en seco y 35 Kp/cm<sup>2</sup> si es bajo agua, pero estos valores son muy conservadores ya que en dicha norma la resistencia característica del hormigón es de 175 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia mínima del hormigón en la actualidad es de 250 kg/cm<sup>2</sup> y por lo tanto los valores de coeficiente de trabajo podrían aumentarse. El valor a elegir depende del criterio del proyectista y su confianza o desconfianza en la buena o mala ejecución del pilote o el nivel de control en obra, no se debe pasar de un valor de 50 kg/cm<sup>2</sup>. Hay que tener en cuenta que los pilotes son piezas de hormigonado vertical y que son piezas enterradas en un terreno que puede o no desprenderse. Según el CTE, este valor depende del método de ejecución empleado.

Procedimiento	Tipo de pilote	Valores de C [MPa]	
Hincados	Hormigón pretensado o postensado	$0'3 \cdot (f_{ck} - 0'9 \cdot f_p)$	
	Hormigón armado	$0'3 \cdot f_{ck}$	
	Metálicos	$0'3 \cdot f_{yk}$	
	Madera	5	
		Suelo firme	Roca
Perforados <sup>(1)</sup>	Entubados	5	6
	Lodos	4	5
	En seco	4	5
	Barrenados sin control de parámetros	3'5	-
	Barrenados con control de parámetros	4	-

<sup>(1)</sup>Con un control adecuado de la integridad, los pilotes perforados podrán ser utilizados con topes estructurales un 25% mayores.

Tabla 19. Valores recomendados para el tope estructural en pilotes.

## 8.2 EL ARMADO EN PILOTES

La armadura longitudinal que se utiliza para pilotes corresponde a cuantías mínimas geométricas.

SEGÚN LA NORMATIVA EUROPEA UNE-EN 1536

En esta normativa se dan los siguientes valores (tabla 17):

Área de la sección transversal del pilote: $A_c$	Cuantía geométrica mínima de la armadura longitudinal: $A_s$
$A_c \leq 0,5 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0,5 \% A_c$
$0,5 \text{ m}^2 < A_c \leq 1 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0,0025 \text{ m}^2$
$A_c > 1 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0,25 \% A_c$

Tabla 20. Cuantía mínima según UNE-EN-1536.

- La armadura longitudinal no será de diámetro inferior a 12 mm.
- El número de barras será mayor a 4.
- La separación longitudinal no debe ser mayor que 40cm

SEGÚN LA NORMA EHE

- El número de barras para pilotes será mayor o igual a 6 (según la EHE  $\geq 6$ ).
- La separación longitudinal no debe ser superior a 20 cm.

- Los estribos deben ser de diámetro no inferior a  $\frac{1}{4}$  de la armadura longitudinal y su separación no superior a 15 veces el diámetro de dicha armadura.

### 8.3 ENCEPADOS

Los encepados son piezas prismáticas de hormigón armado que transmiten y reparten la carga de los soportes. El número de pilotes por pilar depende de la carga que el pilar tenga que transmitir y del tope estructural del pilote. En la actualidad se prefiere utilizar pilotes de diámetro grande y por lo tanto pocos pilotes por pilar, se utilizan normalmente encepados con pilotes de uno a cuatro. Conviene arriostrar los encepados de una cimentación, además es imprescindible disponer de vigas centradoras; cuando los encepados son de un pilote en dos direcciones lo más ortogonales posibles; y cuando los encepados son de dos pilotes en la dirección perpendicular a la línea que une a los dos pilotes. Estas vigas de arriostramiento y centradoras tienen como misión absorber momentos debidos a excentricidades entre eje del pilar y el centro geométrico de los pilotes, así como los momentos procedentes de la estructura.

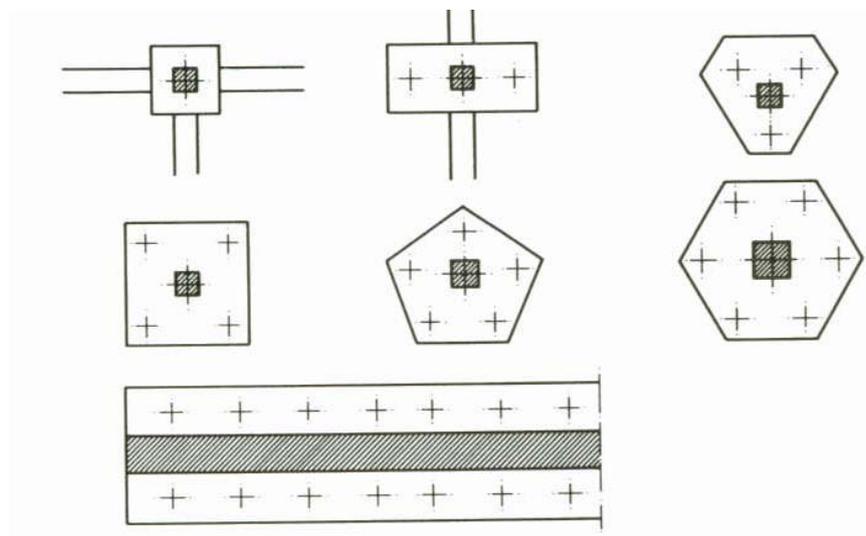


Figura 34. Diversos tipos de encepados.

*Figura 35. Dimensiones recomendadas en encepados.*

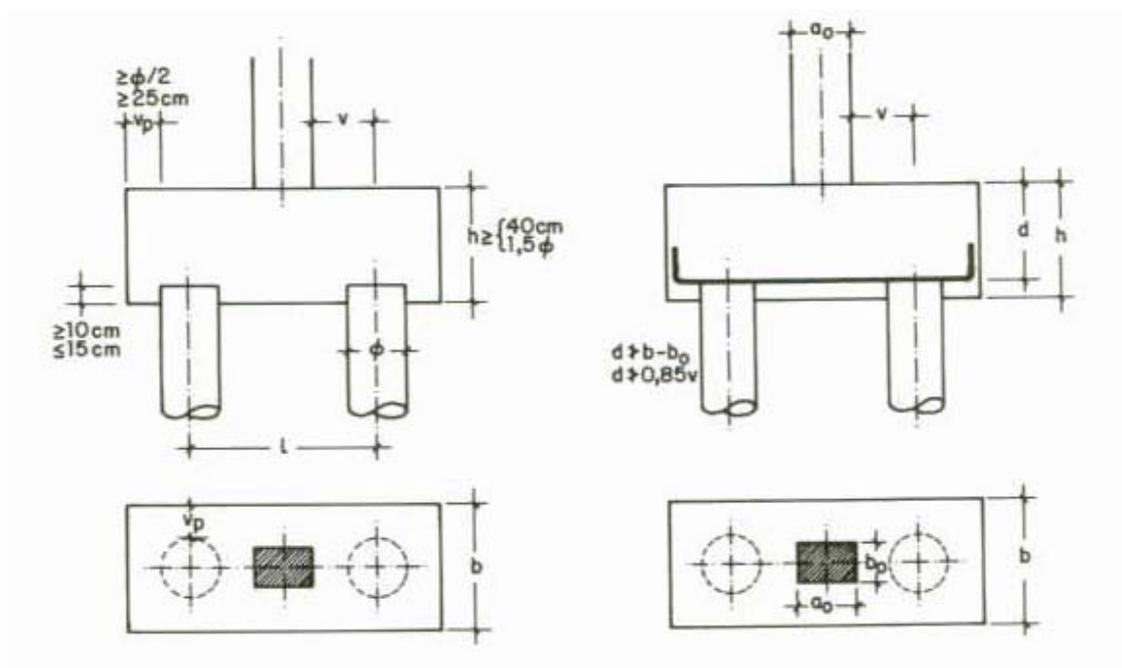
### 8.3.1 CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO

La forma y dimensiones en planta de los encepados dependen del número de los pilotes, de las dimensiones de éstos y de su separación. La separación mínima entre ejes de pilotes debe ser dos veces el diámetro de los mismos y no menor de 75 cm.

Esta separación debe mantenerse a lo largo de todo el pilote. A veces, si no se consigue que la resultante de las cargas pase por el centro de gravedad del pilotaje, conviene aumentar la separación de los pilotes para disminuir la carga en los mismos debida al momento producido por la excentricidad.

El canto del encepado se fija, generalmente, por consideraciones económicas de modo que no necesite armadura de cortante.

En la siguiente figura se indican algunas limitaciones para el diseño de los encepados.



## ENCEPADOS RÍGIDOS Y FLEXIBLES. CÁLCULO ESTRUCTURAL

Se denominan encepados rígido aquellos en los que el vuelo  $v$ , en cualquier dirección, no supera el doble del canto total ( $v_{\max} \leq 2h$ ). Se consideran encepados flexibles los que presentan un vuelo superior a  $2h$  en alguna dirección, ( $v_{\max} > 2h$ ). Los encepados rígidos se calculan empleando el modelo de bielas y tirantes y los encepados flexibles se calculan aplicando la teoría normal de flexión. La armadura principal de los encepados se sitúa en la cara inferior en bandas que van de un pilote a otro.

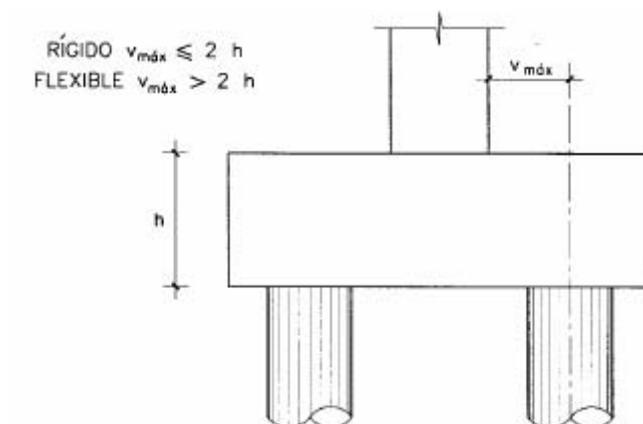


Figura 36. Relación canto-vuelo para determinar la rigidez o flexibilidad del encepado.

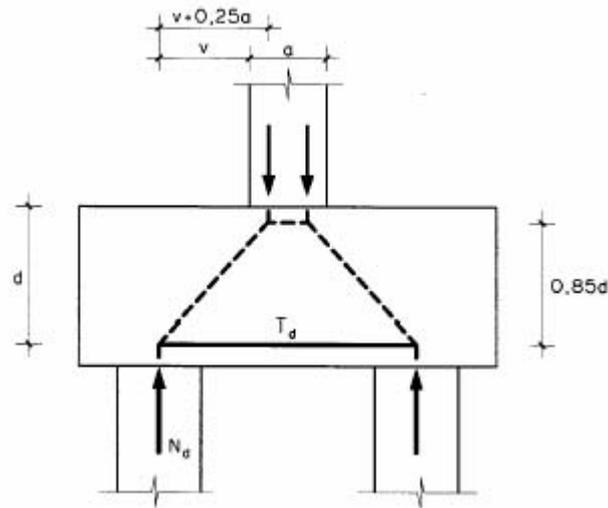


Figura 37. Modelo de bielas y tirantes para el cálculo de pilotes.

## ENCEPADO RÍGIDO SOBRE DOS PILOTES

Se empleará el método de las bielas y tirantes para el cálculo de la armadura principal, esta deberá resistir la tracción de cálculo  $T_d$  que viene dada por la expresión:

$$T_d = \frac{N_d \cdot (v + 0,25 \cdot a)}{(0,85 \cdot D)} = A_s \cdot f_{yd}$$

Donde:

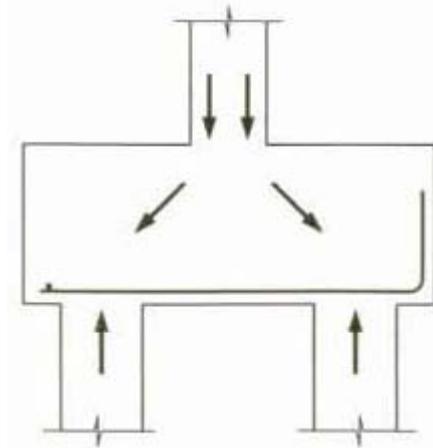
$$f_{yd} \geq 400 \text{ N/mm}^2$$

$N_d$  El axil de cálculo del pilote más cargado.

$D$  El canto útil del pilote más cargado.

La armadura principal calculada  $A_s$  se colocará en toda la longitud del encepado, y se anclará por prolongación recta, en ángulo recto o mediante barras transversales soldadas, a partir de planos verticales que pasen por el eje de cada pilote. El efecto

beneficioso en el anclaje de la compresión vertical del pilote permite reducir en un 20% su longitud de anclaje.



*Figura 38. Formas de anclaje de la armadura principal.*

La armadura secundaria consistirá en:

- Una armadura longitudinal dispuesta en la cara superior del encepado y extendida a toda la longitud del mismo, cuya capacidad mecánica no debe ser inferior al 10% de la de la principal.
- Una armadura horizontal y vertical dispuesta en retícula en las caras laterales. La vertical consistirá en cercos cerrados que atornillen a la armadura longitudinal inferior y superior. La horizontal consistirá en cercos cerrados que atornillen a la armadura vertical antes descrita. La cuantía geométrica de estas armaduras, referidas al área de la sección de hormigón perpendicular a su dirección, debe ser como mínimo de 0'4%.

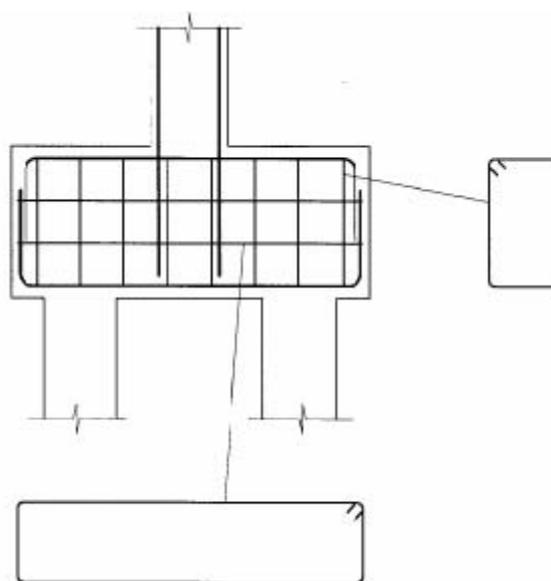


Figura 39. Disposición de la armadura secundaria.

## ENCEPADO RÍGIDO SOBRE VARIOS PILOTES

En el caso de encepados sobre tres pilotes colocados según los vértices de un triángulo, con el pilar situado en el centro del triángulo, la armadura principal entre cada pareja de pilotes puede obtenerse a partir de la tracción  $T_d$  dada por la expresión:

$$T_d = \frac{0'68 \cdot (0'85 \cdot l + 0'25 \cdot a) \cdot N_d}{D} = A_s \cdot f_{yd}$$

Donde:

$$f_{yd} \geq 400 \text{ N/mm}^2.$$

$R_d$  Es el axil de cálculo del pilote más cargado.

$D$  El canto útil del pilote más cargado.

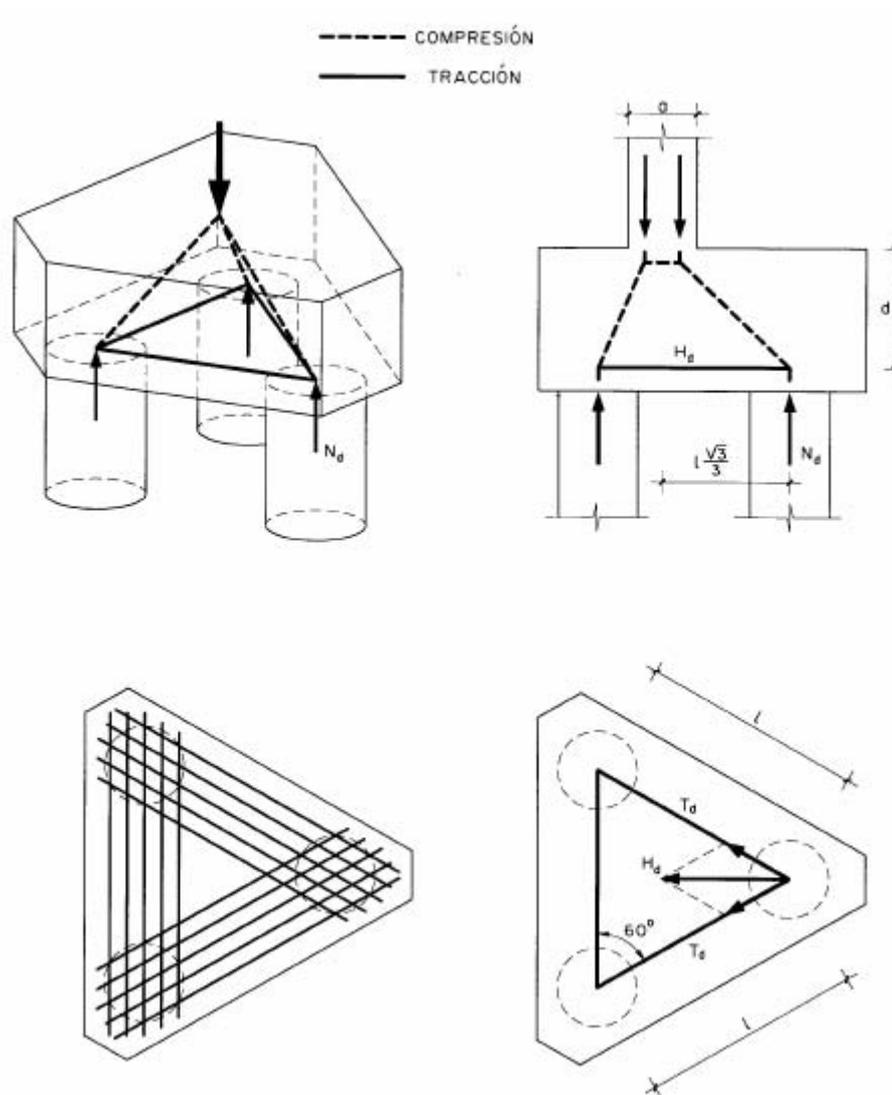


Figura 40. Mecanismo de tirantes y bielas en un encepado de tres pilotes.

En el caso de encepados sobre cuatro pilotes colocados según los vértices de un cuadrado o rectángulo, con el pilar situado en el centro, la armadura principal entre cada pareja de pilotes puede obtenerse de las expresiones:

$$T_d = \frac{(0'5 \cdot l_1 + 0'25 \cdot a_1) \cdot N_d}{0'85 \cdot D} = A_s \cdot f_{yd}$$

$$T_d = \frac{(0'5 \cdot l_2 + 0'25 \cdot a_2) \cdot N_d}{0'85 \cdot D} = A_s \cdot f_{yd}$$

Donde:

$f_{yd} \geq 400 \text{ N/mm}^2$ .

$R_d$  Es el axil de cálculo del pilote más cargado.

D El canto útil del pilote más cargado.

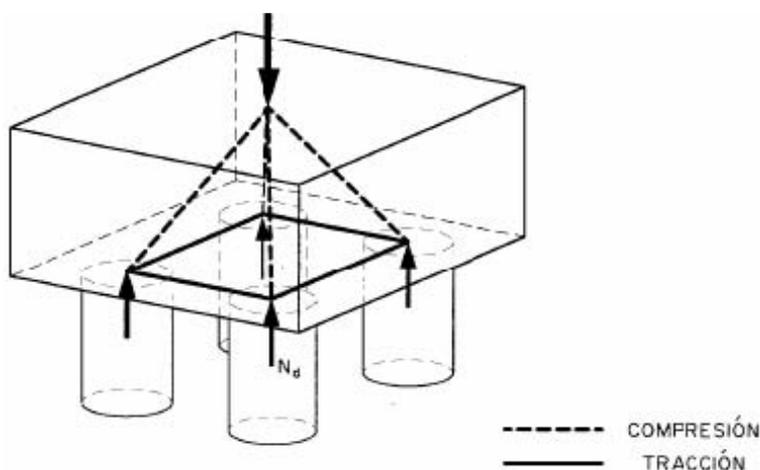


Figura 41. Mecanismo de tirantes y bielas en un encepado de cuatro pilotes.

La armadura principal debe disponerse en bandas sobre los pilotes. Se define como banda o faja una zona cuyo eje es la línea que une los centros de los pilotes, y cuyo ancho es igual al diámetro del pilote más dos veces la distancia entre la cara superior del pilote y el centro de gravedad de la armadura del tirante.

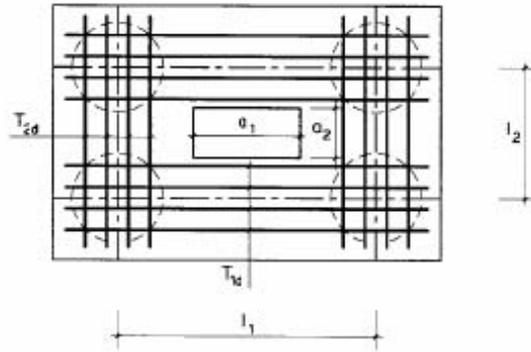


Figura 42. Armadura principal en un encepado de cuatro pilotes.

La armadura secundaria superior se dispondrá en retícula, cuya capacidad mecánica en cada sentido no será menor de  $\frac{1}{4}$  de la capacidad mecánica de la armadura colocada en las bandas o fajas, y una armadura secundaria vertical formada por cercos atando la armadura principal de las bandas.

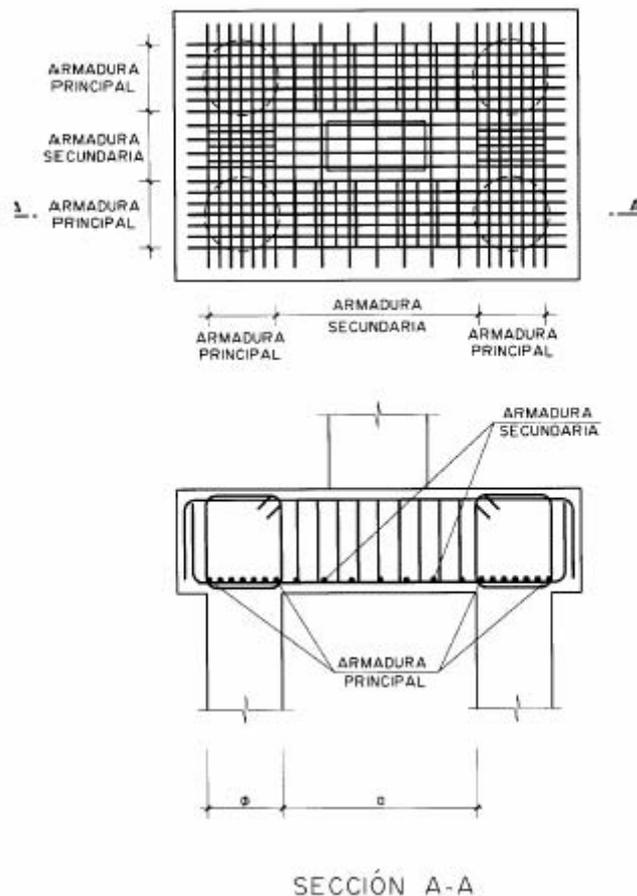


Figura 43. Disposición de la armadura principal.

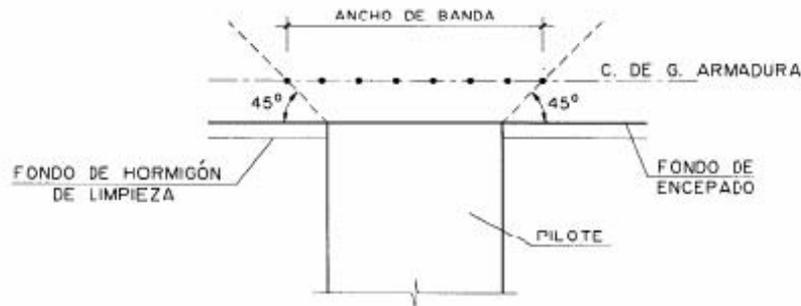


Figura 44. Ancho de banda.

## ENCEPADO FLEXIBLE

Se calcula de forma análoga al de las zapatas flexibles. Se considera la sección de referencia  $s_1-s_1$  que es vertical, paralela a la cara del soporte o muro y situada hacia dentro de dicha cara a una distancia de la misma de  $0,15a$ , siendo  $a$  la dimensión del soporte o muro. En esta sección  $s_1-s_1$  se obtendrá el momento flector que servirá para dimensionar la armadura principal del encepado.

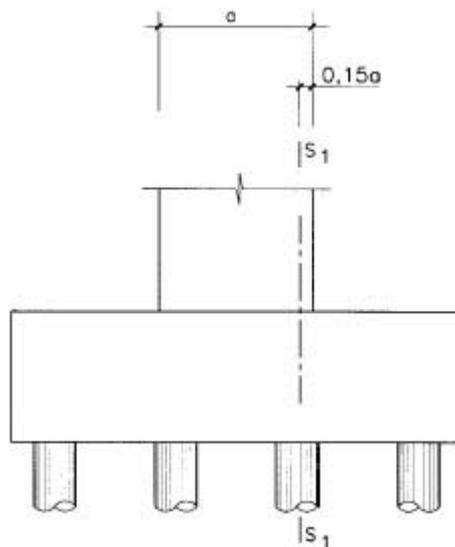


Figura 45. Sección de cálculo del encepado flexible.

La armadura principal se dispondrá en las bandas que unen los pilotes siguiendo las mismas indicaciones que para los encepados rígidos. Las armaduras secundarias horizontales y verticales seguirán las mismas indicaciones que para los encepados rígidos.

Para el cortante se considera otra sección que es vertical, y paralela a la cara del soporte o muro situada a una distancia de la misma igual al canto útil del encepado.

## 8.4 EXISTENCIA DE FUERZAS HORIZONTALES

Los esfuerzos horizontales que provocan el viento y el sismo, en estructuras de edificación normales no suelen ser mayores del 10% de las cargas verticales. Existen casos en los que estas cargas horizontales son mayores como por ejemplo las naves industriales, que tienen muy poca carga muerta y el viento en ellas tiene un peso específico mayor

Cuando las fuerzas horizontales son importantes se puede recurrir a inclinar los pilotes de forma que estos absorban esta carga horizontal transmitida por la estructura.

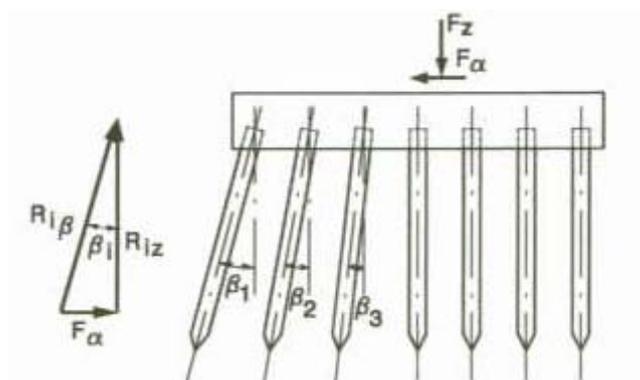


Figura 46. Fuerza horizontal con pilotes inclinados.

Cuando las cargas horizontales no superan el 5% de las verticales se prescinde de considerar estas fuerzas. Sí hay que cuidar bien el empotramiento de los pilotes en los encepados y arriostrar los encepados para que estos esfuerzos horizontales se repartan por toda la cimentación y no se concentren en una parte de los pilotes.

Cuando las cargas horizontales están entre un 5% y un 10% se puede actuar de varias formas:

- Reforzar los pilotes y su empotramiento en el encepado para que por flexión absorban dichos esfuerzos.
- Arriostrar los encepados o unirlos a elementos rigidizadores de la estructura para absorber los momentos.
- Inclinarse los pilotes si lo anterior no es suficiente o utilizar anclajes.

## REFUERZO DE LOS PILOTES

El refuerzo consiste en determinar el momento máximo del pilote debido a este esfuerzo horizontal y armar el pilote para este momento.

$$M_{\max} = \left(0'5 + 0'3 \cdot \frac{z}{L}\right) \cdot z \cdot L$$

- H la fuerza horizontal en cabeza.
- z profundidad para la que se cumple:

$$\frac{H}{(B \cdot L)} \leq 0'35 \cdot R_{pz}$$

Donde:

B El diámetro del pilote.

$R_{pz}$  Resistencia por la punta del penetrómetro estático a la profundidad  $z$ .

L Longitud elástica del pilote.

$$L = \left( \frac{E_c \cdot I}{R_p} \right)^{1/4}$$

Donde:

$E_c$  El módulo de elasticidad del hormigón.

I Momento de inercia del pilote respecto a su eje.

$R_p$  Resistencia por la punta del penetrómetro estático. Este valor debe calcularse por tanteos sucesivos pues se calcula como la media de los valores hallados en la parte superior del pilote en la longitud elástica L y que aún no conocemos.

Con el  $M_{max}$  se determina el refuerzo de armadura necesario. Este refuerzo se dispone simétrico en una longitud igual a  $l = z + 3L$  contada a partir de la cabeza, o en la totalidad de su longitud si la longitud de todo el pilote L es mayor que ella.

## VIGAS DE ARRIOSTRAMIENTO

Como se ha comentado anteriormente, los encepados de 1 y 2 pilotes se atan con vigas entre encepados de forma que estas puedan absorber momentos debidos a pequeñas excentricidades (no coincidencia entre eje del pilar y el centro geométrico de los pilotes), este atado se realiza en la dirección mecánicamente mas débil en los encepados (encepados de un pilote en dos direcciones sensiblemente ortogonales y en encepados de dos pilotes en la dirección perpendicular a la línea que une los dos ejes de los pilotes). De esta forma se controla que la flexión que les llega a los pilotes es despreciable. En los encepados de 3 o más pilotes no es necesario pero si

es conveniente este tipo de vigas de atado y es obligado cuando la obra está ubicada en zonas sísmicas de segundo o tercer grado de la norma Sismorresistente.

En el cálculo de las vigas centradoras se puede emplear la siguiente expresión para determinar el momento de cálculo de la viga  $M_{1d}$  :

$$M_{1d} = M_d + N_d \cdot e$$

Donde:

$M_d$  Momento de cálculo que el encepado recibe de la estructura en la base del pilar.

$N$  Esfuerzo axial de cálculo del pilar.

$e$  Excentricidad entre el eje del pilar y el centro de gravedad de los pilotes.

La excentricidad puede ser accidental (error de replanteo del pilote o del pilar a posteriori o mala precisión de la máquina de pilotes) o "provocada". En el momento de proyectar estas vigas se puede suponer una excentricidad accidental de 5 cm cuando el control de obra es intenso, 10 cm cuando es normal y 15 cm cuando el control es reducido. La excentricidad "provocada" es la debida a la existencia en la obra de elementos que te impidan centrar los pilares con el centro de gravedad de los pilotes, por ejemplo la existencia de pilares pegados a una medianera o al límite de la parcela de forma que es imposible centrar pilar y pilotes.

Este momento de cálculo  $M_{1d}$  se repartirá entre las vigas que arriostren el encepado y que estén situadas en el mismo plano que el momento, el reparto será proporcional a las rigideces de estas vigas.

En cualquier caso el momento mínimo de dimensionado de esta viga será:

$$M_{2d} = \frac{10}{12 \cdot l^2} \text{ [kN} \cdot \text{m]}$$

Siendo  $l$  la distancia entre los pilares que la viga en cuestión une en metros, es decir la longitud de la viga.

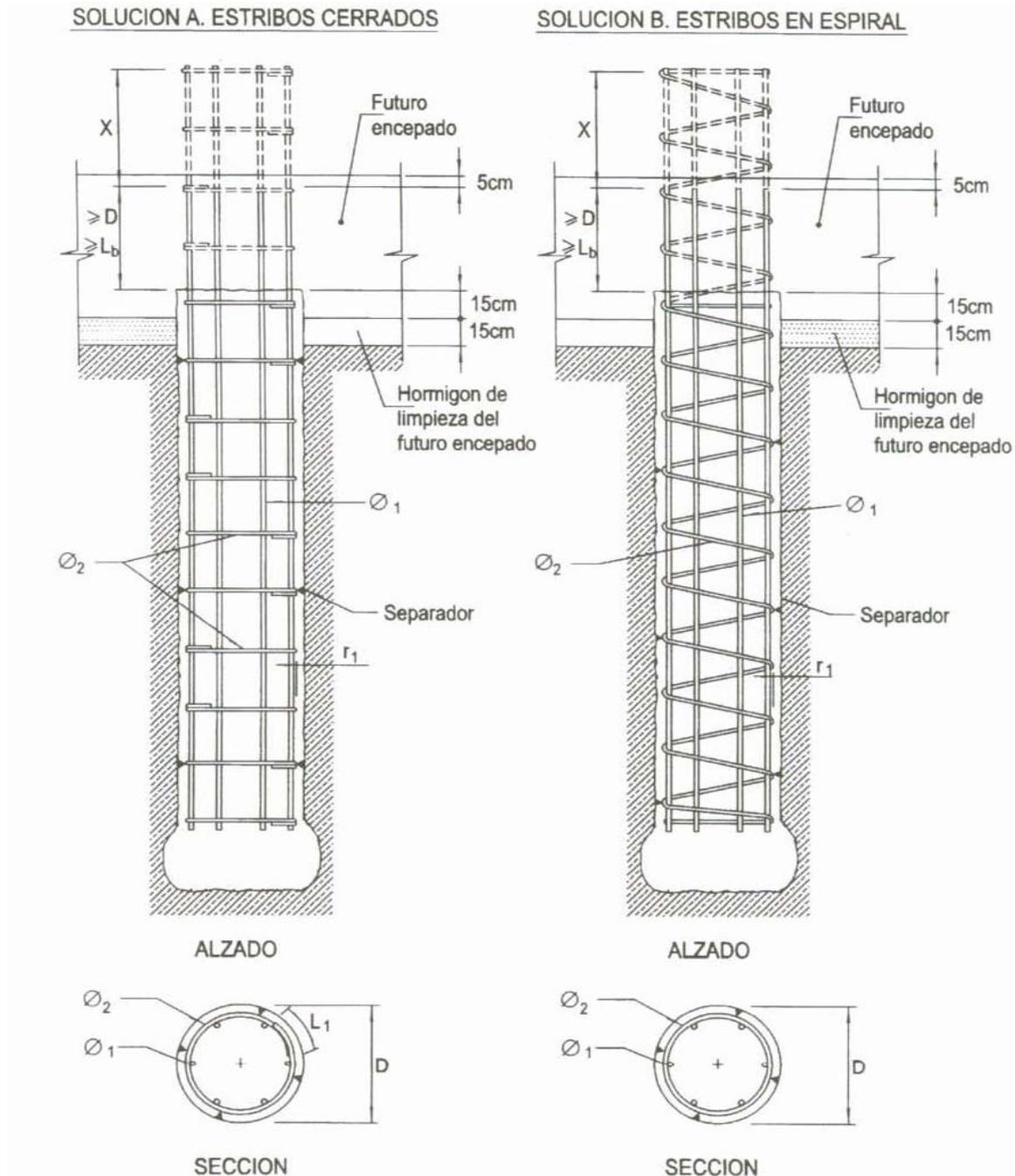
El cortante del cálculo será el mayor de los dos valores:

$$V_{1d} = \frac{M_{1d}}{l} ; V_{2d} = \frac{1}{2}$$

La armadura longitudinal de estas vigas suele ser simétrica. El esfuerzo cortante se considera constante en toda la luz. El ancho  $b$  de la viga no será inferior de  $L/20$  ni el canto  $h$  a  $lL/12$ .

## 8.5 DETALLES GENÉRICOS DE PILOTES Y ENCEPADOS

### 8.5.1 DETALLE DE UN SOLO PILOTE

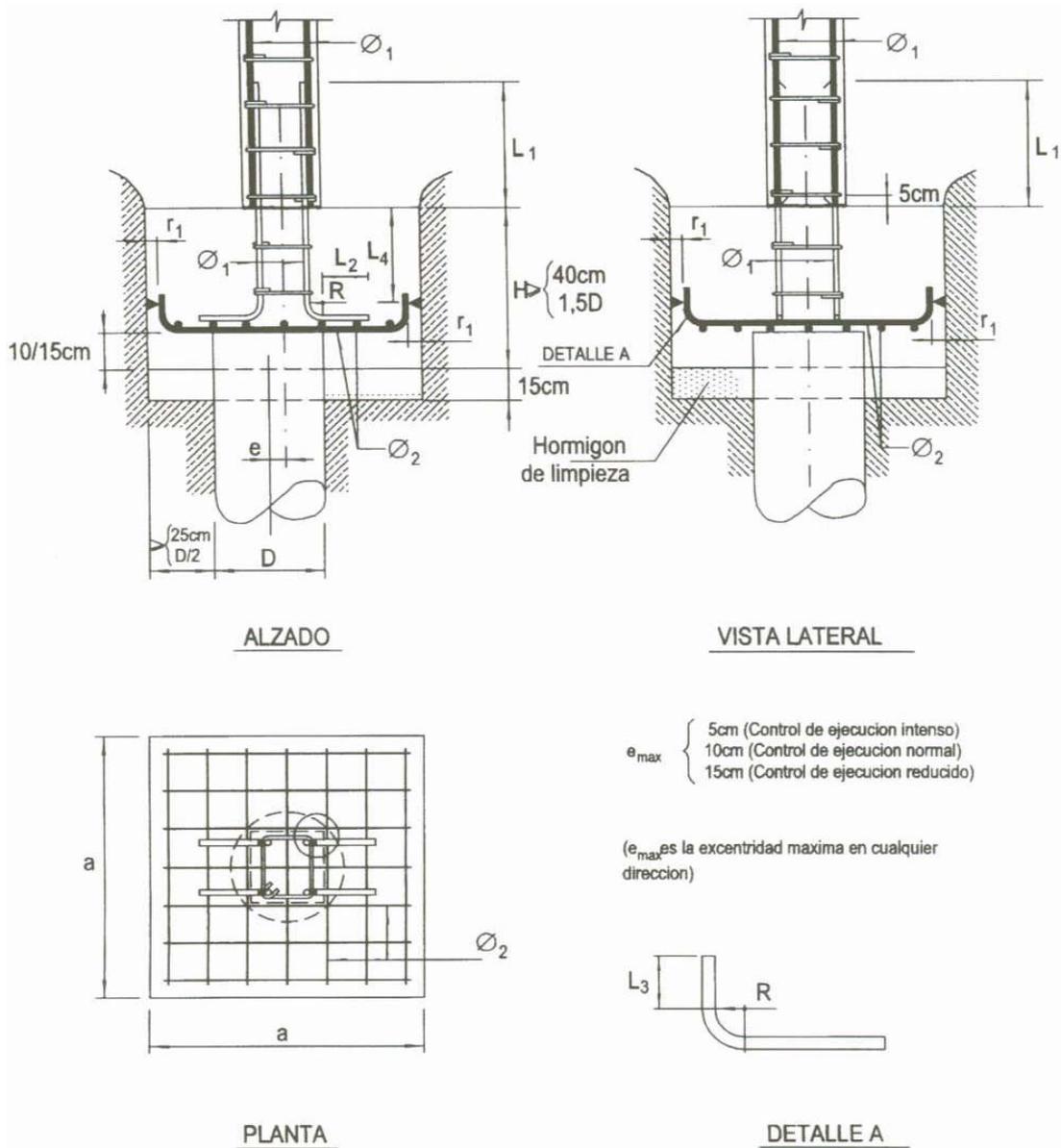


Notas:

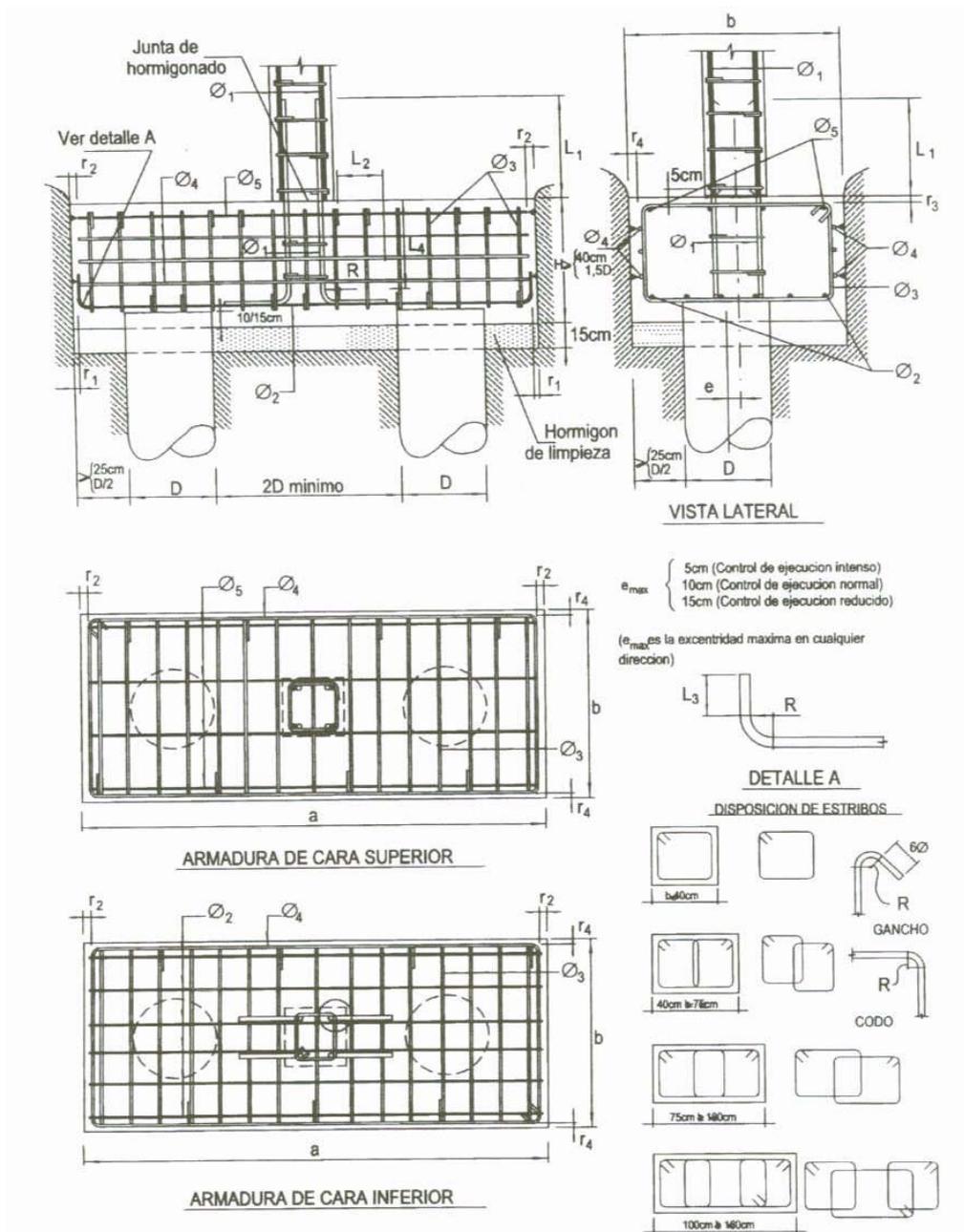
- Recubrimiento mínimo  $r_1=7$  cm.
- La armadura transversal debe ir atada o soldada en todos los cruces y debe sobresalir dos estribos o dos espirales.
- El número mínimo de barras longitudinales es seis.
- El diámetro de la armadura transversal debe ser mayor o igual de  $\frac{1}{4}$  de la longitudinal ( $\Phi_2 \geq \frac{1}{4}\Phi_1$ )
- La separación entre cercos o espirales  $\leq 15\Phi_1$

#### 8.5.2 DETALLE DE ENCEPADO DE UN SOLO PILOTE

- El encepado debe encofrarse siempre, no contra el terreno.
- La armadura principal del encepado  $\Phi_2$  debe apoyarse en la cabeza de los pilotes descabezados.
- El recubrimiento dependerá del ambiente, mínimo 5 cm.



### 8.5.3 DETALLE DE ENCEPADO DE DOS PILOTES



- Se debe disponer una armadura de lado a lado de la cara superior de capacidad mecánica superior a 1/10 de la inferior.
- Una armadura lateral con barras verticales en forma de estribos de las armaduras longitudinales inferior y superior que será como mínimo el 0.4% para B400S referida al área de hormigón perpendicular a su dirección.



