

Pilotes asimétricos para contención de tierras

Non symmetrical piers for Retaining walls

Enrique Hernández Montes. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
 Catedrático de Universidad. ETSI Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada. emontes@ugr.es
Luisa María Gil Martín. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
 Profesora Titular de Universidad. ETSI Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada. marsobrin@prointec.es
Mark A. Aschheim. Dr. Ingeniero Civil
 Full Professor. Universidad de Santa Clara, California. EEUU. masschheim@scu.edu

Resumen: El diseño en rotura de secciones de hormigón está resuelto desde los años 50. Los autores de esta publicación han realizado avances teóricos en el cálculo de diseño en rotura de secciones rectangulares. Estos avances, aunque de interés académico, no habían resultado útiles desde el punto de vista práctico. No obstante la aplicación de estos procedimientos a secciones circulares en las que la envolvente de momentos flectores no es simétrica -como es el caso de muros de contención de tierra- permite un ahorro de más del 50% en la armadura del pilote tradicional. El interés de este nuevo tipo de pilote frente al pilote tradicional es enorme tanto económicamente, por el ahorro de acero que supone, como desde el punto de vista medioambiental, por la reducción en emisiones de CO2 asociadas a la fabricación de acero. Además, se ha comprobado que este tipo de pilotes facilita considerablemente el proceso de construcción.

Palabras Clave: Pilotes; Hormigón armado; Dimensionamiento de rotura

Abstract: The ultimate strength design of reinforced concrete members under flexure and axial loads is well known, with solutions dating back to the 1950s. Engineers have little motivation to change solution approaches in the absence of a clear benefit, particularly given that current solution approaches are well-known and not controversial. Recently, a different solution approach has been presented that allows for optimal distributions of reinforcement, using new tools such as Reinforcement Sizing Diagrams and Optimal Domains. Realistic applications of this approach to rectangular sections are limited and thus the approach has been mainly of academic or theoretical interest. Application to circular sections is presented in this paper, and is useful for the commonly encountered situation of retaining walls supported by circular cross section piers. Using the approach presented herein, longitudinal reinforcement can be reduced in more than 50% compared with traditional designs, allowing significant financial savings while also reducing the greenhouse gas emissions associated with the reinforcement material, its fabrication, and placement in reinforced concrete construction.

Keywords: Piles; Reinforced concrete; Strength design

1. Introducción

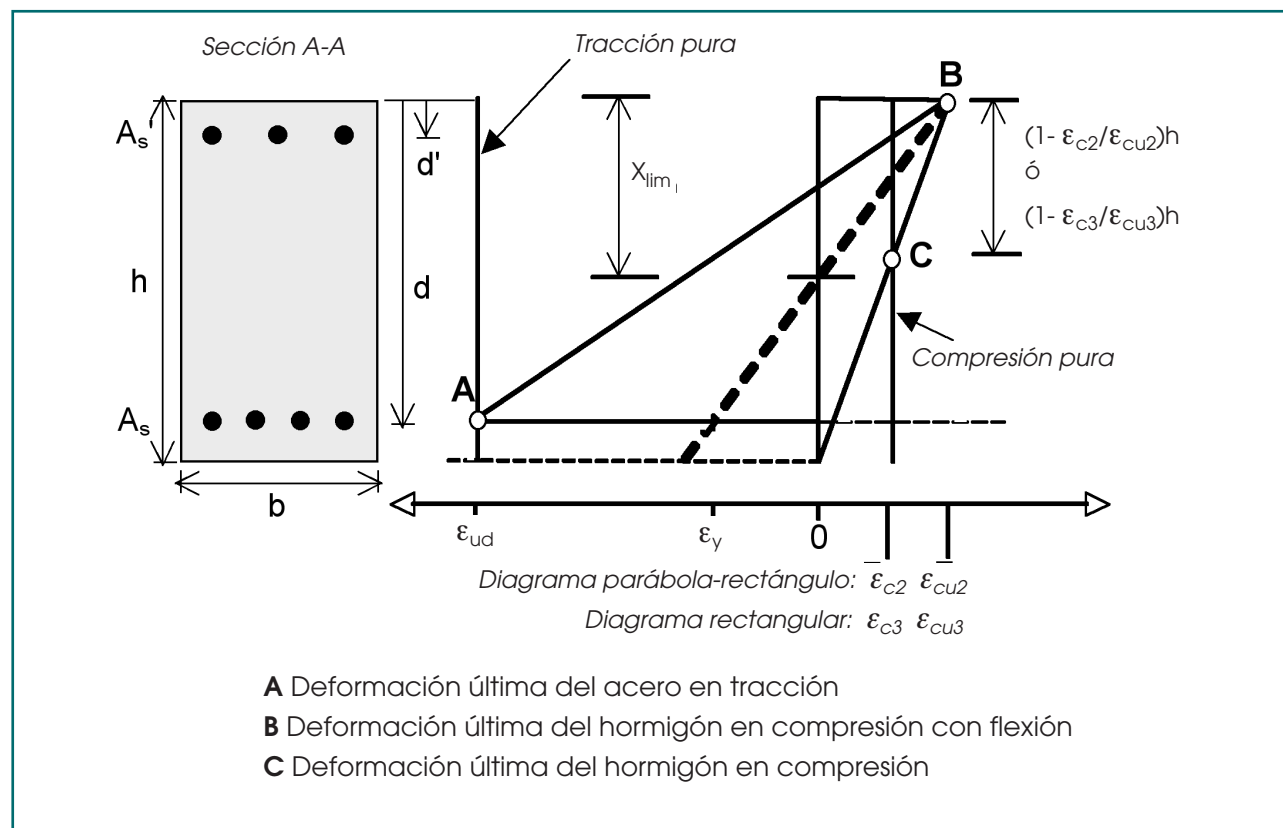
Generalmente el armado de pilotes se ha realizado disponiendo la armadura longitudinal en el perímetro de la sección transversal. Las barras, todas del mismo diámetro, se colocan a una separación constante. Este procedimiento de armado se puede mejorar cuando la envolvente de la ley de flectores a lo largo de la vida útil de la estructura no es simétrica, tal y como sucede en los pilotes de muros de contención de tierras. Se ha comprobado que para

pilotes de muros de contención de tierras la solución óptima consiste en disponer la armadura asimétricamente, lo que supone un significativo ahorro de armadura longitudinal además de facilitar el proceso constructivo. Estos nuevos pilotes se han ensayado in situ y se ha comprobado que son más fáciles de ejecutar que los pilotes armados tradicionalmente ya que además de ser más ligeros es menor el número de abrazaderas que se han de utilizar en el empalme de las barras, lo que incrementa el ritmo de ejecución de la obra.

Se admiten comentarios a este artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de junio de 2010.

Recibido: noviembre/2009. Aprobado: noviembre/2009

Fig. 1. Sección rectangular y dominios de rotura según el EC2.



2. Dimensionamiento a flexión en rotura

Cuando se dimensiona un elemento estructural de hormigón armado sometido a flexo-compresión, entre otros estados límite hay que comprobar que no se supera el estado límite último de rotura por tensiones normales (es decir, que no se alcanza un plano de deformación que produzca rotura⁽¹⁾). La rotura por flexión es, en muchos casos, el estado límite más condicionante, sobre todo porque sus coeficientes de seguridad son mucho mayores que los de los estados límite de servicio.

Para los estados de rotura se han desarrollado unos modelos para el hormigón y otros modelos para el acero. Generalmente se utiliza el diagrama rectangular para el hormigón y el diagrama bi-lineal sin endurecimiento para el acero.

A continuación se analizan por separado los procesos de dimensionamiento de secciones rectangulares y circulares con objeto de analizar sus diferencias.

(1) Los planos de rotura varían mucho dependiendo del tipo de norma, desde la simplicidad de la ACI-318 a lo intrincado de la EHE o del EC2.

2.1. Sección rectangular

Consideremos una sección transversal (Figura 1) solicitada por unos esfuerzos (M_d y N_d). Si se pretende dimensionar la armadura necesaria, o sea los valores de A_s y A'_s , se deberán de cumplir las ecuaciones de equilibrio (1). El número de ecuaciones es dos y el de incógnitas es tres (x , A_s y A'_s), donde x la profundidad de la fibra neutra y A_s y A'_s son las armaduras inferior y superior respectivamente (Figura 1).

$$\begin{aligned} N_d &= \int_{A_C} \sigma_c dA_c + \int_{A'_s} \sigma'_s dA'_s + \int_{A_s} \sigma_s dA_s \\ M_d &= \int_{A_C} \sigma_c y dA_c + \int_{A'_s} \sigma'_s y dA'_s + \int_{A_s} \sigma_s y dA_s \end{aligned} \quad (1)$$

En las ecuaciones (1), σ_c es la tensión en el hormigón (o concreto) σ'_s y σ_s son las tensiones en el acero superior e inferior respectivamente, y es el brazo del área considerada respecto del punto donde se ha referenciado el par (M_d , N_d) y A_C es el área de hormigón. Las ecuaciones (1) son muy generales y para el caso particular de una sección rectangular se simplifican considerablemente tal y como se puede ver en

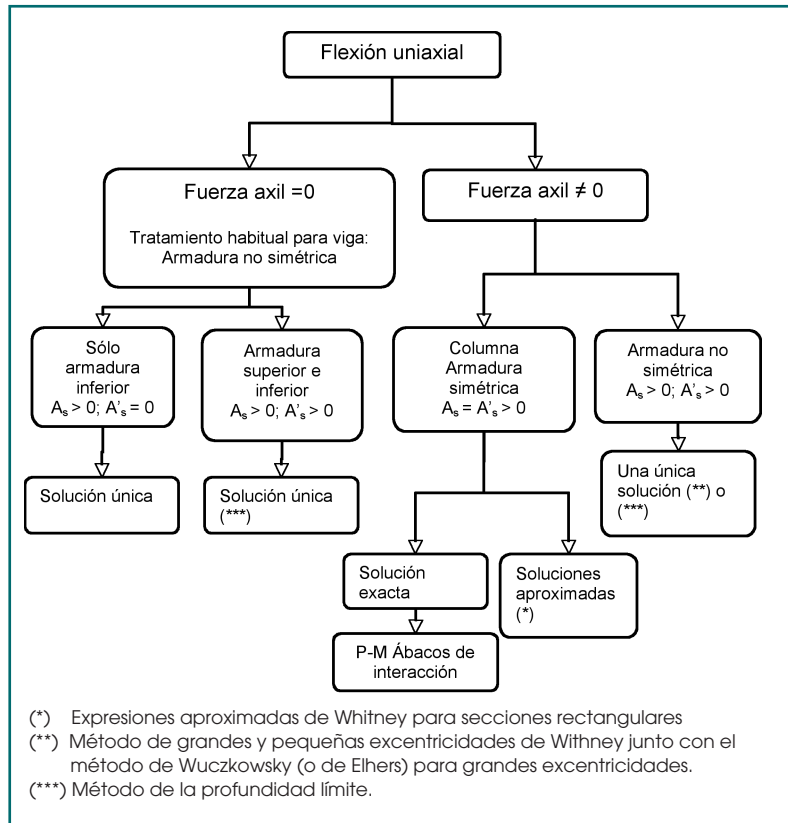
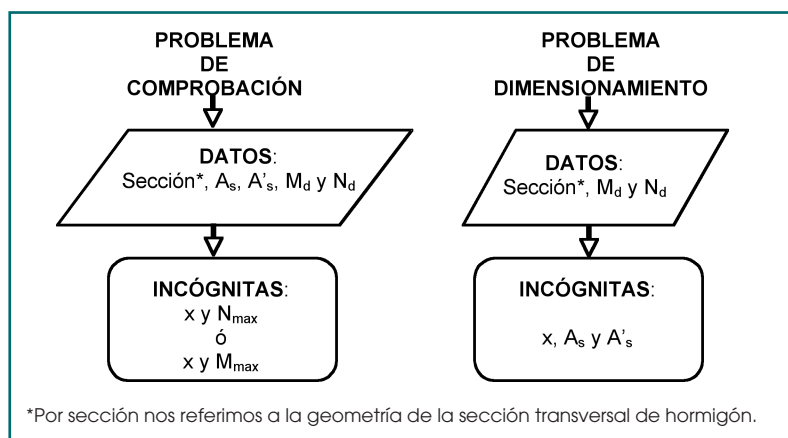


Fig. 2. Procedimiento habitual en el dimensionamiento a rotura de secciones rectangulares sometidas a flexo-compresión uniaxial.

distintos manuales de hormigón armado: Jiménez-Me-seger-Morán (2005), Hernández-Gil (2007), ...

Así pues, el sistema (1) es indeterminado, o sea, tiene infinitas soluciones: tres incógnitas y dos ecuaciones. Si recurrimos a la práctica técnica, explicada en los libros de texto, para armar una sección rectangular se suele seguir el procedimiento que se indica en la Figura 2. El procedimiento esquematizado en la Figura 2 lleva implícito un **procedimiento de optimización** sancionado por la práctica, en el cual el parámetro

Fig. 3. Los problemas de dimensionamiento y comprobación en secciones de hormigón.



profundidad límite (x_{lim}) es crucial -balance point (x_c) en literatura anglosajona-, ver Figura 1.

Así pues, dimensionar una sección rectangular a flexo-compresión uniaxial -con dos niveles de armadura, A_s y A'_s - para que resista una sollicitación dada (M_d y N_d) es un problema de infinitas soluciones, ver Figura 3. Por el contrario comprobar que la sección -ya dimensionada- resiste un determinado par de esfuerzos (M_d y N_d) sí es un problema determinado, ver Figura 3. En ambos problemas las únicas ecuaciones son las de equilibrio.

Tal y como se indica en el esquema de la Figura 2, para el dimensionamiento en rotura de secciones de hormigón armado sometidas a flexo-compresión uniaxial ha venido siendo tradicional apoyarse en el método de grandes o pequeñas excentricidades de Whitney (1956) o en el método de Wuczkowsky (2). Sin embargo, Alfredo Páez (1986) nos previene del uso de este último método y de la problemática de generalizarlo puesto que la armadura podría entrar en la zona plástica o salir de ella durante su aplicación, haciendo inviable su empleo.

Los autores de este artículo hemos sistematizado el procedimiento de dimensionamiento de secciones rectangulares de hormigón armado solicitadas a flexo-compresión uniaxial y hemos logrado demostrar el Teorema de Armado a Flexión (Hernández-Montes et al 2008) -en adelante TAF-. El TAF fundamenta el procedimiento tradicional a partir de una demostración sólida y compacta.

El TAF establece que:

En el caso de secciones transversales rectangulares con dos niveles de armadura se verifica que, de entre las infinitas posibilidades de armar la sección de hormigón en rotura, el mínimo de armadura ($A_s + A'_s$) es una de las siguientes soluciones:

- $A_s=0$ y/o $A'_s=0$
- x igual o ligeramente superior a x_{lim}
- deformación constante en toda la sección transversal igual a ϵ_{ud} (ver Figura 1)
- deformación constante en toda la sección transversal igual a ϵ_{c2} -ó ϵ_{c3} - (ver Figura 1).

(2) Montoya (2004) lo denomina teorema de Elhers mientras que Walther y Miehlabradt (1990) lo denominan método de Wuczkowsky-

Enrique Hernández Montes, Luisa María Gil Martín, Mark A. Aschheim

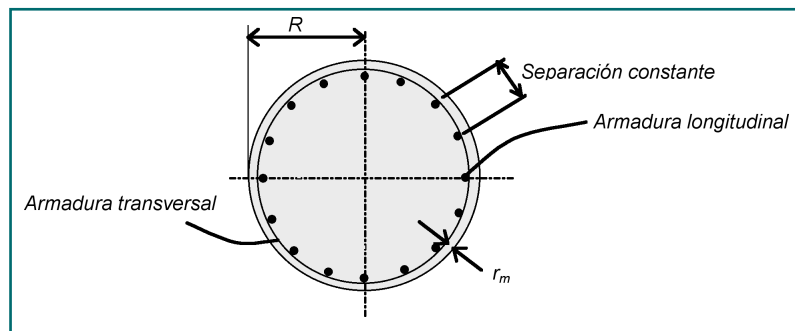


Fig. 4. Sección circular con armado tradicional.

Como corolario de este teorema se deduce el sistema tradicional de dimensionamiento a rotura de secciones rectangulares de hormigón armado sometidas a flexo-compresión uniaxial que se esquematiza en la Figura 2.

2.2. Sección circular

En el caso de secciones rectangulares, el concepto de x_{lim} va asociado a la existencia de armadura principal de flexión, A_s , en una posición fija d (canto útil). Tal y como establece el enunciado del TAF, el que A_s esté en fase elástica o plástica es determinante en el dimensionamiento de la sección.

El hecho de que la armadura de una sección circular se sitúe en un anillo de radio $R-r_m$ – ver Figura 4–, hace que el concepto de x_{lim} no tenga una aplicación tan inmediata como sucedía en las secciones rectangulares. En este caso el esquema de la Figura 2 ya no es aplicable y, por tanto, desde el punto de vista de diseño la sección circular y la rectangular son bastante diferentes.

Tradicionalmente la sección circular se ha armado mediante barras de diámetro único a separación constante (ver Figura 4). El problema así planteado tiene una solución única dado que basta con aumentar el diámetro de las barras o reducir la separación de las mismas hasta alcanzar el momento flector (o el par axil-flector) que solicita a la sección.

3. Sección circular asimétrica en contención de tierras

Aumentar el número de variables en un procedimiento de diseño implica aumentar el número de soluciones. Una manera de obtener una única solución es mediante el planteamiento de un problema

de optimización, que generalmente consistirá en la minimización de una función objeto. En el dimensionamiento de secciones de hormigón armado o pretensado la función objeto suele ser el área de acero.

Consideremos el sistema de contención de tierras de la Figura 5. Los muros de contención de tierras compuestos por pilotes pueden tener distintas configuraciones: trabajando en voladizo, con losa superior o con anclajes a distinto nivel, entre otros. Estos muros tienen la particularidad de que la envolvente de la ley de flectores a lo largo de su vida no es simétrica (al contrario que en los pilares de edificación), siendo posible plantear el uso de pilotes

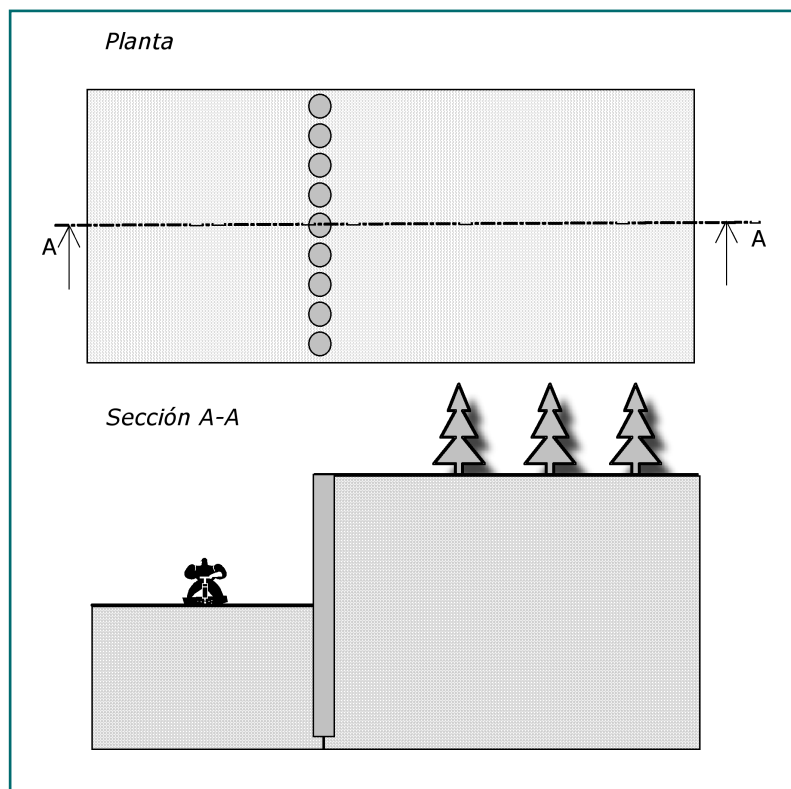


Fig. 5. Muro de contención de tierras.

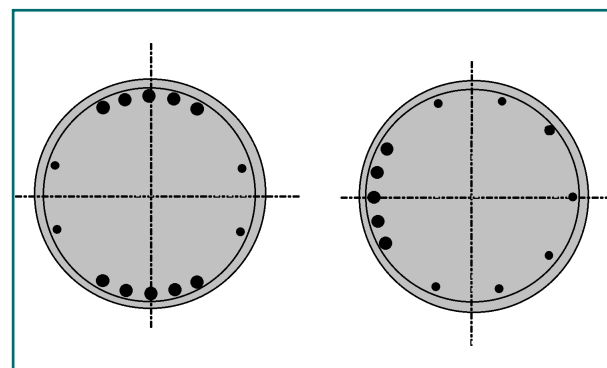


Fig. 6. Varias configuraciones de pilotes asimétricos.

asimétricos. Llamamos pilotes asimétricos a configuraciones en las que el diámetro de las barras longitudinales no es único y/o en las que la separación entre barras no es constante. En la Figura 6 se representan varias configuraciones de pilotes asimétricos. Además, existe la posibilidad de variar el tipo de la sección transversal -asimétrica- a lo largo del pilote.

3.1 Proceso de optimización

Bajo ciertas hipótesis iniciales tales como diámetros de las barras a emplear, normativa usada y diámetro del pilote la solución al proceso de minimización de armadura es único. La idea fundamental es muy simple: se pretende obtener el máximo brazo con el mayor diámetro de barra posible.

En la Figura 7 se presenta el diagrama de flujo para el dimensionamiento de los pilotes asimétricos, que consta de los siguientes pasos:

1. Datos de partida:
 - I. El diámetro del pilote: D
 - II. La calidad del hormigón: f_{ck}
 - III. La calidad del acero: f_{yk}
 - IV. El diámetro mínimo de barra: $\varnothing_1$
 - V. El diámetro máximo de barra: $\varnothing_2$
 - VI. Las acciones exteriores de diseño: M_d , N_d
2. Cálculo de acuerdo a normativa de las distancias máximas y mínimas entre barras s_1 y s_2 (respectivamente).
3. Disposición del mínimo número de barras $\varnothing_1$ (n_1) que respete la distancia máxima s_1 .
4. Comprobación de que estas barras resisten el par $N_d M_d$ (sistema de ecuaciones (1)).
5. En el caso de que la sección no resista se añadirán barras $\varnothing_2$ a s_2 en la posición más favorable para resistir el momento.

3.2. Ejemplo 1

Consideremos un pilote de 1 m de diámetro, fabricado con hormigón HA-30 y acero B-500-S. Los esfuerzos axil y flector en la sección transversal del pilote son $N_d=0$ y $M_d=1500 \text{ kN}\cdot\text{m}$. La armadura longitudinal necesaria en el caso de optar por pilote simétrico es de 20 $\varnothing$ 25.

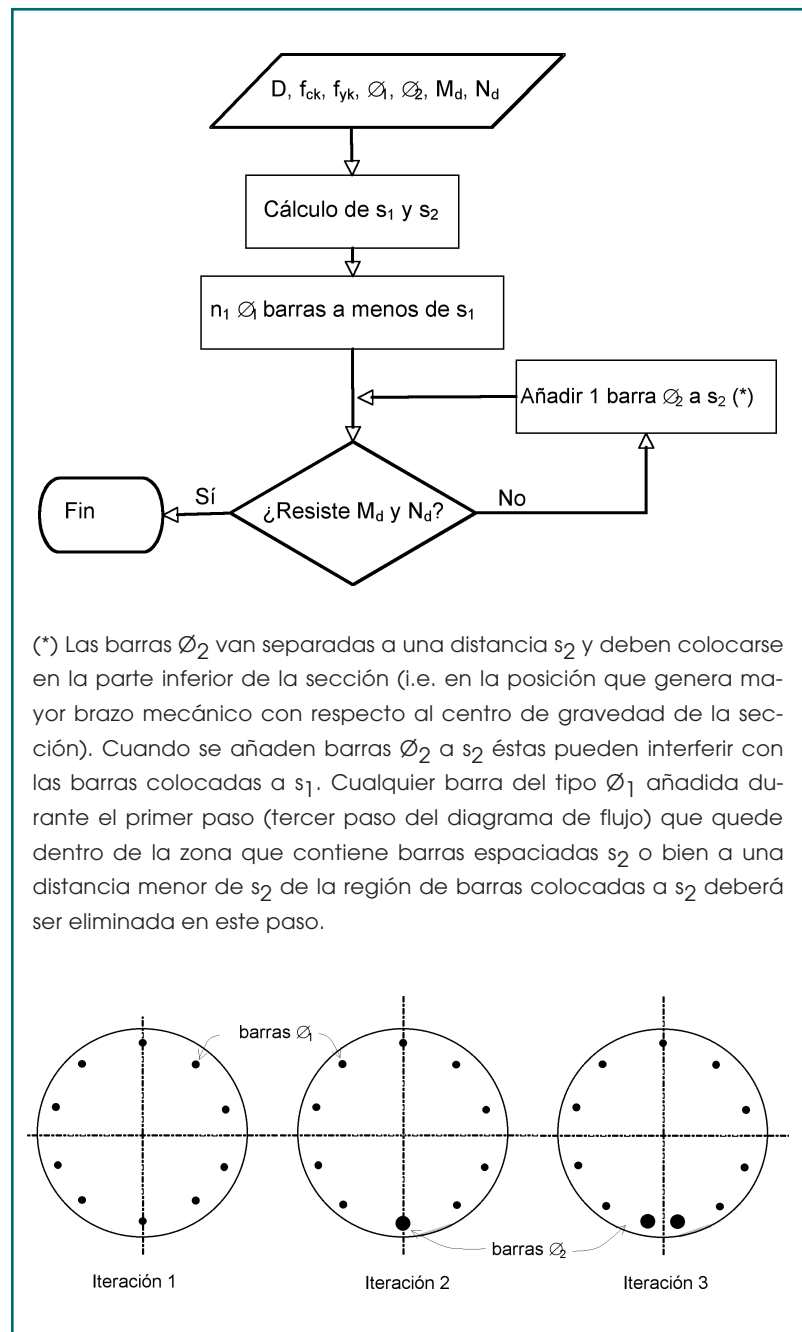


Fig. 7. Diagrama de flujo para el dimensionamiento de los pilotes asimétricos.

Si se decide escoger un armado asimétrico con un único diámetro de barra aparecen nuevas variables: $\varnothing$, d_1 , d_2 y ρ , descritas en la Figura 8. Si decidimos emplear barras de 20 mm de diámetro el nuevo armado estará compuesto por 10 $\varnothing$ 20 a 45 mm + 9 $\varnothing$ 20 a 270 mm, lo que supone un ahorro del 40% de armadura longitudinal. Los diagramas de interacción N-M correspondientes al proceso de diseño se pueden ver en la Figura 8.

Enrique Hernández Montes, Luisa María Gil Martín, Mark A. Aschheim

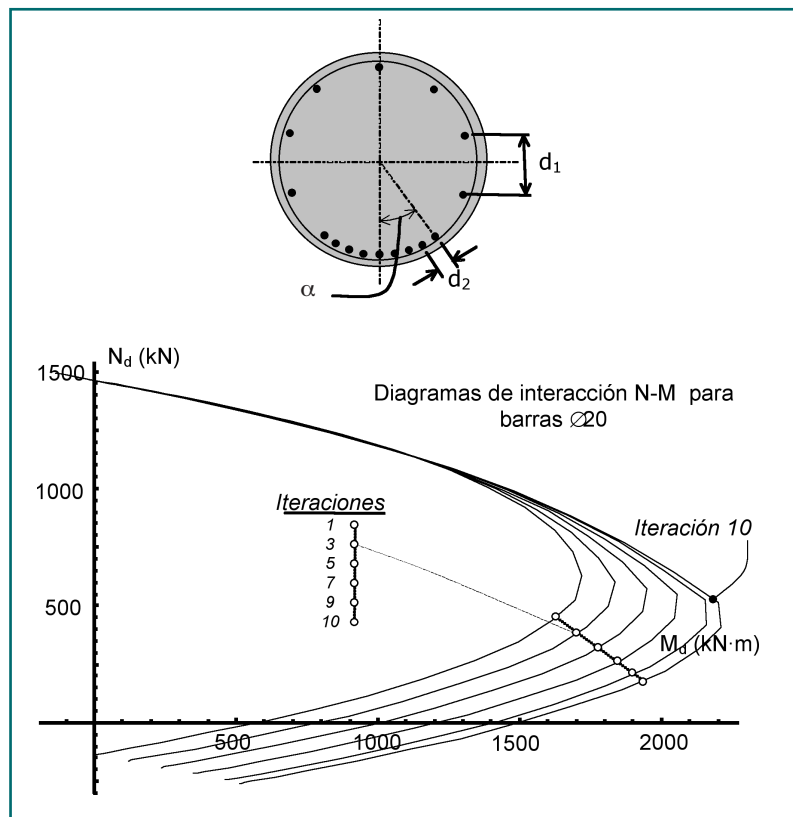


Fig. 8. Solución para armadura longitudinal de un solo diámetro.

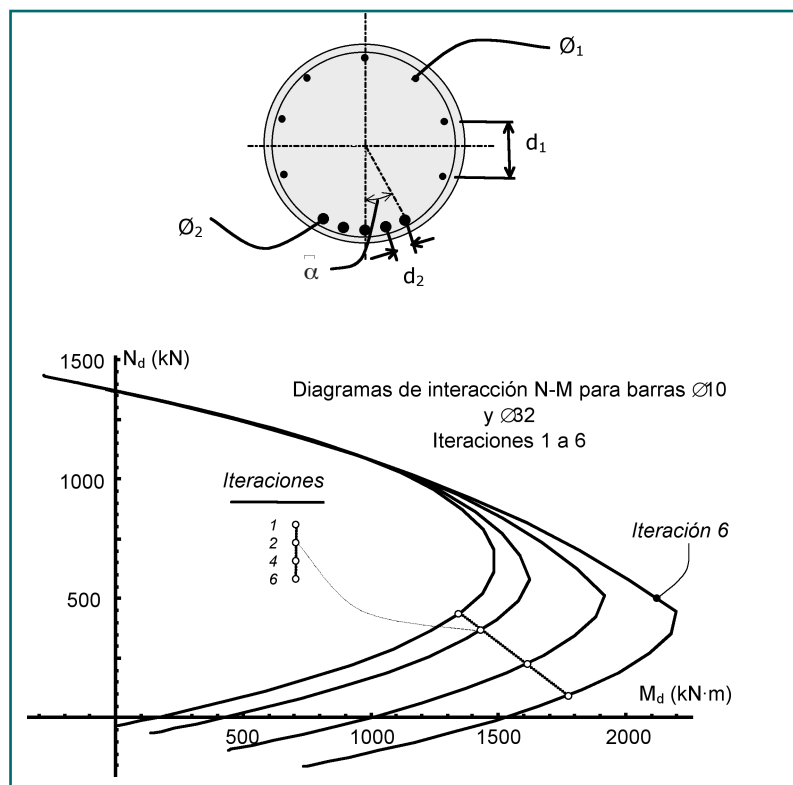


Fig. 9. Solución para armadura longitudinal empleando dos diámetros distintos.

En el caso de optar por distintos diámetros para las barras longitudinales, el número de variables (ϕ_1 , ϕ_2 , d_1 , d_2 y α) aumenta. En este caso se ha cambiado la configuración de 20Ø25 por 5Ø32 a 64 mm + 9Ø10 a 270 mm. El ahorro obtenido supone un 51% de la armadura longitudinal, mayor que en el caso de armar con sólo un diámetro. Los diagramas de interacción N-M correspondientes al proceso de diseño se pueden ver en la Figura 9.

4. Experimentación y puesta en obra

Este nuevo tipo de pilote, denominado pilote asimétrico, se ha ensayado en un tramo de la obra Sans-La Sagrera de SACYR. La Figura 10 muestra una sección transversal del tramo de ensayo así como la envolvente de flectores, cortantes y presiones durante la ejecución de la pantalla.

Se han instalado varios sistemas de auscultación que proporcionarán información sobre el comportamiento tanto de los pilotes simétricos como de los asimétricos durante la vida de los mismos. La puesta en obra de los pilotes asimétricos ha servido para responder a varias cuestiones relativas a la ejecución de los mismos que surgieron durante el proceso de diseño: ¿será posible colocar en obra la armadura en la posición adecuada o ésta girará durante la ejecución del pilote?, ¿cómo evitar o reducir el error humano en la fase de puesta en obra en relación a la disposición de la armadura?, ¿se podrá manejar bien el pilote?, ¿se inclinará éste?

Con objeto de anular el error humano, se creó un protocolo para la puesta en obra consistente en un sistema de pintado de las barras. Las barras centrales de mayor diámetro se pintaban en obra y se comprobará su posición antes de proceder al hormigonado del pilote, tal y como se aprecia en la Figura 11.

La velocidad de ejecución de los pilotes se vió considerablemente aumentada dado que el peso de la armadura se ha reducido casi a la mitad, siendo además menor el número de abrazaderas necesarias para realizar el empalme.

Se comprobó que los pilotes de 20 metros de longitud proyectados son lo suficientemente manejables como para centrarlos sin ninguna dificultad adicional, el error cometido a la hora de disponer la armadura del pilote era inapreciable a simple vista. No obstante, se ha medido el error medio en el giro y se ha cal-

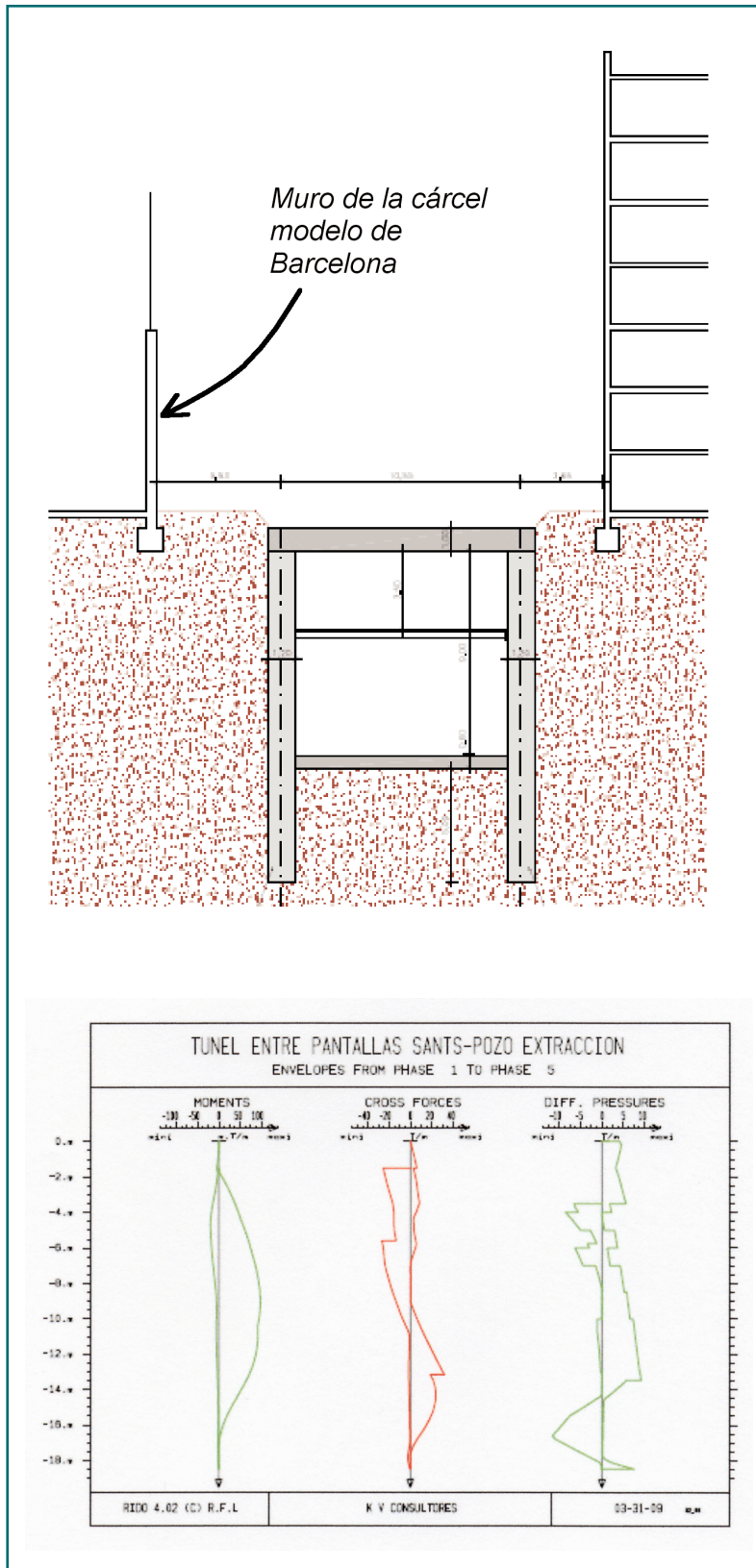
Pilotes asimétricos para contención de tierras

Fig. 10. Sección transversal de la zona de ensayo y envolvente de esfuerzos.



Fig. 11. Pintado de barras centrales.

culado la variación del momento último en función del error de giro, Figura 12. Para pequeños giros las barras extremas de mayor diámetro pierden brazo por un lado pero lo ganan por el otro, de tal forma que el momento flector apenas sufre descenso.

Basado en el error medio medido del giro de la armadura y en el descenso del momento flector asociado a este error de construcción para cada pilote, se ha deducido un coeficiente de seguridad adicional. Este coeficiente de seguridad se aplicará en el diseño de los futuros muros pantalla de pilotes asimétricos.

El error estimado en la obra de Sans-La Sagrera fue considerablemente mayor que el medido lo que supone un alto nivel de seguridad en la obra que sólo tiene sentido debido a que fue un tramo experimental.

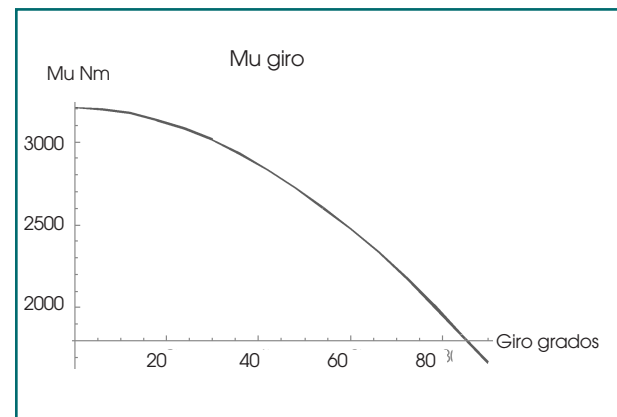


Fig. 12. Variación del momento último en función del error en el giro del pilote.

Enrique Hernández Montes, Luisa María Gil Martín, Mark A. Aschheim

5. Ahorro energético

El muro de pilotes presenta importantes ventajas en relación al muro pantalla: su ejecución es más rápida, dado que la sección circular es más estable que la zanja el problema de desprendimiento de tierras es menor, con frecuencia el muro pantalla necesita lodos bentoníticos ⁽³⁾ que, en muchos casos, si se cambia el sistema de muro pantalla por el de muro de pilotes no son necesarios. En relación a la maquinaria necesaria, la empleada para la construcción del muro de pilotes es más ligera que la empleada en un muro pantalla.

A todas las ventajas del muro de pilotes anteriormente comentadas, se le puede sumar un ahorro adicional en la cantidad de acero de armadura longitudinal y una simplificación en el sistema de montaje si el muro de pilotes tradicional se sustituye por uno construido con pilotes asimétricos.

Si se tiene en cuenta que el consumo anual medio de acero en España es de 20 millones de toneladas de los cuales se estima que 0.45 millones de toneladas se emplean en pilotes para contención de tierras, el ahorro anual obtenido si se disponen pilotes asimétricos podría ascender a 0.2 millones de toneladas de acero.

6. Patentes y propiedad intelectual

El pilote asimétrico para contención de tierras está actualmente bajo protección intelectual por la Universidad de Granada. Además hay abiertos diversos procesos de patentes tanto nacionales como internacionales. El diseño y sublicenciado de la construcción de los muros de contención mediante pilotes asimétricos se realizará a través de la empresa Prointec S.A.

(3) En la actualidad se están empleando polímeros en lugar de lodos bentoníticos.

7. Conclusiones

En este artículo se presenta una modalidad nueva de pilote, el pilote de armadura asimétrica. Este pilote se adapta a una ley de flectores asimétrica mejor que el pilote simétrico tradicional, consiguiendo un ahorro muy importante en la cantidad de acero.

Sin embargo, en obra civil, incluso aunque una alteración del proceso constructivo suponga un ahorro de material, si esta novedad dificulta la ejecución o puesta en obra no resulta interesante en la práctica. En este sentido, la ejecución de los pilotes asimétricos ha resultado ser más sencilla que la de los pilotes tradicionales ya que, al ser más ligeros, su manejo es más fácil y al ser menor el número de abrazaderas necesarias el ritmo de ejecución aumenta.

Dado que la armadura longitudinal se concentra en una zona, con objeto de eliminar errores humanos en el proceso de puesta en obra, es necesario establecer un protocolo de construcción para los pilares asimétricos.

Así pues, se puede concluir que el muro de pilotes asimétricos es un paso importante en el desarrollo de la construcción sostenible.

8. Agradecimientos

Los ensayos se han realizado con la financiación del proyecto de I+D+i liderado por SACYR S.A.U. y financiado parcialmente por el CDTI.

Agradecemos a Mar Sobrino Hernández, directora del departamento de Estructuras de Prointec, el entusiasmo que ha mostrado por este proyecto desde el primer día. A Antonio Ramírez, Jefe del Departamento de I+D de SACYR, por su eficacia dirigiendo proyectos de I+D, a Antonio Belmonte, Director Territorial del Grupo SyV de la Dirección Regional Sur, por su apoyo al proyecto y a Miguel Martín y al equipo de pie de obra de SACYR por su disponibilidad durante la ejecución de los primeros pilotes en la obra de Sans-La Sagrera. ♦

Referencias:

- Eurocode 2 (2002): Design of concrete structures- Part 1: General rules and rules for buildings prEN 1992-1-1 (July 2002).
- European Committee for Standardization. Brussels.
- Hernández Montes, E. y Gil Martín L.M. (2007). *Hormigón armado y pretensado, concreto reforzado y preesforzado*. Ed. Ingeniería e Infraestructuras.

- (descarga gratuita: <http://www.ugr.es/~emon-tes/prensa/HormigonEstructural.pdf>)
- Hernández-Montes E., Gil-Martín L.M., Pasadas M. y Aschheim M., (2008). "Theorem of Optimal reinforcement for reinforced concrete cross-sections". *Structural and Multidisciplinary Optimization*. V 36 pp 509-521.
- Jiménez Montoya P., García Meseguer A. y Morán Cabré F. (2004). *Hormigón Armado basado en la EHE*. Ed. Gustavo Gili.

- S.P.Timoshenko (1953). *History of Strength of Materials*. MacGraw-Hill.
- Walther, R. and Miehlbradt, M. (1990). *Dimensionnement des Structures en Béton*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Swiss.
- Whitney, C. S. and Cohen, E. (1956). *Guide for Ultimate Strength Design of Reinforced Concrete*. ACI Journal, v. 28, No. 5, Nov. (Proceedings V.53), pp. 445-490.