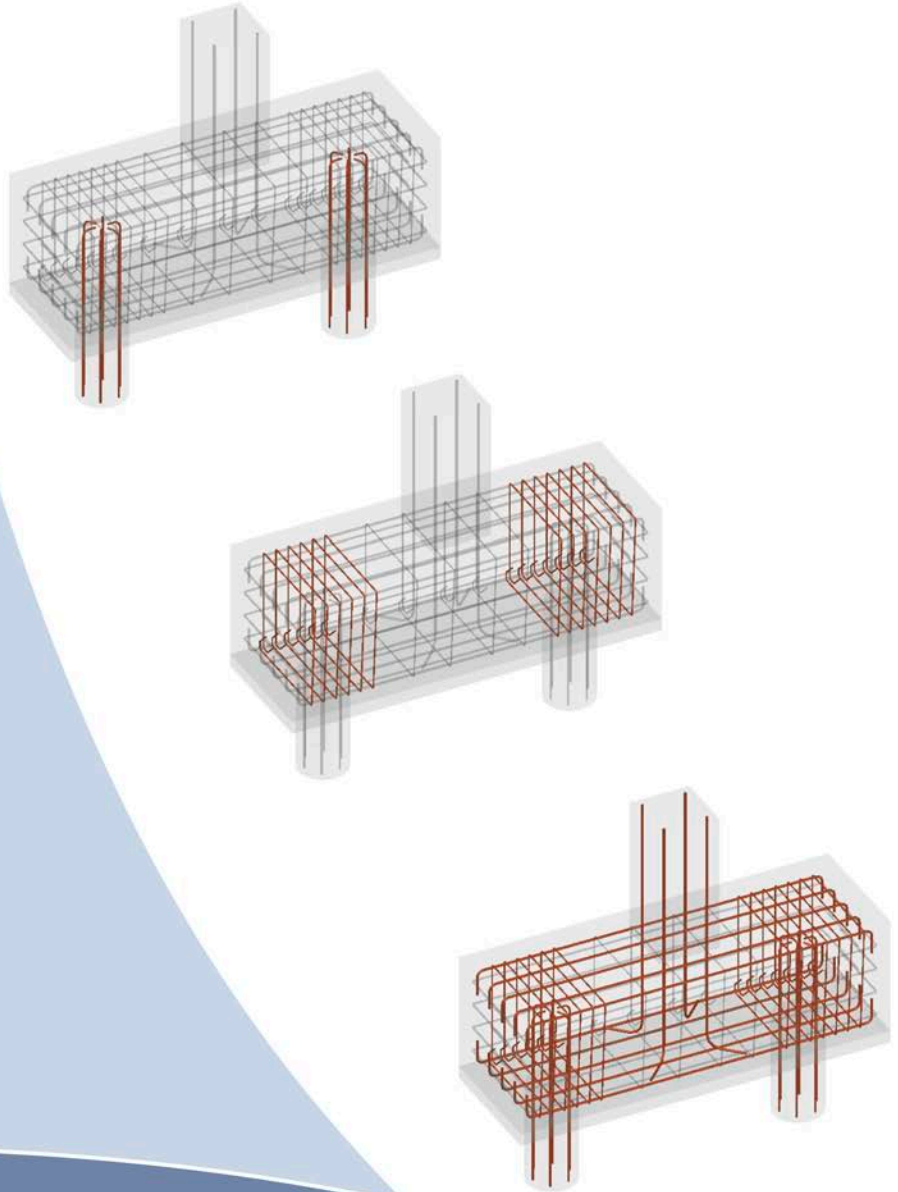


# Encepados de dos pilotes

## Cálculo por el método de bielas y tirantes

Sergio Alcantud Martí



Sergio Alcantud Martí

# **Encepados de dos pilotes**

## **Cálculo por el método de bielas y tirantes**

Colección *Académica*

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita:  
Alcantud Martí, Sergio. (2022). *Encepados de dos pilotes. Cálculo por el método de bielas y tirantes*. Valencia: edUPV

© Sergio Alcantud Martí

© 2022, edUPV

Venta: [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es) / Ref.: 0224\_05\_01\_01

ISBN: 978-84-9048-658-0

Impreso bajo demanda

edUPV se compromete con la ecoimpresión y utiliza papeles de proveedores que cumplen con los estándares de sostenibilidad medioambiental

Imprime: Byprint Percom, S. L.

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con los autores, puede enviar un correo a [edicion@editorial.upv.es](mailto:edicion@editorial.upv.es)

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo [edicion@editorial.upv.es](mailto:edicion@editorial.upv.es)

Impreso en España

A mi abuelo Román, que siempre está conmigo pero que echo tanto de menos.

A mis abuelos Arturo, Nieves y Juana, a los que admiro, disfruto y de los que aprendo cada día.

A mis padres, por el sacrificio, por sus valores y su apoyo incondicional.

A mi hermano, por caminar junto a mí enseñándome la complejidad de lo sencillo.

A mis 7 amigos, que si lo necesito serán la constante.

A ti, Tania, a la que puedo llamar mi suerte, por la cara que pusiste cuando te conté esta idea.

Y a lo que me enseñó a querer con pasión, lealtad y *manquepieda*.



# Índice

Introducción .....	1
Elección del modelo .....	7
Modelos .....	19
EHE 08 .....	19
Modelo 1 .....	21
Modelo 2 .....	24
Modelo 3 .....	27
Modelo 4 .....	32
Modelo 5 .....	34
Comprobación .....	37
Caso práctico .....	53
Herramienta de cálculo .....	149
Bibliografía .....	151



# Introducción

El proyecto estructural precisa de un análisis pormenorizado de cada uno de los elementos que conforman la estructura. El avance tecnológico ha permitido automatizar un alto porcentaje de los procesos de comprobación a través del empleo de software de cálculo que, basados generalmente en parámetros normativos, procesan para cada una de las situaciones de carga una larga lista de comprobaciones relacionadas con su resistencia y estabilidad.

Uno de estos elementos son los encepados, definidos por la norma como regiones D. Regiones donde no son aplicables las teorías de Navier-Bernouilli o Kirchoff, y cuyo análisis sólo se puede abordar a partir de los siguientes métodos:

- Análisis lineal mediante teoría de la elasticidad
- Método de las bielas y tirantes
- Análisis no lineal

Ninguno de estos métodos ha alcanzado un nivel de desarrollo en el cálculo de encepados de 2 pilotes que permita de manera automática obtener soluciones directas para todas las situaciones de carga. La norma EHE 08, derogada el 29 de septiembre de 2021, analizaba el caso de 2 pilotes a compresión, dejando sin definir un amplio abanico de situaciones que se producen cuando actúan flectores y axiles de tracción o compresión.

Por su parte, el nuevo Código estructural publicado en el BOE Real Decreto 490/2021, de 29 de junio, que deroga a:



## *Encepados de dos pilotes. Cálculo por el método de bielas y tirantes*

- Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), aprobada por el R.D. 1247/2008, de 18 de julio.
- Instrucción de Acero Estructural (EAE), aprobada por el R.D. 751/2011, de 27 de mayo.
- Disposiciones de igual o inferior rango que se opongan a lo establecido en el R.D.

En su Anejo 19, Reglas generales y reglas para la edificación, dedicado al proyecto de estructuras de hormigón, en el apartado 9.8.1 especifica que los encepados quedan fuera del ámbito de este código estructural. A pesar de ello, el nuevo Código estructural trata temas relacionados con el hormigón, las armaduras o el cálculo de bielas y tirantes que son considerados en los cálculos de esta publicación.

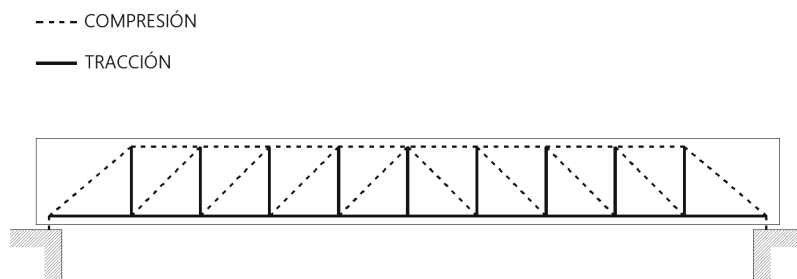
Por lo tanto, se toma la EHE 08 como la última referencia normativa que aborda, al menos de manera superficial, el cálculo de encepados.

Esta investigación surge de la problemática presentada en los pórticos de fachada de naves industriales, especialmente en aquellas de gran altura, donde el momento es mucho mayor en proporción que la carga vertical, o en aquellos pilares con cruces de San Andrés a tracción, donde además de momentos aparecen esfuerzos de tracción.

La bibliografía en estas situaciones es escasa, por lo que se pretende explicar cómo abordar este tipo de cálculos singulares, pero también definir y automatizar una serie de expresiones que permitan agilizar el cálculo independientemente de la casuística, encontrar un mecanismo resistente seguro mediante el sistema de bielas y tirantes y proponer una solución única y parametrizada para cualquier geometría y situación de carga.

## **Análisis por bielas y tirantes**

El método de bielas y tirantes surgió en 1899 producto de las comprobaciones de Ritter donde explicaba el comportamiento de las vigas a cortante. En él, defiende que el comportamiento de una viga es similar al de una celosía de cordones articulados, donde el superior trabaja a compresión, el inferior a tracción y entre ellos, hay otros verticales a tracción que representan el armado a cortante, acompañado de unas diagonales a compresión que transmiten el cortante hasta los apoyos.



*Figura 1. Celosía de Ritter*

La primera referencia del método en la normativa española se da en la instrucción de 1968, aplicándose en el análisis de cargas concentradas sobre macizos, vigas de gran canto y zapatas rígidas.

El método de bielas y tirantes empleado para el diseño de elementos de hormigón estructural se divide en dos fases. La primera es el diseño de una estructura resistente y la segunda su comprobación y dimensionado.

El método, no es capaz de dar una solución exacta del comportamiento real de la pieza, pero propone una solución de equilibrio suficientemente segura para esa geometría y ese estado de cargas.

Además, el método comprueba el Estado Límite Último (ELU) y asegura de manera indirecta el cumplimiento del Estado Límite de Fisuración mediante la limitación de la tensión de trabajo de la armadura en ELU a  $400 \text{ N/mm}^2$ .

El método se aplica en las conocidas como regiones D o regiones de discontinuidad, de las que se distinguen 3 tipos:

- Discontinuidad geométrica  
Se produce cuando aparece un cambio brusco en la geometría de la pieza, y es imposible aplicar una distribución de tensiones y deformaciones correcta a ambos lados de dicha discontinuidad. Ejemplos de esta discontinuidad son los cambios bruscos de sección o las esquinas de un pórtico.
- Discontinuidad mecánica  
Se produce cuando se aplica una carga concentrada que produce un flujo de tensiones que no responde a las hipótesis de Navier-Bernoulli, sino que genera otro tipo de tensiones y deformaciones diferentes.
- Discontinuidad generalizada  
Se produce cuando se dan de manera simultánea las dos discontinuidades anteriores. Ejemplos de esta discontinuidad son las vigas de gran canto o las

## Encepados de dos pilotes. Cálculo por el método de bielas y tirantes

cimentaciones rígidas. Los encepados de dos pilotes estarían encuadrados en este tipo de Región D.

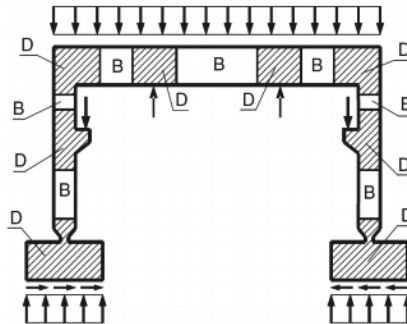


Figura 2. Regiones B y D

En el diseño se deben tener en cuenta unas reglas de aplicación:

- El modelo debe estar compuesto por barras articuladas entre sí que sean capaces de reproducir con tracciones y compresiones el comportamiento de la pieza.
- El modelo propuesto debe alcanzar el equilibrio de la manera más sencilla posible.
- Se limita la tensión del acero a  $400 \text{ N/mm}^2$
- Debemos evitar modelos donde los ángulos entre bielas y tirantes sean menores a  $30^\circ$ .

De lo ya comentado se deduce que no existe una solución única, pero se tiene la certeza de que, si se encuentra una solución, antes de romper pasará por ese estado de cargas propuesto.

Cuando se busca elegir el modelo de bielas y tirantes óptimo, y también cuando se trabaje con modelos no experimentados, se recomienda estudiar la distribución elástica de tensiones para ese caso analizando un modelo de elementos finitos, identificando las trayectorias de tensiones con un análisis elástico para evitar la plastificación de la armadura y la fisuración del hormigón.

De entre todos los mecanismos posibles, se busca aquel que menor energía de deformación gaste, es decir, el que menos tracciones necesite para su equilibrio, pues los tirantes son mucho más deformables que las bielas. (*Heinz Reineck, 2002*)

Una vez concretado el modelo, se comprueba que los armados propuestos soportan la tracción y disponen del suficiente espacio para anclarse; que el hormigón aguanta la compresión de las bielas y que los nudos son capaces de resolver los encuentros entre bielas y tirantes, condicionado por la geometría de los elementos que confluyen en él.

De todos modos, es bastante común por razones constructivas que la armadura no pueda disponerse en la dirección de los tirantes y habrá que colocar armadura para controlar la fisuración.

El método de las bielas y tirantes se basa en dos fundamentos básicos: Teorema del mínimo de plasticidad y el Principio de Saint-Venant.

#### *Teorema del mínimo de plasticidad*

Se enuncia que, para una carga cualquiera, la distribución de tensiones debe:

- No superar las tensiones de fluencia de los materiales
- Estar en equilibrio estático
- Satisfacer sus condiciones de contorno

Si estas condiciones se dan, la estructura resistirá sin alcanzar la rotura.

Lo más destacable del teorema, es que no se exige que esta estructura se corresponda con la distribución de tensiones real, basta con encontrar un modelo que cumpla estas condiciones para que la estructura resista sin colapsar.

#### *Principio de Saint-Venant*

Se enuncia que, estas regiones de discontinuidad, siguiendo las leyes de la elasticidad, son finitas y de dimensión reducida.

Por tanto, para una carga concentrada (o para una distribuida con la misma resultante) el resultado tensional será el mismo en cualquier sección de la pieza, generalmente la distancia entre puntos para que no se produzca interferencia de tensiones suele ser un canto.

La consecuencia de este principio es que se pueden obtener esfuerzos y dimensionar estructuras a través del principio de flexión, tratando únicamente los nudos o regiones de discontinuidad (*Juan Miquel Canet, 2012*).

## Objetivo

El libro centra su análisis en los encepados de 2 pilotes, los cuales actualmente presentan una formulación desarrollada para los casos de compresión pura.

Mediante el análisis de cada situación de carga, se pretende generar una formulación que dependa únicamente de la geometría y las cargas.

El libro trata 10 posibles modelos de bielas y tirantes que abarcan todas las posibilidades de carga que se pueden dar en estos tipos de encepados, estableciendo unos criterios de elección para cada uno de ellos y desarrollando modelos seguros a partir de variables geométricas.

## *Encepados de dos pilotes. Cálculo por el método de bielas y tirantes*

Se presentan paso a paso cada una de las operaciones llevadas a cabo en el desarrollo de la formulación propuesta.

Además, se ha recogido todo el proceso en una hoja de cálculo que ha permitido automatizar el dimensionado y con la que podemos definir de manera directa el armado de los encepados de 2 pilotes sometidos a una serie de situaciones de carga mediante el correcto ajuste de su geometría.

## Conclusión

El método que se propone abarca toda la variedad de casos que se pueden dar en un encepado de dos pilotes, desde los casos únicamente comprimidos hasta los que trabajan a tracción pura, y toda la extensa casuística que encontramos entre estos dos extremos.

Resulta imprescindible entender el proceso para no delegar el control de la estructura en una herramienta de cálculo. A partir de aquí, el objetivo es facilitar el proceso obteniendo el armado indicado en cada caso de una manera directa, automatizada y que se adapta a los criterios normativos vigentes.

Por ello, resulta de gran utilidad recoger toda esta formulación en un documento automatizado que sea capaz de realizar el proceso completo de análisis, detección del caso, resolución del modelo y armado del encepado a partir de la introducción de las variables de carga y geometría.

Mediante scanner QR, se puede acceder a un archivo de cálculo en el que podemos testear lo redactado en este libro.

El proceso deberá ser adaptado, comprobado y validado en cada caso por un técnico competente. Se exime al autor de toda responsabilidad.

# Elección del modelo

El método se basa en la correcta identificación de las acciones ( $F_A$  y  $F_B$ ) y las reacciones ( $R_A$  y  $R_B$ ), para determinar el modelo de análisis adecuado en base a la combinación entre estos 4 factores.

Se considera el siguiente criterio de signos positivos:

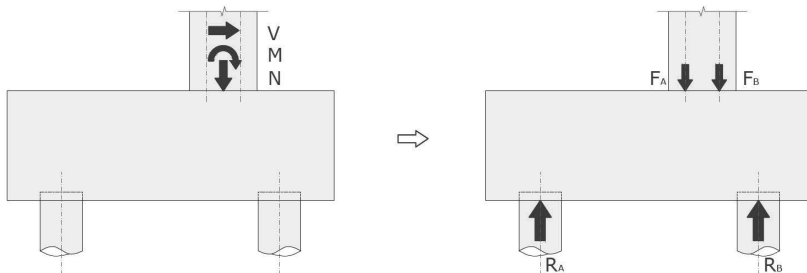


Figura 3. Criterio de signos positivos para acciones y reacciones

Tanto la formulación presentada como la herramienta de cálculo facilitada están diseñadas en base a este criterio de signos, por lo que los resultados introducidos o importados de cualquier software externo deberán ser adaptados.

## Definición de las fuerzas de entrada

Para cada encepado se tiene en consideración las reacciones del soporte al que da apoyo. En el inicio del cálculo, se debe determinar el plano del encepado, ya que sólo se da respuesta a los flectores y excentricidades que afectan al mismo, quedando excluidos el esfuerzo y la excentricidad del plano transversal, que deberán ser compensados mediante la incorporación de vigas centradoras.

En la base del pilar, por tanto, se tienen axiles, cortantes y momentos en el plano. Para poder descifrar qué modelo es el más adecuado, se deben transformar estos esfuerzos en fuerzas de tracción o compresión y definir su posición.

Un momento en la base del soporte es el equivalente a un par de fuerzas de tracción y compresión separadas una determinada distancia. La distancia entre las fuerzas de entrada, distancia X, varía en función de qué caso estemos analizando. Nos podemos encontrar con tres casos diferentes:

- Compresión / Compresión
- Tracción / Tracción
- Compresión / Tracción

Para determinar el signo de los esfuerzos de las barras, se hace un tanteo inicial a partir de los esfuerzos y un brazo de palanca entre ambas fuerzas estimado de 0,8 veces el ancho del pilar:

$$F_A = \frac{N}{2} - \frac{M}{(0.8 \cdot \text{Ancho pilar})}$$

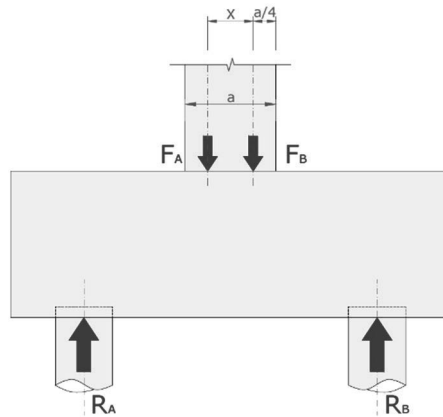
$$F_B = \frac{N}{2} + \frac{M}{(0.8 \cdot \text{Ancho pilar})}$$

Una vez determinado el signo, se puede definir la distancia entre las fuerzas de entrada.

### Compresión – Compresión

Cuando las dos fuerzas obtenidas en el tanteo son de compresión, siguiendo lo recomendado por EHE 08, la resultante de cada una de las compresiones se encuentra a  $\frac{1}{4}$  del ancho del borde del soporte, por tanto, la distancia entre ellas será de  $\frac{1}{2}$  del ancho del pilar:

$$X = \frac{a}{2}$$



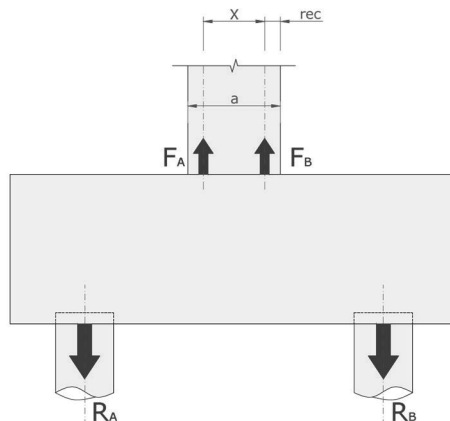
*Figura 4. Distancia entre dos fuerzas de entrada en compresión*

### Tracción - Tracción

En el caso opuesto, donde las dos armaduras están traccionadas, la distancia entre ellas será la real, es decir, la distancia entre los ejes de las armaduras, el ancho del pilar menos dos veces el recubrimiento mecánico.

Este caso es en el que más distancia hay entre las fuerzas de entrada al encepado, lo que produce un efecto favorable en el armado de este, debido a que para un momento constante si la distancia aumenta la magnitud del par de fuerzas se reduce.

$$X = a - (2 \cdot \text{rec})$$



*Figura 5. Distancia entre dos fuerzas de entrada de tracción*



## Compresión - Tracción

Por último, cuando se tenga una armadura en tracción y otra en compresión, la posición de las fuerzas se debería determinar para cada combinación, en función de la posición de la fibra neutra, obtenida de la relación entre N y M.

Con la intención de agilizar el proceso, se considera razonable establecer una distancia entre fuerzas del 80% del canto útil de la sección. Para su ubicación, se coloca la fuerza de tracción en la posición real de la armadura traccionada y desde ella ubicamos la fuerza de compresión a una distancia de  $0.8 \cdot d$ , coincidiendo con la posición aproximada del centro del bloque comprimido.

$$X = 0.8 \cdot d$$

$$d = a - rec$$

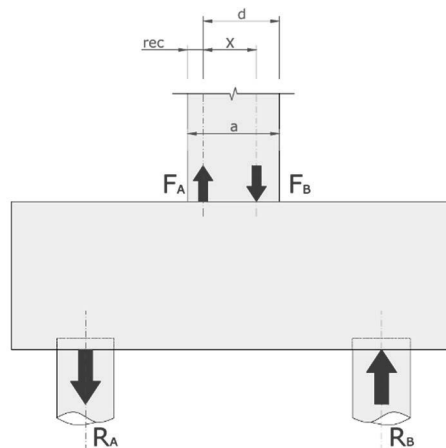


Figura 6. Distancia entre dos fuerzas de entrada de tracción y compresión

Para este supuesto, se diferencia la distancia al eje del pilar de las fuerzas de tracción y de compresión, ya que esto condicionará el cálculo al modificar la distancia entre estos puntos de entrada y la posición fija de los pilotes.

Por ello la distancia entre las armaduras y el eje quedan definidas:

$$X_T = \left(\frac{a}{2}\right) - rec$$

$$X_C = 0.8 d - X_T$$

**Para seguir leyendo, inicie el  
proceso de compra, click aquí**