

Propuesta de diseño para estimar el diagrama axil-momento de pilares de hormigón armado reforzados con angulares y presillas metálicos

Julio Garzón-Roca¹, Isabel B. Valente^{2, †}

*ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P - 4800-058 Guimarães, Portugal*

José M. Adam², Pedro A. Calderón²

*ICITECH, Universitat Politècnica de València, Departamento de Ingeniería de la
Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España*

ABSTRACT

De las diferentes técnicas existentes en refuerzo de pilares de hormigón armado, el uso de angulares y presillas metálicas, ha sido y sigue siendo, una de las técnicas más utilizadas. Sin embargo, todavía a día de hoy no existe una metodología totalmente aceptada sobre cómo debe diseñarse y comprobarse un refuerzo empleando esta técnica. En este artículo se presenta una nueva propuesta de diseño que permite obtener, de forma simple y rápida, el diagrama axil-momento de un pilar de hormigón armado reforzado con angulares y presillas. Esta nueva propuesta se basa en la aproximación del mencionado diagrama mediante una parábola dada por 3 puntos. Con ello se logra un considerable grado de ajuste con el comportamiento real exhibido por un pilar reforzado, lo que unido a su sencillez, convierten a la nueva propuesta de diseño en una opción recomendable para profesionales del sector que necesiten calcular el refuerzo de un pilar de hormigón armado con angulares y presillas.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se plantea la necesidad de reforzar un pilar de hormigón armado (HA) en una estructura de edificación, una de las técnicas más habituales de refuerzo consiste en la instalación de un perfil angular (por ejemplo, de la serie normalizada LPN) en cada una de las cuatro esquinas del pilar y la unión de éstos mediante la soldadura de una serie de platabandas o presillas metálicas (Figura 1). Esta técnica, conocida como refuerzo con angulares y presillas, ha demostrado ser efectiva, económica y de fácil ejecución (CEB-FIB, 2003; Wu *et al.*, 2006; Adam *et al.*, 2009a), y su uso está extendido a nivel mundial, teniéndose constancia de su empleo tanto en Europa (Cirtek, 2001) como en Asia (Fukuyama and Sugano, 2000) o América (Oey and Aldrete, 1996).

¹ Postdoctoral Research Assistant

² Professor

[†] Corresponding author (isabelv@civil.uminho.pt)

Aunque a primera vista el diseño de un refuerzo con angulares y presillas puede parecer algo sencillo, en realidad se trata de un tema bastante complejo, ya que son muchas las variables que pueden tener influencia en el comportamiento estructural de esta tipología de refuerzo (Cirtek, 2001; Adam *et al.*, 2007; Adam *et al.*, 2009a; Giménez *et al.*, 2009; Garzón-Roca, 2013). En especial, un aspecto de gran importancia es la forma de conectar el refuerzo con el hormigón del nudo viga-pilar (Adam *et al.*, 2008a). En la práctica constructiva, tal y como se muestra en la Figura 1, esto suele llevarse a cabo mediante la incorporación de un capitel metálico soldado a la última presilla y en contacto con el nudo; cabe señalar que la colocación de dichos capiteles permite una transmisión directa de esfuerzos desde el nudo hacia el refuerzo, lo que incrementa considerablemente la eficiencia y eficacia del refuerzo con angulares y presillas (Garzón-Roca, 2013).

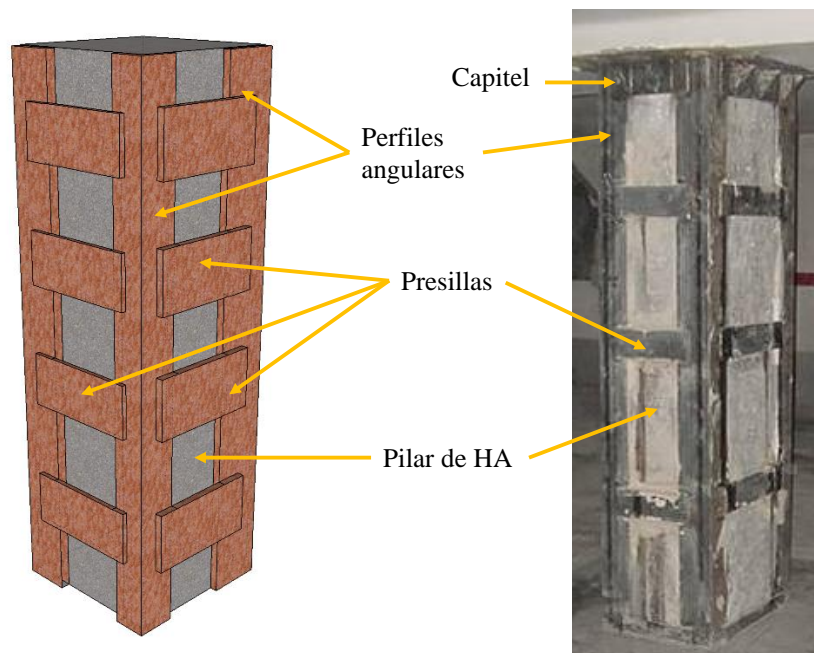


Figura 1 – Vista general y componentes de un refuerzo con angulares y presillas.

Puesto que en la realidad los pilares de un edificio no van a estar sometidos exclusivamente a un esfuerzo axial, sino que la presencia de momentos flectores actuando conjuntamente con el esfuerzo axial será también posible, para poder realizar un dimensionamiento adecuado, es preciso conocer el diagrama axil-momento (N-M) de un pilar HA reforzado con angulares y presillas. En este campo, se tienen diferentes propuestas de diseño (Montuori and Piluso, 2009; Li *et al.*, 2009; Jorgensen *et al.*, 2013) que, sin embargo, no logran, en general, aproximar de forma satisfactoria los resultados experimentales y numéricos, o son demasiado complejas para ser potencialmente trasladadas a códigos de diseño.

A partir de la observación de los resultados de un estudio numérico previo realizado por los autores (Garzón-Roca *et al.*, 2012), en este artículo se presenta una sencilla propuesta de diseño obtenida empíricamente, que permite determinar el diagrama N-M de un pilar de HA reforzado con angulares y presillas. La propuesta se basa en aproximar el comportamiento a flexocompresión del pilar reforzado al de una parábola definida por tres puntos: flexión simple, compresión simple, y punto de transición en el que el pilar reforzado comienza a mostrar un comportamiento similar al de una sección mixta hormigón-acero.

2. BREVE DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL MODELO NUMÉRICO PREVIO

La propuesta de diseño presentada en este artículo nace de la observación del comportamiento y la forma que presentan los diagramas N-M obtenidos numéricamente en el trabajo desarrollado en Garzón-Roca *et al.* (2012). En dicho estudio se construye un modelo de elementos finitos capaz de reproducir el comportamiento a flexocompresión de un pilar de HA reforzado con angulares y presillas, considerando la influencia del nudo viga-pilar y empleando capiteles como elemento de conexión del refuerzo con el nudo.

Dicho modelo de elementos finitos se desarrolló empleando el software comercial ABAQUS v6.8 (2008) y simuló la zona del nudo viga-pilar de un entramado típico de edificación en el cual el pilar es reforzado. El modelo se calibró y validó en base a una serie de ensayos experimentales realizados también por los autores (Garzón-Roca *et al.*, 2011a; Garzón-Roca *et al.*, 2011b), obteniéndose un buen grado de ajuste entre los resultados experimentales y numéricos, tanto en términos de modos de rotura y comportamiento general, como en términos de carga última (donde el modelo ajustó al 93% de media los resultados experimentales manteniendo una desviación típica estándar por debajo del 1%). La Figura 2 muestra una vista del modelo de elementos finitos, así como de las probetas ensayadas en laboratorio. En ambos casos, se puede observar que el pilar se dispuso en horizontal, quedando el nudo viga-soporte en posición vertical. Gracias a la existencia de dos planos de simetría, para el modelo de elementos finitos, tan sólo se modelizó un cuarto de las probetas.

Para esta simulación, el hormigón y el refuerzo metálico se modelizaron empleando elementos hexaédricos de 8 nodos con integración reducida (C3D8R), mientras que las armaduras se introdujeron como elementos lineales tipo barra de dos nodos sin rigidez a flexión (T2D3). El acero se modelizó con un comportamiento elástico-perfectamente plástico, igual en tracción y compresión; por su parte, para el hormigón se empleó el modelo no lineal “Concrete Damage Plasticity” de ABAQUS, el cual tenía en cuenta el confinamiento y permitía introducir un comportamiento diferente en tracción y compresión. Para el caso de la tracción, se adoptó un comportamiento lineal hasta alcanzar la resistencia a tracción del hormigón, tras lo cual el efecto conocido como “tensión-stiffening” quedó representado mediante una curva parabólica; para el comportamiento a compresión se empleó el modelo de Saenz (1964). Asimismo, el modelo numérico consideró los efectos de segundo orden geométricos y tuvo en cuenta la interacción por fricción entre el hormigón del pilar y el acero del refuerzo mediante la disposición de superficies de contacto entre ambos materiales con un coeficiente de rozamiento, μ , igual a 0.2. Por su parte, el contacto entre el capitel metálico situado al final del refuerzo metálico y el hormigón del nudo permite el posible despegue entre ambos elementos y no presenta ningún tipo de fricción ($\mu = 0$).

Una vez calibrado el modelo de elementos finitos, se llevó a cabo un estudio paramétrico en el que se examinó la influencia de varios factores como la dimensión de los angulares, el tamaño y la separación de las presillas o la calidad de los materiales que forman el pilar reforzado (hormigón y acero). La Figura 3 muestra algunos de los diagramas N-M obtenidos; en estos gráficos, las diferentes simulaciones se identifican mediante la nomenclatura “ $Lx_1.fyLx_2.fcx_3.4\emptyset x_4$ ”, siendo x_1 la dimensión del angular (perfil de la serie normalizada LPN), x_2 el límite elástico del acero del refuerzo, x_3 la resistencia a compresión simple del hormigón del pilar, y x_4 el diámetro en mm de las armaduras contenidas en el pilar; cabe señalar que en todos los casos el pilar fue armado con 4 armaduras, y que la geometría del pilar y del nudo viga-pilar permaneció constante e igual a la indicada en la Figura 2.

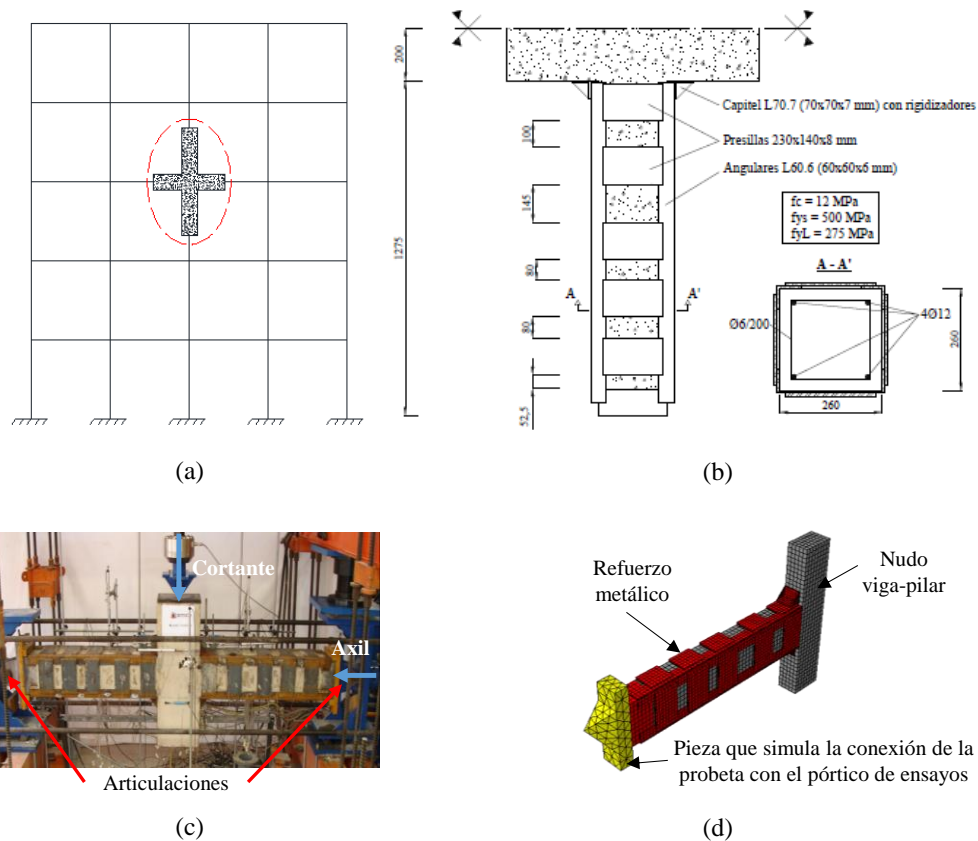


Figura 2 – Ensayos experimentales (Garzón-Roca *et al.*, 2011a; Garzón-Roca *et al.*, 2011b) y modelo numérico desarrollado (Garzón-Roca *et al.*, 2012): a) Zona estudiada, correspondiente al nudo viga-pilar de un entramado típico de edificación; b) Geometría de las probetas ensayadas experimentalmente (cotas en mm); c) Vista de una probeta experimental en el pórtico de ensayos; d) Vista general del modelo de elementos finitos desarrollado.

De la observación de estos diagramas se pueden extraer dos aspectos fundamentales, que van a ser la base de la propuesta de diseño presentada en este artículo: 1) para niveles de axil bajos, el refuerzo con angulares y presillas tiene poca influencia, no produciendo un aumento muy significativo del máximo momento flector respecto al pilar original sin reforzar; y 2) para niveles de axil medios y altos, el refuerzo con angulares y presillas sí mejora notablemente el comportamiento del pilar de HA, y además, en estos caso, variar la dimensión de los angulares del refuerzo o del límite elástico que lo forma, produce un aumento significativo en el momento flector resistido. Asimismo, se observa que cuanto mayor es la resistencia a compresión del hormigón mayor es la resistencia a flexocompresión del pilar reforzado, aunque dicho efecto es muy reducido para niveles de axil bajos; por el contrario, el efecto de la cuantía de armadura es constante en todo el diagrama N-M, registrándose un incremento en la resistencia a flexocompresión del pilar reforzado mayor cuanto mayor es este parámetro.

Los aspectos anteriores quedan explicados por la actuación de los diferentes mecanismos resistentes presentes en un refuerzo con angulares y presillas, y que son los responsables del aumento de la resistencia y ductilidad del pilar: a) el confinamiento del hormigón, consecuencia del efecto Poisson, y que supone un aumento de la resistencia a compresión del hormigón, así como de su deformación máxima; b) la transmisión de tensiones rasantes entre el hormigón del pilar y el acero del refuerzo, debido al contacto entre ambos materiales, y que se asegura disponiendo en la interfaz un mortero de cemento o epoxi; y c) la transmisión directa de esfuerzos desde el nudo viga-pilar al refuerzo metálico, lo cual

suele conseguirse, en la práctica constructiva habitual, su mediante la incorporación de unos capiteles metálico soldado a la última presilla y en contacto con el nudo.

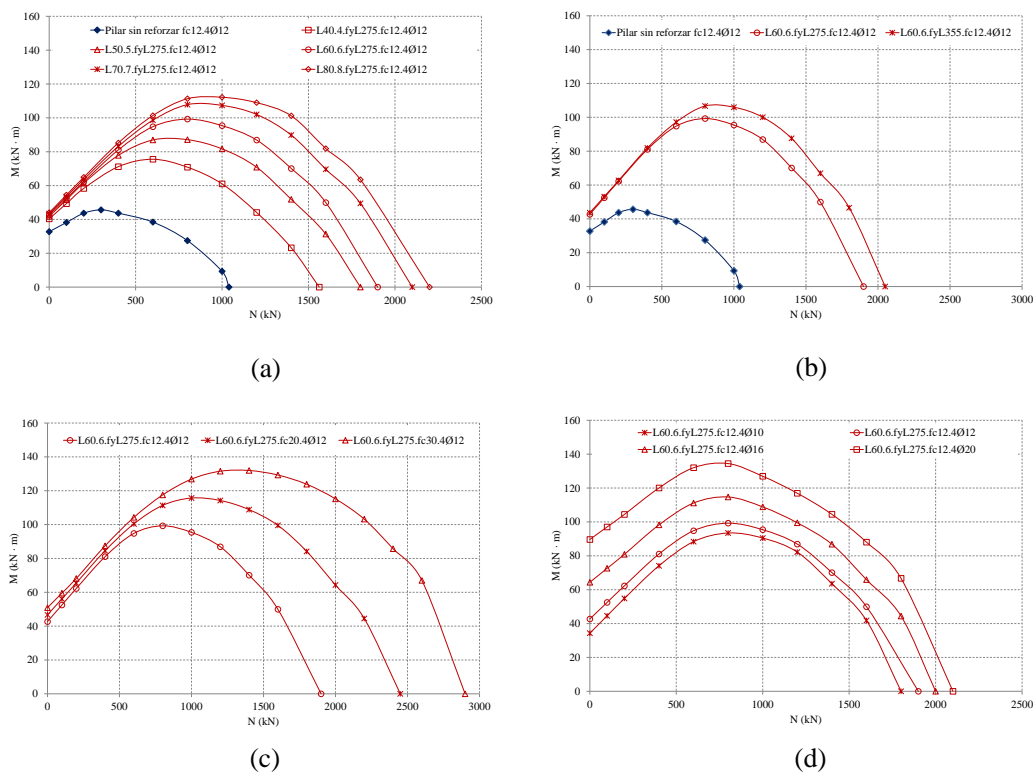


Figura 3 – Algunos diagramas N-M obtenidos en Garzón-Roca *et al.* (2012):
 (a) Variación de la dimensión del perfil angular; (b) Variación del límite elástico del acero del refuerzo; (c) Variación de la resistencia a compresión del hormigón del pilar de HA original;
 (d) Variación de la armadura del pilar de HA original.

Así, cuando el axil es muy reducido, debido a la existencia del momento flector uno de los extremos de la sección del encuentro del pilar con el nudo viga-pilar se encontrará traccionado, y consecuentemente, ello producirá un despegue del capitel, lo que ocasionará que no exista una completa transmisión directa de esfuerzos desde el nudo viga-pilar al refuerzo metálico (en este caso, sólo tendrá lugar en la zona comprimida); asimismo, dado el bajo nivel de axil y la existencia de regiones traccionadas, el confinamiento del hormigón será reducido.

Por el contrario, cuando el axil es elevado, toda la sección del encuentro pilar – nudo viga-pilar se encontrará comprimida, por lo que la transmisión directa de esfuerzos será completa; además, dado el alto nivel de axil, el confinamiento será mayor. Adicionalmente, en esta situación, variar la dimensión del angular o del límite elástico del acero afectará directamente tanto al esfuerzo total que puede absorber el refuerzo por transmisión directa como la capacidad del refuerzo para proveer de confinamiento al hormigón.

De hecho, de otras investigaciones llevadas a cabo sobre refuerzos con angulares y presillas (Adam *et al.*, 2008b; Adam *et al.*, 2009b) es posible afirmar que cuando se disponen capiteles como elemento de conexión del refuerzo con el nudo viga-pilar, la aplicación del Eurocódigo 4 (CEN, 2004) permite determinar con suficiente grado de aproximación el axil máximo resistido por el pilar reforzado. El que el máximo axil pueda estimarse empleando dicha formulación supone admitir que para esa situación de carga el pilar reforzado se comporta como una sección mixta hormigón-acero.

Sin embargo, tal y como muestra la Figura 4, al superponer el diagrama N-M que se obtendría empleando el Eurocódigo 4 (CEN, 2004) a diagramas N-M obtenidos numéricamente en Garzón-Roca *et al.* (2012), se observa que si bien para niveles medio y altos el Eurocódigo 4 (CEN, 2004) reproduce adecuadamente el comportamiento del pilar reforzado, para niveles bajos de axil éste sobrestima considerablemente la resistencia a flexocompresión del pilar reforzado. De ello se deduce que, asimilar el comportamiento de un pilar reforzado con angulares y presillas al de una sección mixta sólo puede ser admitido a partir de un cierto nivel de axil, que se correspondería con el punto de corte entre ambos diagramas. Probablemente sea en ese punto donde el nivel de compresión es tal que es capaz de anular las tracciones inducidas por el momento flector, lo que lleva mejorar considerablemente tanto el mecanismo resistente de transmisión directa de tensiones como el confinamiento del hormigón del pilar, traduciéndose todo ello en que la sección sea asimilable a una sección mixta.

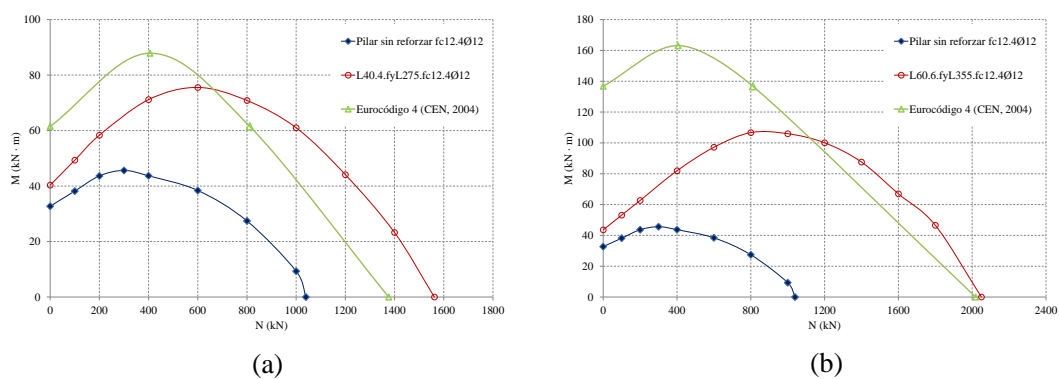


Figura 4 – Comparación entre diagramas N-M obtenidos por Garzón-Roca *et al.* (2012) y la formulación del Eurocódigo 4 (CEN, 2004) correspondiente; (a) Probetas L40.4.fyL275.fc12.4Ø12; (b) Probetas L60.6.fyL355.fc12.4Ø12.

3. PROPUESTA DE DISEÑO

En el apartado anterior se ha visto que en el comportamiento a flexocompresión de un pilar de HA reforzado con angulares y presillas metálicos existen fundamentalmente dos zonas que vienen condicionadas por el nivel de axil: una zona de axiles reducidos en la que el refuerzo metálico tiene poca incidencia en la resistencia; y una zona de axiles medios y altos, donde el pilar reforzado trabaja de una forma similar al de una sección mixta. Con ello, tras el análisis de los aspectos anteriores, se hace posible desarrollar una propuesta de diseño que permita obtener el diagrama N-M de un pilar de HA reforzado con angulares y presillas. Puesto que al observar los diferentes diagramas N-M obtenidos numéricamente la forma de estos recuerda al de una parábola, se propone como fórmula de diseño precisamente una curva parabólica de la forma expresada por la eq. (1):

$$M = \alpha \cdot N^2 + \beta \cdot N + \gamma \quad (1)$$

Donde N y M son el axil y el momento flector respectivamente, y α , β y γ los coeficientes que definen la parábola; estos coeficientes, se obtienen imponiendo la condición de que la curva parabólica debe pasar por los tres puntos definidos en la Figura 5 los cuales son el resultado de las observaciones y conclusiones obtenidas en el apartado anterior. Dichos puntos se explican en los subapartados siguientes.

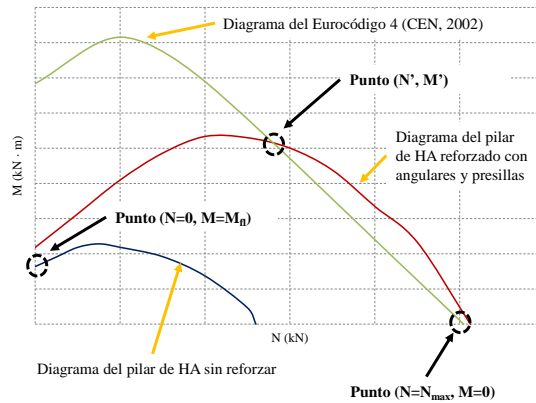


Figura 5 – Definición de los tres puntos de paso que permiten determinar la curva parabólica de la nueva propuesta de diseño.

3.1. Punto correspondiente a la flexión simple, ($N=0$; $M=M_{fl}$)

Este punto se estima como la resistencia a flexión simple del soporte sin reforzar, ya que como se ha visto el refuerzo metálico apenas tiene influencia para niveles de axil reducidos; por tanto, M_{fl} puede calcularse a partir de cualquier procedimiento habitual para el cálculo de una sección de hormigón sometida a flexión simple en estado límite último.

3.2. Punto correspondiente a la máxima compresión, ($N=N_{max}$; $M=0$)

Este punto tal y como se ha comentado arriba, puede estimarse empleando el Eurocódigo 4 (CEN, 2004), siendo por tanto N_{max} el valor dado por la eq. (2):

$$N_{max} = f_c \cdot A_c + f_{ys} \cdot A_s + f_{yL} \cdot A_L \quad (2)$$

Donde A_c y f_c son el área y la resistencia del hormigón; A_s y f_{ys} el área total y el límite elástico del acero que forma las armaduras; y, A_L y f_{yL} el área total de los perfiles angulares y el límite elástico del acero del refuerzo metálico.

3.3. Punto correspondiente a la intersección del diagrama N-M real con el diagrama N-M del Eurocódigo 4 (CEN, 2004), (N' ; M')

Este punto representa la transición del pilar reforzado hacia un comportamiento similar al de una sección mixta hormigón-acero, y que debido a su propia definición, sólo puede ser determinado directamente en la realidad mediante la realización de ensayos experimentales o modelizaciones numéricas. No obstante, a partir de la obtención de este punto de corte para 11 diagramas N-M obtenidos con el modelo de elementos finitos desarrollado por Garzón-Roca *et al.* (2012), ha sido posible realizar una estimación de la ubicación de dicho punto. Para ello, en primer lugar, puesto que se observó que la cuantía de armadura era el único parámetro que tenía una influencia uniforme en todo el diagrama N-M de un pilar reforzado (ver Figura 3), de forma similar al coeficiente de contribución del acero que define el Eurocódigo 4 (CEN, 2004), se definió el coeficiente δ_{As} , expresado en la eq. (3), y que se ha denominado “coeficiente de contribución de la armadura”:

$$\delta_{As} = \frac{A_s \cdot f_{ys}}{N_{max}} \quad (3)$$

Con base a este coeficiente, se llevó a cabo una regresión lineal sobre las 11 intersecciones conocidas, de forma que fue posible relacionar el mencionado coeficiente δ_{As} con el ratio N'/N_{max} para cada caso estudiado. Finalmente, con todo ello, se obtuvo la expresión recogida por la eq. (4), la cual permite estimar el axil N' , intersección del diagrama N-M real con el diagrama N-M del Eurocódigo 4 (CEN, 2004), sin la necesidad de llevar a cabo ningún tipo de estudio experimental o numérico. Conocido el valor de N' , el momento flector M' puede obtenerse fácilmente como el momento concomitante con dicho axil N' de acuerdo con el diagrama N-M del Eurocódigo 4 (CEN, 2004):

$$N' = (0.65 - 0.85 \cdot \delta_{As}) \cdot N_{max} \quad (4)$$

4. COMPROBACIÓN DE LA VALIDEZ DE LA NUEVA PROPUESTA DE DISEÑO

Definida la nueva propuesta de diseño, se llevó a cabo una comparación entre los diagramas N-M obtenidos en base dicha propuesta y los diagramas N-M obtenidos numéricamente a partir del modelo de elementos finitos (Garzón-Roca *et al.*, 2012). La Figura 6 recoge algunas de estas comparaciones, mostrando conjuntamente el diagrama del pilar reforzado obtenido numéricamente con el modelo de elementos finitos, el diagrama del Eurocódigo 4 (CEN, 2004) y la nueva propuesta de diseño. Como puede verse, la nueva propuesta de diseño funciona adecuadamente, y es capaz de captar el comportamiento general del pilar reforzado.

Asimismo, para demostrar la idoneidad y utilidad de aplicar la nueva propuesta de diseño, la Figura 7 muestra, conjuntamente, el diagrama N-M obtenido empleando la nueva propuesta de diseño y los diagramas correspondientes empleando dos propuestas ya existentes en la literatura:

- a) La propuesta de Li *et al.* (2009), quienes estudian pilares de HA reforzados mediante angulares y presillas sometidos a cargas cíclicas. Estos autores proponen una metodología para determinar el diagrama N-M basada en la utilización de un modelo de hormigón confinado similar al propuesto por Teng *et al.* (2002) para el refuerzo de pilares de HA con materiales compuestos FRP.
- b) La propuesta de Montuori y Piluso (2009), quienes estudian experimentalmente tramos de pilar de HA reforzados con angulares y presillas bajo cargas axiales excéntricas. Para estos autores, si el refuerzo no es continuo a través del nudo (como es el caso de los refuerzos estudiados en este artículo, en los que sólo se refuerza el tramo de pilar, dejando el nudo viga-pilar sin reforzar), entonces el refuerzo de angulares y presillas únicamente dota de confinamiento al pilar reforzado, efecto que se puede estimar empleando un modelo similar al propuesto por Mander *et al.* (1988), para el confinamiento del hormigón por parte de las armaduras.

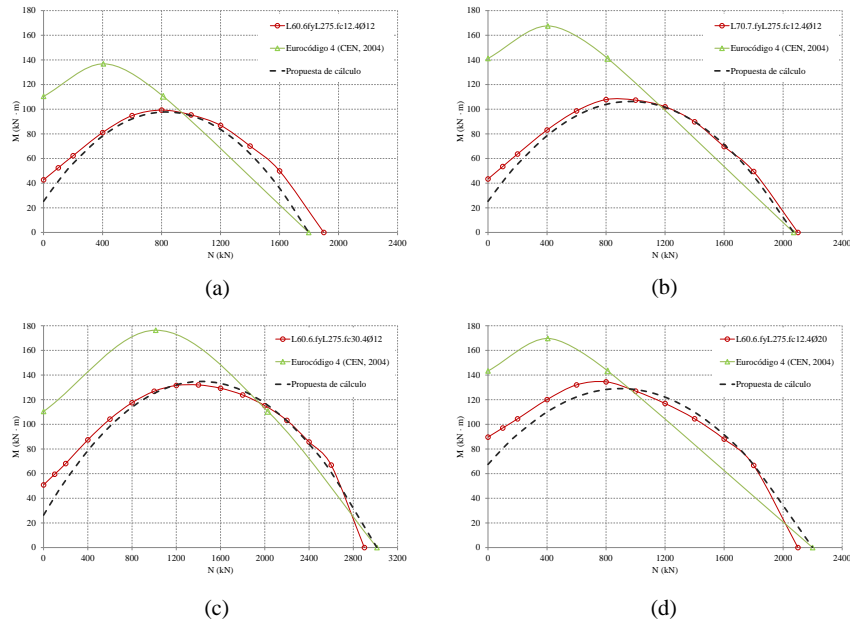


Figura 6 – Comparación entre algunos diagramas N-M obtenidos numéricamente por Garzón-Roca *et al.* (2012) y el empleo de la nueva propuesta de diseño: (a) Probetas L60.6.fyL275.fc12.4Ø12; (b) Probetas L70.7.fyL275.fc12.4Ø12; (c) Probetas L60.6.fyL275.fc30.4Ø12; (d) Probetas L60.6.fyL275.fc12.4Ø20.

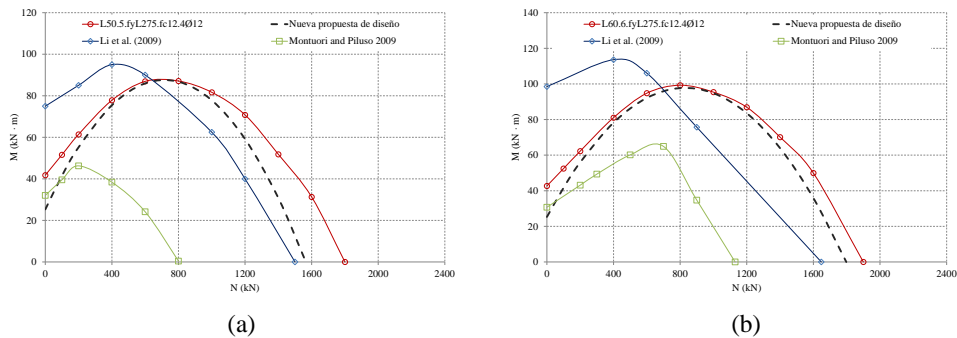


Figura 7 – Comparación entre la nueva propuesta de diseño y otras propuestas existentes en la literatura: (a) Probetas L50.5.fyL275.fc12.4Ø12; (b) Probetas L60.6.fyL275.fc12.4Ø12.

Como se puede ver, las propuestas de cálculo existentes no se ajustan adecuadamente al comportamiento del pilar de HA reforzado con angulares y presillas. Así, mientras que la propuesta de Montuori y Piluso (2009) podría emplearse para situaciones en las que el esfuerzo axial es reducido, su uso para determinar el momento flector resistido en el caso de axiles medios y altos supondría infravalorar considerablemente la resistencia del pilar reforzado, lo que llevaría a un sobredimensionamiento no deseado. Por otra parte, el empleo de la propuesta de Li *et al.* (2009) podría ser válido para el caso de axiles medios y altos o para estimar el máximo axial resistido por el pilar reforzado, pero su uso fuera de estas regiones dejaría al proyectista claramente del lado de la inseguridad.

Por el contrario, la nueva propuesta de diseño es capaz de adaptarse adecuadamente al diagrama N-M del pilar reforzado sea cual sea el nivel del esfuerzo axial, lo que la convierte en una propuesta mucho más eficaz y útil, a la par que su sencillez permite que sea fácilmente aplicada.

5. APLICABILIDAD Y LIMITACIONES DE LA NUEVA PROPUESTA DE DISEÑO

Debido a la naturaleza de la propuesta de diseño, ésta deberá aplicarse mediante un procedimiento de prueba-error, de forma que dado pilar de HA a reforzar, se escoge un tipo de acero y un perfil angular cualquiera, y se aplica la propuesta de diseño expuesta en este artículo. Se observa entonces si la pareja de esfuerzos (N; M) solicitante es resistida o no por el refuerzo planteado; si no es así, se debe incrementar perfil angular o la clase del tipo de acero; en caso contrario, el refuerzo planteado es válido.

Una vez determinado el perfil angular a emplear y el tipo de acero, queda por definir la disposición de las presillas. Cabe señalar que la propuesta de diseño desarrollada en este artículo asume implícitamente que se colocan el número adecuado de presillas para evitar que se produzca el pandeo de los perfiles angulares, de forma que se espera que el agotamiento del pilar reforzado tenga lugar en las cercanías del nudo viga-pilar (Garzón-Roca *et al.*, 2012). Así pues, las presillas deberán disponerse para que este fenómeno de inestabilidad no tenga lugar.

Es importante señalar que la nueva propuesta de diseño se ha obtenido considerando que el refuerzo queda conectado al nudo viga-pilar mediante la incorporación de unos capiteles soldados a la última presilla y en contacto con el nudo. Estos capiteles podrán estar formados también por perfil metálicos angulares, disponiendo rigidizadores que aseguren su rigidez (del Río y Ortiz, 1992). Asimismo, los capiteles deberán tener la resistencia suficiente para no ser el elemento que condicione el agotamiento, debiendo diseñarse todas las soldaduras para resistir tanto esfuerzos de compresión como esfuerzos de tracción. También deberá estudiarse la posible concentración de tensiones que el capitel pueda producir sobre las vigas que llegan al nudo, para evitar así una rotura frágil de dichas vigas (Ramírez y Bárcena, 1975; Ramírez *et al.*, 1977; Ramírez, 1996; Fernández-Cánovas, 1994; Regalado, 1999; Ruiz *et al.*, 2000).

Finalmente, es necesario destacar que en todos los casos estudiados, el armado del pilar de HA fue simétrico, por lo que la propuesta de diseño no puede ser empleada si la armadura dispuesta en el pilar no es simétrica. Asimismo, en el caso de que el pilar a reforzar sea muy esbelto, presente una sección transversal de grandes dimensión, y/o en el caso de pilares apantallados, no se recomienda aplicar la nueva propuesta de diseño.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una nueva propuesta de cálculo para el diseño y comprobación de pilares de HA reforzados con angulares y presillas en el que se emplean capiteles como elemento de conexión del refuerzo con el nudo viga-pilar.

La nueva propuesta de diseño proporciona el diagrama N-M de un refuerzo de esta tipología, el cual se obtiene fácilmente como una parábola definida por tres puntos: flexión simple, donde se asume que la resistencia es igual a la flexión del pilar de HA sin reforzar; compresión simple, donde se considera que el axil máximo resistido por un refuerzo de angulares y presillas puede calcularse de acuerdo con el Eurocódigo 4 (CEN, 2004) como si se tratase de una sección mixta acero-hormigón; y un tercer punto de paso, representativo del instante en el que el pilar reforzado comienza a mostrar un comportamiento similar al de una sección mixta, y para el cual se ha propuesto una expresión empírica que permite su determinación.

La nueva propuesta de diseño se ha validado y comparado con otras propuestas existentes en la literatura y ha demostrado ser capaz de captar de una forma mucho más eficaz el comportamiento a flexocompresión de un pilar de HA reforzado con angulares y presillas. Por todo ello, la nueva propuesta de diseño demuestra ser una opción adecuada y

recomendable de ser aplicada por ingenieros o arquitectos que tenga la necesidad de diseñar un refuerzo de estas características.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren mostrar su agradecimiento al Ministerio de Educación y Ciencia de España y a la Generalitat Valenciana por su apoyo financiero para hacer posible los estudios experimentales y numéricos que han dado como resultado la actual propuesta de cálculo. Asimismo, agradecer a los Profesores Ester Giménez, Francisco J. Pallarés y Salvador Ivorra, y especialmente al Doctor Joaquín Ruiz-Pinilla, su ayuda y colaboración en el proyecto que supuso el estudio a flexocompresión de pilares de HA reforzados con angulares y presillas metálicos.

8. REFERENCIAS

ABAQUS 6.8. *Abaqus analysis user's manual*. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA (2008).

Adam, J.M., Ivorra, S., Giménez, E., Moragues, J.J., Miguel, P., Miragall, C. and Calderón, P.A., Behaviour of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips, *Steel and Composites Structures*, **7(5)**, 405–419 (2007).

Adam, J.M., Ivorra, S., Pallarés, F.J., Giménez, E. and Calderón, P.A., Column-joint assembly in RC columns strengthened by steel caging, *Proceedings of the ICE—Structures and Buildings*, **161(6)**, 337–348 (2008a).

Adam, J.M., Giménez, E., Calderón, P.A., Pallarés, F.J. and Ivorra, S., Experimental study of beam–column joints in axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips. *Steel and Composites Structures*, **8(4)**, 329–342 (2008b).

Adam, J.M., Ivorra, S., Pallarés, F.J., Giménez, E. and Calderón, P.A., Axially loaded RC columns strengthened by steel caging. Finite element modelling, *Construction and Building Materials*, **20(6)**, 2265–2276 (2009a).

Adam, J.M., Ivorra, S., Pallarés, F.J., Giménez, E. and Calderón, P.A., Axially loaded RC columns strengthened by steel caging, *Proceedings of the ICE—Structures and Buildings*, **162(3)**, 199–208 (2009b).

CEB-FIB, *Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings*, Bulletin no. 24. Task Group 7.1, Lausanne, Switzerland (2003).

Cirtek, L., RC columns strengthened with bandage—experimental programme and design recommendations, *Construction and Building Materials*, **15(8)**, 341–349 (2001).

CEN, *Eurocode 4: design of composite steel and concrete structures. Part 1: general rules and rules for buildings*, Brussels, Belgium (2004).

Del Río, A. and Ortiz, J., *Rehabilitación de estructuras de hormigón*, ANCOP, Madrid (1991).

Fernández-Cánovas M., *Patología y Terapéutica del Hormigón Armado*, 3ª Edición, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid (1994).

Fukuyama, H. and Sugano, S., Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken–Nanbu earthquake, *Cement and Concrete Composites*, **22(1)**, 59–79 (2000).

Garzón-Roca, J., Adam, J.M. and Calderón, P.A., Behaviour of RC columns strengthened by steel caging under combined bending and axial loads, *Construction and Building Materials*, **25(5)**, 2402–2412 (2011a).

Garzón-Roca, J., Ruiz-Pinilla, J., Adam, J.M. and Calderón, P.A., An experimental study on steel-caged RC columns subjected to axial force and bending moment, *Engineering Structures*, **33(2)**, 580–590 (2011b).

Garzón-Roca, J., Adam, J.M., Calderón, P.A. and Isabel B. Valente, Finite element modelling of steel-caged RC columns subjected to axial force and bending moment, *Engineering Structures*, **40**, 168–186 (2012).

Garzón-Roca, J., *Estudio del comportamiento a flexocompresión de soportes de hormigón armado reforzados con angulares y presillas metálicos*, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Universitat Politècnica de València, España (2013).

Giménez, E., Adam, J.M., Ivorra, S., Moragues, J.J. and Calderón, P.A., Full-scale testing of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips, *Advance Structural Engineering*, **12(2)**, 169–181 (2009).

Jørgensen, C., Grastveit, R., Garzón-Roca J., Payá-Zaforteza, I, and Adam, J.M., Bearing capacity of steel-caged RC columns under combined bending and axial loads: Estimation based on Artificial Neural Networks, *Engineering Structures*, **56**, 1262–1270 (2013).

Li, J., Gong, J. and Wang, L., Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel jacket, *Construction and Building Materials*, **23(7)**, 2653–2663 (2009).

Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., Theoretical stress–strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, **114(8)**, 1804–1826 (1988).

Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., Observed stress–strain behavior of confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, **114(8)**, 1827–1849 (1988).

Montuori, R. and Piluso, V., Reinforced concrete columns strengthened with angles and battens subjected to eccentric load, *Engineering Structures*, **31(2)**, 539–550 (2009).

Saenz, L.P., Discussion of “Equation for the stress–strain curve of concrete” by Desayi, P. and Krishnan, S., *ACI Journal*, **61**, 1229–1235 (1964).

Ramirez, J.L., Ten concrete column repair methods, *Construction and Building Materials*, **10(3)**, 195–202 (1996).

Ramirez, J.L. and Bárcena, J.M., Eficacia resistente de pilares de hormigón armado de baja calidad reforzados por dos mecanismos diferentes, *Informes de la Construcción*, **272**, 89–98 (1975).

Ramirez, J.L., Bárcena, J.M. and Feijóo, J.M., Comparación resistente de cuatro métodos de refuerzo de pilares de hormigón armado, *Informes de la Construcción*, **290**, 59–68 (1977).

Regalado, F., *Los Pilares: Criterios para su Proyecto, Cálculo y Reparación*, Biblioteca técnica de CYPE Ingenieros, Alicante (1999).

Ruiz, J., Pineda, P., Torrecilla, J.A., Troyano, M., Nieves, F.J., López, F. and García, M.J., Refuerzo de pilares de hormigón de sección rectangular mediante pilares metálicos empresillados, *Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, Lérida (2000).

Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. and Lam, L., *FRP-strengthened RC structures*, West Sussex: John Wiley & Sons (2002).

Oey, H.S. and Aldrete, C.J., Simple method for upgrading an existing reinforced concrete structure, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **1(1)**, 47–50 (1996).

Wu, Y.F., Liu, T. and Oehlers, D.J., Fundamental principles that govern retrofitting of reinforced concrete columns by steel and FRP jacketing, *Advance Structural Engineering*, **9(4)**, 507–533 (2006).