

Disponible en www.hormigonyacero.com
Hormigón y Acero, 2024
<https://doi.org/10.33586/hya.2024.3189>

ARTÍCULO EN AVANCE ON LINE

Sensibilidad de la longitud de anclaje al fallo por hendimiento en el nuevo Eurocódigo 2

Luisa María Gil-Martín, David García-Moro, & Enrique Hernández Montes

DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2024.3189>

Para ser publicado en: *Hormigón y Acero*

Por favor, el presente artículo debe ser citado así:

Gil-Martín, L.M., García-Moro, D., & Hernández-Montes, E. (2024) Sensibilidad de la longitud de anclaje al fallo por hendimiento en el nuevo Eurocódigo 2, *Hormigón y Acero*. <https://doi.org/10.33586/hya.2024.3189>

Este es un archivo PDF de un artículo que ha sido objeto de mejoras propuestas por dos revisores después de la aceptación, como la adición de esta página de portada y metadatos, y el formato para su legibilidad, pero todavía no es la versión definitiva del artículo. Esta versión será sometida a un trabajo editorial adicional, y una revisión más antes de ser publicado en su formato final, pero presentamos esta versión para adelantar su disponibilidad.

En el proceso editorial y de producción posterior pueden producirse pequeñas modificaciones en su contenido.

© 2024 Publicado por CINTER Divulgación Técnica para la Asociación Española de Ingeniería Estructural, ACHE

Sensibilidad de la longitud de anclaje al fallo por hendimiento en el nuevo Eurocódigo 2

Luisa María Gil-Martín¹, David García-Moro² y Enrique Hernández-Montes³

Resumen

En el nuevo Eurocódigo 2 [1], el cálculo de la longitud de anclaje se ha modificado notablemente con respecto a la versión anterior. La nueva formulación es significativamente más sensible al fallo por hendimiento del hormigón. En la versión anterior, la longitud de anclaje podía fluctuar hasta un máximo del 30% debido a los efectos de hendimiento, confinamiento de armadura y presión lateral. Sin embargo, en el nuevo Eurocódigo 2, debido al efecto de hendimiento del hormigón generado por la cercanía de las barras entre sí o a los bordes, la longitud de anclaje puede incrementarse hasta tres veces. Además, considerar el efecto del confinamiento de la armadura transversal puede llevar a reducciones considerables de esta longitud. Se presentan diversas representaciones gráficas y ejemplos para cuantificar la sensibilidad frente al hendimiento de la nueva formulación.

1. Introducción. Longitud de anclaje en los diagramas de capacidad

La longitud de anclaje, o de desarrollo, es un concepto fundamental en estructuras de hormigón, dado que la barra de refuerzo necesita la longitud de anclaje para poder desarrollar toda su capacidad, [2]. Además, el empalme por solape (o traslape) está basado en el mismo concepto, [3]. La Figura 1, adaptada de la Figura 12.1 de la Eurocódigo 2, muestra la fuerza axial de tracción máxima que pueden desarrollar las barras de refuerzo de una viga. En esta figura se observa como las barras no tienen ninguna capacidad en los extremos y como esta capacidad aumenta de forma lineal a lo largo de la longitud de anclaje. Más allá de la longitud de anclaje, la barra alcanza su máxima capacidad –que se mantiene constante-.

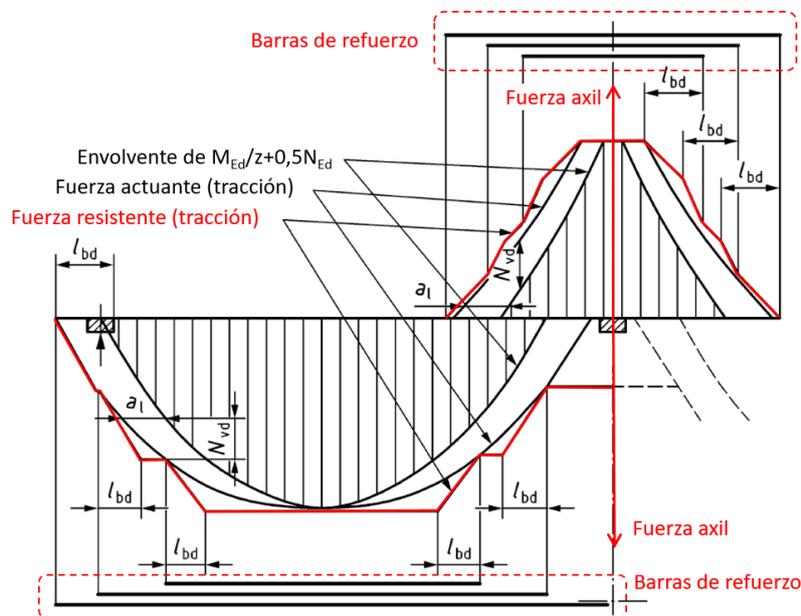


Figura 1. Capacidad a tracción de las barras de refuerzo de una viga. (Adaptado de la Figura 12.1 de la EN 1992-1-1)

¹ Dra ICCP, ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Granada

² ITOP, Director de Construcción. ERSI-Group

³ Dr ICCP, ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Granada

El diagrama de capacidad de momentos flectores se obtiene multiplicando la fuerza resistente de las barras por su brazo mecánico. La Figura 2 muestra una viga simplemente apoyada, con un refuerzo formado por cuatro barras, junto con su correspondiente diagrama de capacidad de momentos flectores. Cualquier envolvente de momentos flectores de diseño (decalados) que actúe sobre la viga, debe de quedar dentro del diagrama de capacidad, [4]. Como se puede apreciar, la variación de la longitud de anclaje influye directamente en el diagrama de capacidad de momentos flectores.

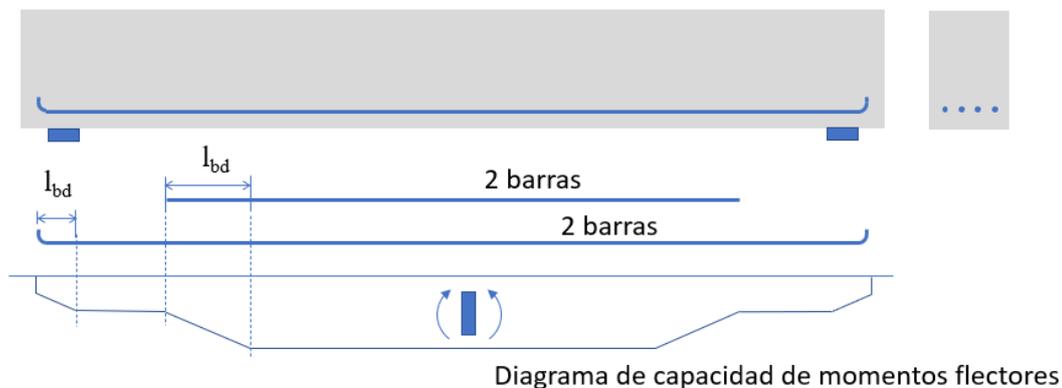


Figura 2. Diagrama de capacidad de momentos flectores y longitud de anclaje

2. Longitud de anclaje en el EN 1992-1-1/2023

La longitud de anclaje se diseña considerando tres tipos de fallo posibles, [5]: rotura de la barra, rotura por hendimiento del hormigón (o concreto) y deslizamiento. Figura 3.

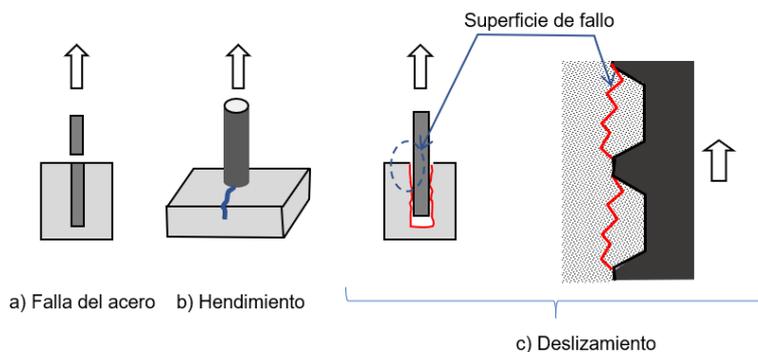


Figura 3. Tipos de fallo del anclaje de una barra

Basándose principalmente en el Boletín 72 de la FIB [6] (ver también [7]), el cálculo de la longitud de anclaje en la nueva versión del Eurocódigo 2 ha cambiado sustancialmente respecto a versiones anteriores. En el actual Eurocódigo 2, las contribuciones del recubrimiento, la armadura secundaria y la compresión transversal se han considerado con carácter de suma, a diferencia del formato multiplicativo que tenían en la versión anterior, [6] y [7]. Para el caso de anclaje por prolongación recta, la nueva formulación para obtener el valor de diseño de la longitud de anclaje es:

$$l_{bd} = k_{lb} k_{cp} \phi \left(\frac{\sigma_{sd}}{435} \right)^{1.5} \left(\frac{25}{f_{ck}} \right)^{1/2} \left(\frac{\phi}{20} \right)^{1/3} \left(\frac{1.5\phi}{c_d} \right)^{1/2} \geq 10\phi \quad (1)$$

El valor del coeficiente k_{lb} es 35 para situaciones accidentales y 50 para situaciones persistentes y transitorias. El coeficiente k_{cp} , que tiene en cuenta la influencia del hormigonado, vale 1.0 para

condiciones de buena adherencia, 1.2 para condiciones de pobre adherencia y 1.4 en el caso de que se usen lodos de bentonita (p.ej. en la construcción de muros pantalla). El valor de c_d depende del recubrimiento y de la separación entre las barras (ver Figura 4). Dado que el hendimiento puede producirse para valores pequeños de la separación entre barras, este coeficiente diferencia de manera indirecta el modo de fallo. Es decir, si $c_d=3.75\phi$, el fallo del anclaje será por deslizamiento, mientras que para valores inferiores de c_d el fallo será por hendimiento que, según la norma, se producirá para una separación entre barras menor de 7.5ϕ (téngase en cuenta que: $0.5c_s < 3.75\phi \rightarrow c_s < 7.5\phi$). Por tanto, la sensibilidad del valor de la longitud de anclaje con respecto a c_d (i.e. al fallo por hendimiento) se considera en el último término de la Ecuación 1: $(1.5\phi/c_d)^{0.5}$.

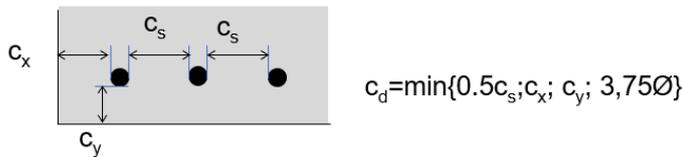


Figura 4. Definición de c_d

En la Figura 5 se representa, en línea continua, la variación del último término de la Ecuación 1 $(1.5\phi/c_d)^{0.5}$, con respecto a la separación libre entre las barras (c_s), medida en unidades de diámetro de la barra, en el rango susceptible de fallo por hendimiento (es decir, $c_s < 7.5\phi$). Para forzar a que el término más limitativo en el cálculo de c_d sea la separación entre barras (c_s), se ha supuesto que c_x y c_y son mayores que $0.5c_s$. Como se puede ver en la Figura 5, la longitud de anclaje para unas barras separadas 1.0ϕ es 3 veces mayor que si la separación entre barras fuera 7.5ϕ . En la figura se ha representado en línea negra discontinua el factor α_2 del Eurocódigo 2 del 2004 [8], que tiene en cuenta el recubrimiento y la separación entre barras, para el caso de anclaje en prolongación recta en tracción. El factor α_2 tiene un efecto favorecedor (no penalizador por fallo por hendimiento, como en la versión del Eurocódigo 2 del 2023 [1]), de tal forma que la longitud de anclaje se reduce de forma lineal para separaciones libres entre barras mayores de 2ϕ llegando a una reducción máxima cuando la separación libre es mayor o igual que 6ϕ (i.e. $\alpha_2=0.7$), ver línea negra discontinua en la Figura 5.

La formulación de la ACI 318-19 [5] (Ecuación 25.4.2.4a de [5]) penaliza por fallo por hendimiento para separaciones libres menores de 4ϕ . En la Figura 5 se ha representado en línea discontinua azul cómo es la función de penalización para separaciones libres entre barras menores que 7.5ϕ . En Figura 5 se ha considerado que la separación libre por encima de la cual no se produce fallo por hendidura para ninguna de las dos normativas, ni ACI-318-19 [5] ni EC2 [1], es 7.5ϕ .

La Figura 5 muestra que cuanto menor es la separación entre barras –y, por tanto, más probable el fallo por hendimiento–, mayor es la longitud de anclaje y que este efecto es muy significativo en la última versión del Eurocódigo 2 [1]. De hecho, como se aprecia en la Figura 5, el fallo por hendimiento en la nueva formulación de la longitud de anclaje conlleva un aumento de un 22% en la longitud de anclaje para separaciones entre barras de 2 veces el diámetro y de un 73% para separaciones de un diámetro de barra.

Es interesante señalar que aunque el EC2 permite separaciones mínimas de hasta un diámetro de la barra (otras normas, como la AASHTO LRFD Bridge Design [9], limitan esta separación a 1.5ϕ), los valores pequeños de separación de barras (1.0ϕ) están muy penalizados en términos de longitud de anclaje en la última versión del Eurocódigo 2.

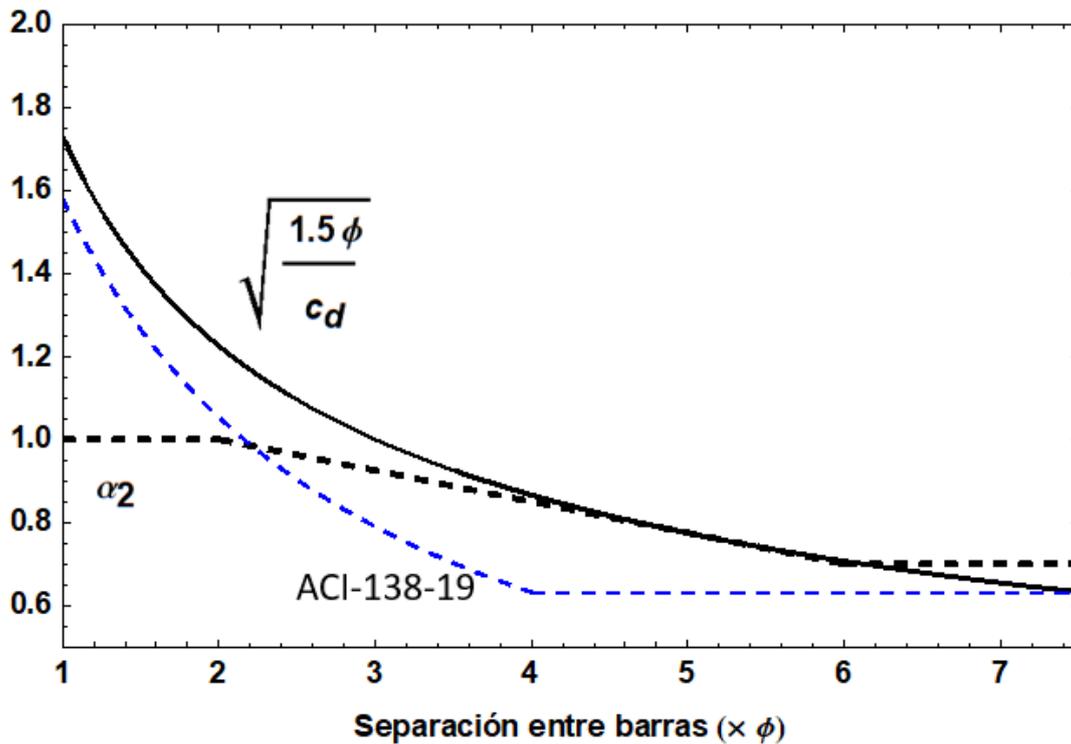


Figura 5. Influencia de la separación entre barras en las dos últimas versiones del Eurocódigo 2 y en la ACI-138-19.

En la Figura 6 se ha representado la longitud de anclaje de una barra $\text{Ø}25$ en función de la resistencia característica del hormigón para distintas separaciones libres entre barras (c_s), para la versión vigente del EC2 [8] (en líneas continuas azules y rojas) y para la última versión [1] (líneas discontinuas azules y rojas). Como antes, se ha supuesto que c_x y c_y son mayores que $0.5c_s$. Se consideran condiciones de buena adherencia, $k_{ib}=50$ y que la tensión de diseño de la barra es 435 MPa ($\sigma_{sd}=435$ MPa). En esta figura se puede ver cómo el efecto de la rotura por hendimiento, considerada a través de la separación entre las barras ($c_s < 7.5\text{Ø}$), en la longitud de anclaje es mucho más importante en la nueva versión del Eurocódigo 2 [1] que en la versión anterior. En línea negra se indican las longitudes de anclajes máximas y mínimas según la ACI-318-19. Las líneas rojas de la Figura 6 corresponden al caso de una separación libre entre barras de 3Ø , caso cuyos valores aparecen tabulados en el nuevo EC2 [1] (Tabla 11.1 de [1]).

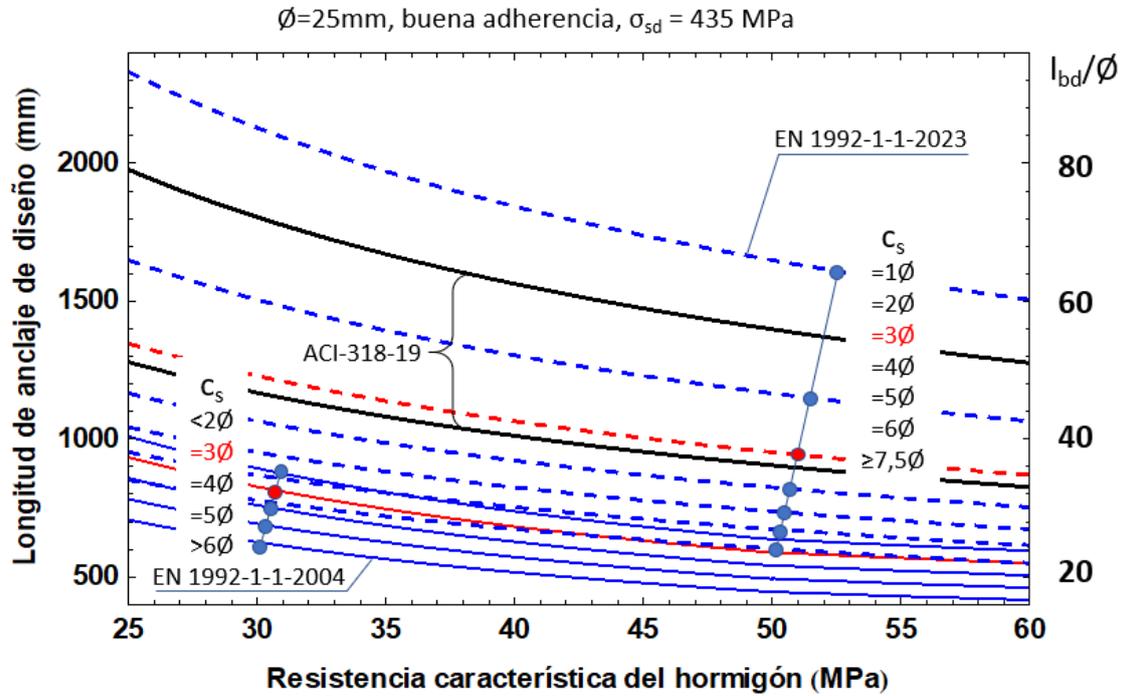
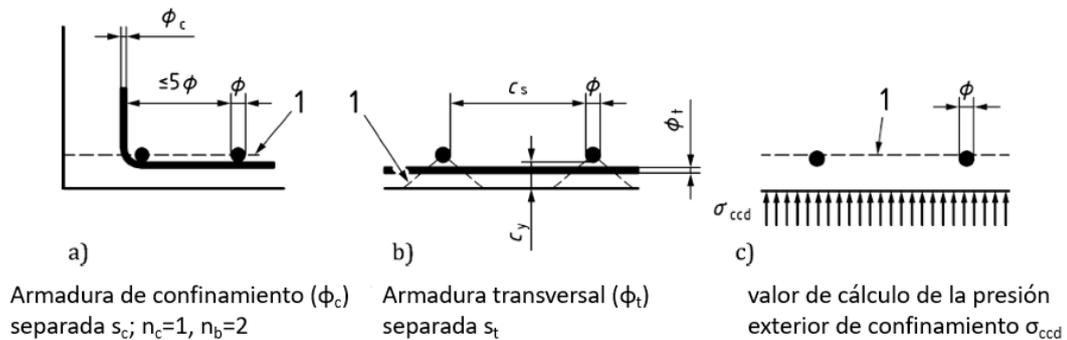


Figura 6. Longitudes de anclaje para una barra de 25 mm de diámetro tensada a 435 MPa

2.1. Armaduras de confinamiento y transversal

La longitud de anclaje puede reducirse, respecto al valor dado por la Ecuación 1, si se cuenta con la presencia de armadura de confinamiento, armadura transversal o presión exterior, tal y como se indica en la Figura 7. En estos casos, el valor de c_d en la Ecuación 1 se sustituye por un nuevo valor, $c_{d,conf}$, definido en la Ecuación 2 (§11.4.2 del EN-1992-1-1-23 [1]), donde n_c es el número de barras del refuerzo de confinamiento que cruzan la superficie de fallo por hendimiento, n_b es el número de barras ancladas o pares de barras traslapadas en la superficie potencial de fallo por hendimiento, s_c es la separación del refuerzo de confinamiento a lo largo de la barra a anclar y σ_{ccd} es el valor de diseño de la tensión de compresión media perpendicular al plano de fallo potencial por hendimiento.



Leyenda

1 Superficie potencial de hendimiento

Figura 7. Definición de casos en los que la longitud de anclaje de diseño puede verse reducida por confinamiento o armadura transversal, adaptada del nuevo Eurocódigo 2.

$$c_{d,conf} = \min \left\{ c_x; c_y + 25 \frac{\phi_t^2}{s_t}; 0.5 c_s; 3.75 \phi \right\} + \Delta c_d \leq 6 \phi \quad (2)$$

$$\Delta c_d = \left(70 \frac{n_c \pi \phi_c^2}{4 n_b \phi s_c} + 12 \frac{\sigma_{ccd}}{\sqrt{f_{ck}}} \right) \phi$$

La influencia de la armadura de confinamiento en la longitud de anclaje se muestra en la Figura 8 (ver caso a) de la Figura 7). En la Figura 8a se representa el último término de la Ecuación 1 en función de c_s y s_c para el caso particular de barras $\varnothing 25$ (separadas entre sí $c_s [\times \varnothing]$) y armadura de confinamiento $\varnothing_c = 12$ mm (separadas s_c [mm]).

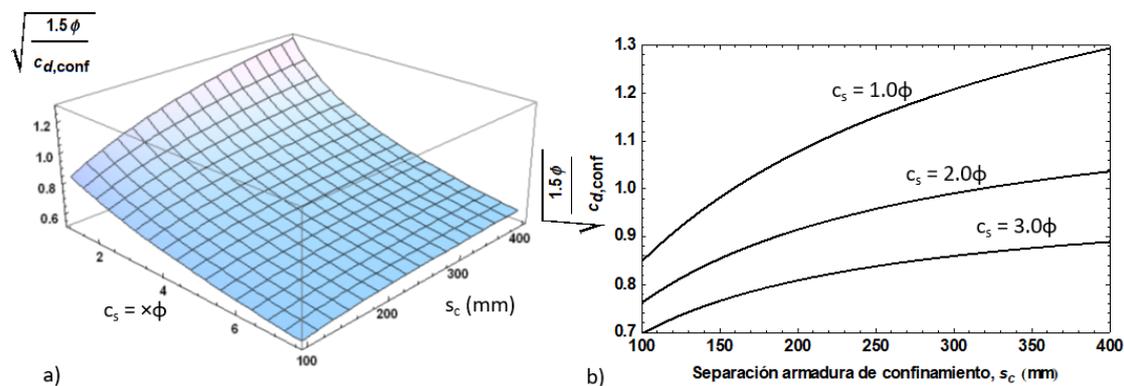


Figura 8. Ejemplo de la influencia del fallo por hendimiento para barras $\varnothing 25$ considerando armadura de confinamiento.

Como se aprecia en la Figura 8a, el efecto de la armadura de confinamiento, expresado en términos de separación entre barras de confinamiento (s_c), es tanto más significativo cuanto menor es la distancia libre entre las barras (c_s). La sensibilidad de la formulación de la longitud de anclaje frente al hendimiento en presencia de armadura de confinamiento se puede apreciar en la Figura 8b (extraída de la Figura 8a), en la que se representan las curvas correspondientes a separaciones entre barras: $c_s = 1.0 \varnothing$, $2.0 \varnothing$ y $3.0 \varnothing$. La Figura 8b muestra cómo, en el caso de una distancia libre entre barras de $1.0 \varnothing$, la longitud de anclaje se puede reducir un 45% si la armadura transversal se coloca a 100 mm en lugar de a 400 mm.

3. Conclusiones

Las longitudes de anclaje en la última versión del Eurocódigo 2 han aumentado considerablemente respecto a la versión anterior. La nueva formulación es mucho más sensible al fallo por hendimiento del hormigón, especialmente para separaciones libres entre barras comprendidas entre uno y dos diámetros. La nueva norma propone expresiones para considerar la contribución de la armadura de confinamiento y transversal que habrán de ser aplicadas de manera habitual para el cálculo de las longitudes de anclaje dado que este factor puede afectar significativamente al resultado obtenido. Dado que los valores de la longitud de anclaje tabulados en la Tabla 11.1 del nuevo Eurocódigo 2 no tienen en cuenta la armadura transversal, su uso en la práctica estará muy limitado y será necesario determinar la longitud de anclaje a partir de la formulación propuesta (Ecuaciones 11.3 y 11.4 del nuevo Eurocódigo 2).

Bibliografía

- [1] EN1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures EN 1992-1-1. Brussels: European Committee for Standardization; 2023.
- [2] Miguel Sosa PF, Martí Vargas JR, Bonet-Senach JL, Castro-Bugallo MC, Fernández-Prada MA. Diseño de un ensayo para el estudio experimental del anclaje de armaduras pasivas en nudos C-C-T. Hormigón y Acero 2004;55:119–28.
- [3] Hernández-Montes E, Pascual-Vicente RM, Sénica de la Cruz J, Gil-Martín L.

Tolerancia en el empalme por solape (traslape) de grupos (paquetes) de barras según el EC2 y la ACI-318. *Hormigón y Acero* 2020;71:59–62.
<https://doi.org/10.33586/hya.2019.2881>.

- [4] Hernández-Montes E, Gil-Martín LM. *Concrete Structures. Design and Residual Capacity Assessment*. CRC. London: 2024.
- [5] ACI 318 (2019). *Building code requirements for structural concrete and commentary*, American Concrete Institute; Farmington Hills, MI, USA.
- [6] Fib. *bulletin 72 - Bond and anchorage of embedded reinforcement: background to the fib model code for concrete structures 2010*. Lausanne, Switzerland: 2014.
- [7] Cairns J. *Design Provisions for Anchorages and Laps in the Revised EC2*. *Hormigón y Acero* 2023;74:123–37.
- [8] CEN. *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1–1: General rules and rules for buildings UNE-EN 1992-1-1*. European Committee for Standardization. Brussels: 2004.
- [9] AASHTO. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. 9th ed. Washington, D.C.: 2020.