

Resistencia a cortante de elementos compuestos por vigas pretensadas y una losa de hormigón armado

Shear strength of members composed by prestressed concrete beams and a reinforced concrete top slab

Antonio Marí^a, Mauro Poliotti^b, Eva Oller^c, Laura Gomez^d y Luis J. Ortiz^e

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya. Catedrático. antonio.mari@upc.edu

^b Dr. Ing. Civil, Witteveen+Bos Consulting Engineers, The Netherlands. Structural Engineer. mauro.poliotti@witteveenbos.com

^c Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya. Catedrática. eva.oller@upc.edu

^d Ingeniera Mecánica. Master Ing. Estructural, AECOM. Ingeniera Puentes y Estructuras. Laura.Gomez@aecom.com

^e Ingeniero Civil. Universitat Politècnica de Catalunya. Doctorando. luis.jorge.ortiz@estudiantat.upc.edu

RESUMEN

Se presenta un modelo de resistencia a cortante de elementos compuestos por vigas armadas o pretensadas y losa superior de hormigón armado, ejecutadas en dos fases y conectadas mediante armadura. A pesar de su frecuente uso en puentes y forjados de edificios, las normativas no contemplan su resistencia a cortante vertical como pieza compuesta, centrándose en la resistencia a rasante en la junta. El modelo, derivado del Compression Chord Capacity Model, considera el estado previo de tensiones en la viga debido al pretensado y a las fases constructivas, y se ha aplicado a la predicción de los resultados de ensayos, habiendo encontrado buena aproximación en aquellos casos en que no hay rotura de la junta.

ABSTRACT

In this paper, a mechanical model to predict the shear strength of elements composed of reinforced or prestressed concrete beams and a reinforced concrete top slab, executed in two phases and connected by reinforcement is presented. Despite their frequent use in bridges and building floors, regulations do not consider their vertical shear resistance as a composite member, focusing on the strength of the joint. The model, derived from the Compression Chord Capacity Model, considers the previous state of stresses in the beam due to prestressing and the construction phases, and has been applied to the prediction of test results, having found a good approximation in those cases where there is no joint failure.

PALABRAS CLAVE: Hormigón, cortante, resistencia, sección compuesta, modelo, pretensado.

KEYWORDS: Concrete, shear, strength, composite section, mechanical model, prestressing.

1. Introducción

Las estructuras compuestas por vigas armadas o pretensadas y una losa dispuesta en su parte superior, fabricadas con hormigones diferentes y posteriormente conectadas mediante armadura que atraviesa la junta, son muy frecuentes en la

construcción de forjados y tableros de puentes, Figura 1. En estos elementos, la junta entre hormigones se considera el punto más débil, sin embargo, cuando se dispone una cuantía media o alta de armadura pasante, bien anclada en

ambos elementos, el alto rasante resistido en la junta hace que las tensiones normales y tangentes verticales generadas en la viga y en la losa puedan provocar la rotura bajo un estado biaxial de tensiones en cualquiera de los dos elementos. En tal caso, la resistencia a cortante vertical de la viga compuesta podría ser menor que la resistencia a rasante, figura 2. Ello hace



Figura 1. Tablero de viga HP y losa “in situ” de HA.

Recientemente, se han desarrollado modelos mecánicos de resistencia a esfuerzo cortante, como el Multi-Action Shear Model [3] y su simplificación, el “Compression Chord Capacity Model”, (CCCM). [4] que consideran que la contribución de la cabeza no fisurada es la más relevante de entre las componentes de la llamada “contribución del hormigón a la resistencia a cortante, V_{cu} ”.

Por ello, en esta ponencia se ha extendido el CCCM al caso de piezas compuestas por viga y losa, con hormigones diferentes, en las que puede haber tensiones previas en la viga debidas a pretensado y al proceso constructivo por fases, del tratamiento como sección en T. [5]. El modelo se ha verificado comparando sus predicciones con los resultados procedentes de ensayos disponibles en la bibliografía, en los que la rotura no se ha producido por la junta, habiendo encontrado una buena aproximación.

2. Breve descripción del CCCM

El CCCM considera que la resistencia a cortante (V_u) está compuesta por la suma de las contribuciones del hormigón (V_c) y de las

que sea conveniente disponer de modelos teóricos que permitan estimar, de forma simple pero razonablemente aproximada, la resistencia al cortante vertical de la pieza compuesta por viga y losa, además de la resistencia de la junta, aspecto que no consideran las normativas vigentes de hormigón estructural [1], [2].



Figura 2. Rotura por cortante con losa fisurada.

armaduras transversales (V_s). V_c integra la resistencia de la cabeza no fisurada (V_{cu}), la contribución del alma fisurada (V_w) y el efecto pasador de las armaduras longitudinales (V_l). Las hipótesis más relevantes del CCCM son:

- Bajo sollicitación creciente de flexión y cortante se forma una fisura crítica que se desarrolla en dos ramas, una primera en la zona traccionada, que alcanza el eje neutro, y una segunda, en la zona comprimida, que es inestable y da lugar a la rotura de la cabeza bajo un estado multiaxial de tensiones. La formulación se plantea justo antes del desarrollo de esta segunda rama.
- La fisura crítica comienza en una sección donde, para la carga que produce la rotura por cortante, el momento flector iguala al momento de fisuración de la sección. La proyección horizontal de la primera rama de la fisura crítica desde su inicio en la fibra más traccionada hasta el eje neutro de flexión es $0.85d$, según observaciones experimentales.
- La distribución de las tensiones normales en la cabeza de compresión del hormigón es lineal y las tensiones tangenciales se concentran en la cabeza y tienen una distribución parabólica de segundo grado con valores nulos en la fibra más comprimida y en el eje neutro.

- La rotura se inicia en un punto de la cabeza comprimida en el que bajo una combinación de tensiones principales (σ_1 , σ_2) se alcanza la envolvente de rotura bajo un estado biaxial de tensiones. Este punto crítico se sitúa a una distancia del eje neutro $\bar{x}=0.425x$, para valores habituales de $a/d=M/Vd$ entre 2 y 3).

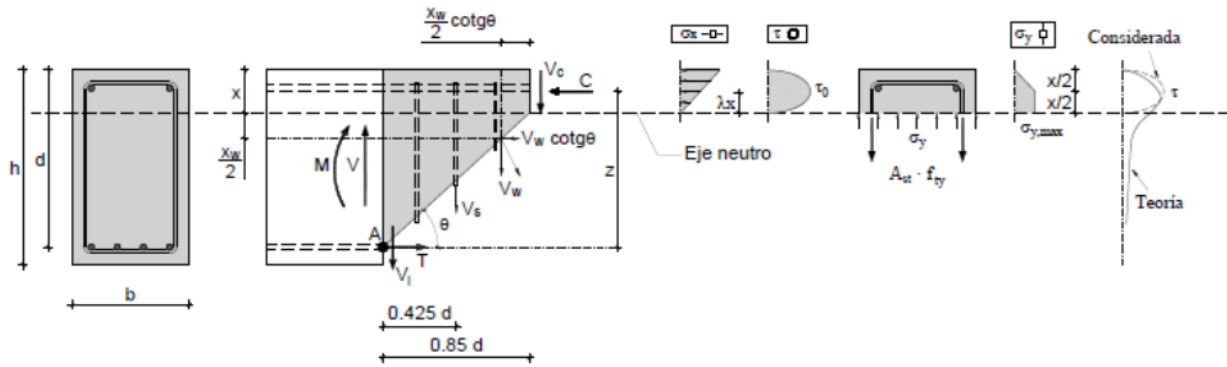


Figura 2. Distribución de tensiones y equilibrio de esfuerzos en una viga fisurada por flexión-cortante.

El valor de la contribución de la cabeza a la resistencia a cortante, V_c , que se obtiene por integración de tensiones tangenciales en la cabeza viene dada por:

$$V_c = \int_0^c \tau(z)b(z)dz =$$

$$K_\tau \zeta x \sigma_1 \sqrt{1 - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{\sigma_1} + \frac{\sigma_x \sigma_y}{\sigma_1^2}} \quad (1)$$

donde $\tau(z)$ es el esfuerzo cortante en un punto de la cabeza no fisurada a una distancia “z” del eje neutro, x es la profundidad del eje neutro, σ_1 es la tensión principal de tracción, σ_x es la tensión longitudinal normal debida a la flexión, σ_y es la tensión vertical normal de compresión debida al confinamiento que producen las armaduras sobre la cabeza de compresión del hormigón, K_τ es una constante de integración, correspondiente a la distribución parabólica de las tensiones tangenciales en la cabeza comprimida, ζ es el factor de efecto de tamaño, dado por la Ecuación 6 de la Tabla 1.

El cortante resistido por la armadura de cortante, dado por la ecuación. (5), se obtiene considerando la fuerza vertical de los estribos intersecados por la primera rama de la grieta crítica. La constante 1,4 en la ecuación. (5) no es

Con las anteriores hipótesis, aislando un tramo de viga situado por encima de la fisura crítica, se establece el equilibrio entre esfuerzos debidos a cargas (axil, cortante y momento flector) y las resultantes de las tensiones en la cabeza de compresión y en las armaduras longitudinales y transversales (Figura 2)

un factor de calibración, sino un término para tener en cuenta el confinamiento del hormigón en el cordón de compresión σ_y provocado por los estribos, ver Ecuación (1)].

3. Adaptación del CCCM al caso de piezas compuestas por vigas y losa

Para adaptar el modelo CCCM a secciones compuestas se han tenido en cuenta a) la presencia de dos hormigones con resistencias diferentes en vigas y losa, lo que altera el valor de las tensiones normales y tangenciales en cada elemento, así como la resistencia frente a tensiones biaxiales de la cabeza comprimida, en función de donde caiga la fibra neutra, b) la influencia de tensiones previas en la viga, por efecto del pretensado en ella o por efecto de la construcción en dos fases, en la profundidad de la fibra neutra de la sección compuesta y en el punto crítico donde se inicia la rotura c) las variaciones en el momento de fisuración que afecta a la posición de la sección donde se inicia la fisura crítica, a su inclinación y a su proyección horizontal, que afecta a V_c y V_s .

Tabla 1. Resumen ecuaciones CCCM para vigas simples de HA y HP, secciones R, I o T.

Concepto	Expresiones	
Resistencia a cortante	$V_{Rd} = V_{cu} + V_{su} \leq V_{Rd,max}$	(2)
Resistencia máxima bielas	$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w b z v_1 f_c \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta}$	(3)
Contribución del hormigón	$V_{cu} = 0.3 \zeta \frac{x}{d} f_c^{2/3} b_{v,eff} d \leq V_{cu,min}$	(4)
	$V_{cu} \leq V_{c,min} = 0.25 \left(\zeta K_c + \frac{20}{d_0} \right) f_c^{2/3} b_w d$	
Contribución arm. cortante	$V_{su} = 1.4 \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} (d - x) \sin \alpha (\cot \theta + \cot \alpha)$	(5)
Factores	Expresiones	
Canto útil equivalente	$d = \frac{A_s d_s + A_p d_p}{A_s + A_p}$; $n \rho_l = n_s \rho_s + n_p \rho_p = \frac{E_s A_s + E_p A_p}{E_c (b \cdot d)}$	(6)
Efecto tamaño y esbeltez	$\zeta = \frac{2}{\sqrt{1 + \frac{d_0}{200}}} \left(\frac{d}{a} \right)^{0.2} \leq 0.45$; $d_0 = d \geq 100 \text{ mm}$	(7)
Fibra neutra flexión	$\frac{x}{d} = \frac{x_0}{d} + \left(\frac{h - x_0}{d} \right) \left(\frac{d}{h} \right) \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_{cp} + f_{ctm}}$; $\sigma_{cp} = \frac{P}{A_c}$	(8a)
		(8b)
	$Si \ n \rho_l \leq \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\delta^2}{1 - \delta} \right]$; $\frac{x_0}{d} = n \rho_l \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{n \rho_l}} \right)$	
	$Si \ n \rho_l > \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\delta^2}{1 - \delta} \right]$; $\frac{x_0}{d} = \beta \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{\alpha}{\beta^2}} \right)$	(8c)
	$\alpha = 2 n \rho_l \frac{b_f}{b_w} + \xi \delta$; $\beta = \xi + n \rho_l \cdot \frac{b_f}{b_w}$; $\delta = \frac{h_f}{d}$; $\xi = \delta \left(\frac{b_f}{b_w} - 1 \right)$	
	$Si \ x \leq h_f \rightarrow b_{v,eff} = b_v = b_w + 2 h_f \leq b$	(9a)
Ancho eficaz de la cabeza	$Si \ x > h_f \rightarrow b_{v,eff} \approx b_w + (b_v - b_w) \left(\frac{h_f}{x} \right)^{\frac{3}{2}}$	(9b)
Inclinación de la fisura	$\cot \theta = \frac{0.85 d_s}{d - x} K_\theta \leq 2.5$; $K_\theta = \frac{(d - h_f) + (h_f - x) \frac{b_v}{b_w}}{(d - x)} \geq 1$	(10)

3.1 Cálculo de la profundidad de la fibra neutra en sección simple fisurada

La profundidad del eje neutro en función del momento aplicado en piezas armadas o pretensadas muestra dos ramas claramente diferentes, separadas por la aparición de la fisuración, como puede observarse en la Figura 3, donde a la izquierda se muestra el resultado una sección rectangular simple de $b=0.3\text{m}$, $h=0.8\text{m}$, $f_c=30 \text{ MPa}$, armada con 5 barras de 16 mm de diámetro y con diversos niveles de pretensado ($\sigma_{pm}/f_{ct}=0, 1, 2$ y 3). En la fase no fisurada, la rigidez $E_{cr} I_v$ es prácticamente constante y, por ello, la profundidad de la fibra neutra se puede obtener analíticamente, tanto en

secciones armadas como pretensadas, mediante la expresión hiperbólica (11), en la que se muestra el valor de la profundidad $x=x_{cr}$ justo al fisurar la sección (para $\sigma_{st}=f_{ct}$, $M_v=M_{cr}$).

$$x = h - \frac{I_v \sigma_{vt}}{M_v - P e} \quad (11)$$

$$x_{cr} = h - \frac{I_v f_{ct}}{M_{cr} - P e}$$

Donde I_v es el momento de inercia; P es la fuerza de pretensado, e su excentricidad, respecto del cdg de la viga, σ_{vt} es la tensión en la fibra más traccionada de hormigón bajo el momento M_v y el pretensado, calculada elásticamente y f_{ct} es la resistencia tracción del hormigón en la viga.

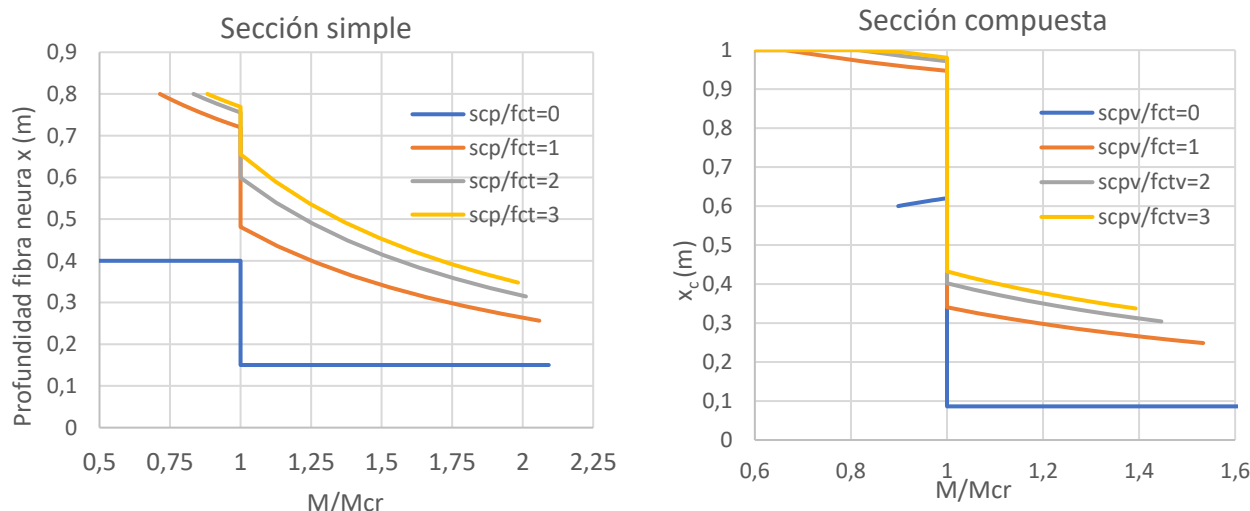


Figura 3. Profundidad “x” en función de M/M_{cr} . Sección simple y compuesta armada o pretensada.

Tras fisurar la viga, la curvatura de la sección aumenta y la profundidad de la fibra neutra se reduce para reestablecer el equilibrio de fuerzas y momentos. Si la pieza es armada, la reducción de x es considerable y tras la fisuración, su valor permanece casi constante ante el aumento del momento aplicado ($M > M_{cr}$). El valor de x viene dado por las ecuaciones (8b) y (8c) de la Tabla 1, para $x < h_f$ y $x > h_f$, respectivamente.

En el caso de piezas pretensadas, x es función de la fuerza de pretensado P , de su excentricidad e y del momento exterior aplicado, M , porque las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos están acopladas lo que, en general, requiere un proceso iterativo de solución. El salto de la profundidad de la fibra neutra, justo al fisurar, es menor que en el caso del armado, debido a la presencia de la fuerza de pretensado, y x se reduce con el aumento de momento, ver en la figura 3.

Como en el modelo CCCM obtiene x de forma simplificada interpolándola entre el valor x_{i0} calculado en sección fisurada para una fuerza de pretensado $P=0$, (como en hormigón armado) y el valor $x=x_{cr}$, para $P=P_{cr}$, que, junto con el momento aplicado M , produciría la fisuración en la fibra más traccionada.

$$\frac{x_v}{d} = \frac{x_{v0}}{d} + \left(\frac{x_{v,cr} - x_{v0}}{d} \right) \frac{P}{P_{cr}} \quad (12)$$

$$\frac{P}{P_{cr}} = - \frac{P \left(\frac{1}{A} - \frac{ev'}{I} \right)}{\frac{Mv'}{I} - f_{ct}} = - \frac{\sigma_{vp,i}}{\sigma_{vm,i} + f_{ctv}}$$

donde $\sigma_{vp,i} < 0$ es la tensión producida en la viga por el pretensado P y su excentricidad e , en su fibra inferior (la más traccionada por el momento M) y $\sigma_{vm,i} > 0$ es la tensión en dicha fibra debida al momento M . La figura 4, muestra las curvas obtenidas mediante las ecuaciones (11) y (12) que coinciden sensiblemente con las obtenidas mediante un análisis no lineal [6].

3.2 Cálculo de la fibra neutra en sección fisurada compuesta por viga y losa

Para obtener x_{cr} en la sección compuesta fisurada se sigue un procedimiento similar al utilizado en sección simple, pero teniendo en cuenta los efectos del proceso constructivo en el estado de tensiones [7], como se indica en la figura 4, en la que se considera la viga no apeada al ejecutar la losa. En la primera fase, la viga está sometida a las tensiones debidas al pretensado y al momento M_v , producido por el peso propio de la viga y de la losa, ($\sigma_{v,i} = \sigma_{vp,i} + \sigma_{vm,i}$, respectivamente, en la

fibra inferior). En la segunda fase, cuando la losa ya ha endurecido, se aplica un momento externo ΔM debido a cargas muertas y sobrecargas que produce, sobre la sección compuesta, un incremento de tensión en la fibra inferior $\Delta\sigma_{ci}$. El momento de fisuración de la sección

compuesta $M_{c,cr}$ será el valor del momento total $M=M_v+\Delta M$ cuando, en la fibra inferior, la suma de las tensiones en las dos fases iguala a la resistencia a tracción del hormigón de la viga ($\sigma_{vi}+\Delta\sigma_{ci,inf}=f_{ct,v}$).

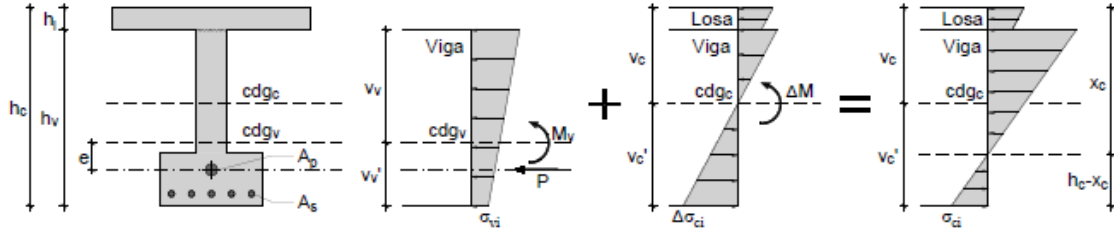


Figura 4. Evolución de tensiones en una sección compuesta construida por fases.

Para obtener la profundidad del eje neutro en la sección compuesta x_c , supuesto que la viga no ha fisurado bajo su peso propio y el de la losa, se utiliza la curvatura total c , que es la suma de las curvaturas de la primera y segunda fase ($c=c_v+\Delta c$), como se muestra en la ecuación (13), donde los subíndices v y c se refieren a la sección de la viga y a la sección compuesta, respectivamente.

$$c = \frac{M_v - Pe}{E_{cv} I_v} + \frac{M - M_v}{E_{cv} I_c} = \frac{\sigma_{ci}}{E_{cv}(h_c - x_{c,cr})} \quad (13)$$

$$x_c = h_c - \frac{\sigma_{ci} I_c}{(M_v - Pe) \frac{I_c}{I_v} + M - M_v}$$

La profundidad de la fibra neutra $x_{c,cr}$, justo antes de fisurar, se obtiene haciendo en la ecuación (13) $M=M_{c,cr}$ y la tensión $\sigma_{ci}=f_{ct,v}$. Con este valor se puede interpolar “x” entre las profundidades correspondientes a $P=0$ y a $P=P_o$, la fuerza ficticia de pretensado que junto al momento M produciría la fisuración en la sección compuesta, adecuando la ecuación (12) al caso de sección compuesta como sigue:

$$\frac{x_c}{d} = \frac{x_{c0}}{d} + \left(\frac{x_{c,cr} - x_{c0}}{d} \right) \frac{P}{P_{cr}}$$

$$= - \frac{P \left(\frac{1}{A_v} + \frac{e_v v'_v}{I_v} \right)}{f_{ct,v} + \frac{M_v v'_v}{I_v} + \frac{(M - M_v) v'_c}{I_c}} \quad (14)$$

Donde I_c y v'_c son, la inercia y la distancia del cdg a la fibra más traccionada de la viga compuesta y x_{c0} es la profundidad de la fibra neutra en la sección compuesta fisurada para $P=0$. Si el eje neutro cae en la losa, x_c se calcula mediante la expresión (8.b) considerando una sección rectangular de ancho el de la losa, b_L , y resistencia la del hormigón de la losa, f_{ct} . Si x_c cae en la viga, se puede utilizar la ecuación (8c) con un ancho de alma $b'_v=n \cdot b_v$, $n=E_{cl}/E_{cv}$ donde l se refiere a la losa y v a la viga.

La figura 3 muestra el resultado del cálculo de x en función de M/M_{cr} , para una sección compuesta por la misma viga de sección rectangular antes estudiada y una losa superior de $b_L=1.0$ m, $h_L=0.2$ m y hormigón de $f_c=50$ MPa de resistencia.

3.3 Posición de la sección crítica de la viga y del punto de inicio de la rotura

Las tensiones previas en la viga afectan al momento de fisuración y, por tanto, al punto de inicio de la fisura crítica y a su inclinación. Además, en secciones de piezas compuestas, que pueden asimilarse a secciones en T, la inclinación de la fisura crítica disminuye cuando se propaga en las alas o en la losa, debido a su mayor anchura ($b_f > b_w$), como se observa en la figura 2, lo cual afecta a su proyección horizontal, a V_{cu} y a V_{sw} . Ello se tiene en cuenta a través del coeficiente K_b , de la fórmula (10) de la tabla 1, e la cual se modifica sustituyendo b_w por b'_w .

En cuanto a la posición del punto crítico en la zona comprimida de la sección crítica, si la fibra neutra de la sección compuesta cae en la losa, se considera que éste está situado a una distancia del eje neutro $\lambda = 0.425x$, siendo válidas las expresiones de la Tabla 1 para el cálculo del cortante resistido por una sección simple, utilizando la resistencia del hormigón de la losa. Si la fibra neutra cae en el alma, hay que

identificar si el punto crítico, donde se inicia la rotura, está en la losa o en la viga. Para ello hay que obtener la distribución de tensiones normales, tangenciales y principales en la viga y en la losa, con el salto correspondiente a la altura de la junta ($z = x - h_f$) y obtener el daño en cada punto, dado por la ecuación (15).

$$D(z) = \frac{\sigma_1(z)}{f_{ct}} + 0.8 \frac{\sigma_2(z)}{f_{cc}} \leq 1 \quad (15)$$

La hipótesis sobre la distribución parabólica de tensiones tangenciales en el caso de piezas simples, se generaliza al caso de secciones compuestas, considerando una distribución parabólica de segundo orden del flujo de tensiones normalizado, $\Phi(z) = \tau(z) \cdot b(z) \cdot n_c(z)$, siendo $n_c(z) = E_d(z)/E_w(z)$, E_d y E_w los módulos de deformación de la losa y de la viga, respectivamente, ver figura 6. Las condiciones de contorno impuestas son que $\Phi(z) = 0$ para $z = 0$ y $z = x$, y que el valor de la tensión tangencial en el punto crítico ($z = \text{punto de daño máximo}$) se deduce de la ecuación (15) suponiendo que el daño es $D = 1$.

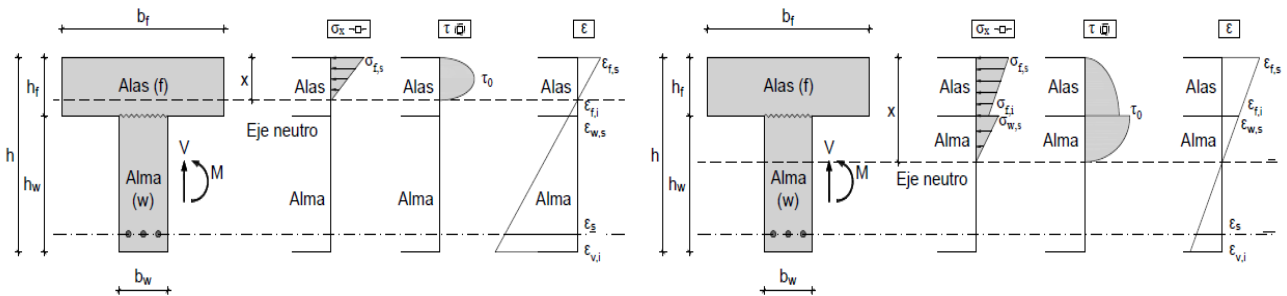


Figura 5. Distribución de tensiones en ELU de cortante en sección compuesta cuando $x \leq h_f$ y cuando $x > h_f$.

Tras un estudio paramétrico [8] realizado para identificar la posición del punto crítico en secciones en T con diferentes hormigones y anchos de viga y losa se concluyó que el parámetro $\lambda = z_{crit} = 0.425x$ es muy similar para secciones compuestas por varios hormigones y, por tanto se considera válido. debería comprobar el fallo debido al cortante vertical en esta posición y también en la junta, considerando las propiedades del material menos resistente.

La contribución de la zona comprimida (V_w) se obtiene integrando las tensiones tangenciales en los dos dominios con geometrías y resistencias diferentes teniendo en cuenta el ancho eficaz a cortante en secciones en T. A este valor se suma las contribuciones del cortante resistido por el alma fisurada V_w y el efecto pasador en la armadura longitudinal V_l supuestos constantes (valores adimensionales $v_w = 0.035$ y $v_l = 0.025$, respectivamente), como hace el CCCM.

3.4 Resumen de la formulación del cortante último en piezas compuestas

En base a las consideraciones anteriores, se pueden obtener las contribuciones del hormigón V_c y de la armadura transversal a la resistencia V_s a cortante, en secciones compuestas.

V_{cu} viene dado por la ecuación (4) de la Tabla 1, donde la profundidad de la fibra neutra x se obtiene de acuerdo con el apartado 3.2, el ancho eficaz a cortante $b_{v,eff}$ es igual al caso de sección simple pero, en el caso de que $x > h_f$, sustituyendo b_w por $n_c b_w$, para tener en cuenta de hormigones distintos en la losa y la viga

La contribución de la armadura viene dada por la ecuación (5) pero considerando que la inclinación global de la fisura θ_c se obtiene mediante un factor $K_{c\theta}$ que incorpora el cociente entre módulos, sustituyendo b_w por $n_c b_w$.

En el caso de piezas con viga pretensada o con axil de compresión como la profundidad de la fibra neutra “ x ” depende del momento y éste depende del cortante (o reacción en el apoyo), la ecuación (16) requiere resolverse por iteraciones, aunque también puede encontrarse una solución analítica directa, si se expresa M en

función de V . Alternativamente puede utilizarse una solución conservadora suponiendo $M = M_{cr}$.

El cortante último será el menor del así calculado y del asociado a produce la rotura por rasante en la junta entre hormigones.

4. Verificación experimental

Se ha creado una base de datos de 52 ensayos a cortante de piezas compuestas por vigas armadas o pretensadas y losa superior de hormigón armado, con armadura transversal, recopiladas en [9] y [10], pues son los casos más usuales cuando se trata de resistir fuertes cargas y generar roturas por cortante.

La tabla 2 y el gráfico de la Figura 6 muestran la comparación entre los resultados experimentales (33 vigas, referencias [11], [12] y [13]) y las predicciones del modelo. Se observa una gran concordancia entre los resultados experimentales y las predicciones, (media 1.03, coeficiente de variación 15.7%), siendo especialmente buena en el caso de secciones en T, que es el caso más usual (media 0.995, coeficiente de variación 13.2%).

V_{exp} / V_{teo}	Con Armadura transversal - CCCM		
	Rect.	Sec.T	Todas
Número	23	10	33
Media	1.040	0.995	1.026
Stand Dev	0.174	0.131	0.162
COV	16.7%	13.2%	15.7%
Max	1.370	1.217	1.370
Min	0.731	0.804	0.731
Perc. 5%	0.772	0.824	0.788
Perc. 95%	1.312	1.182	1.273

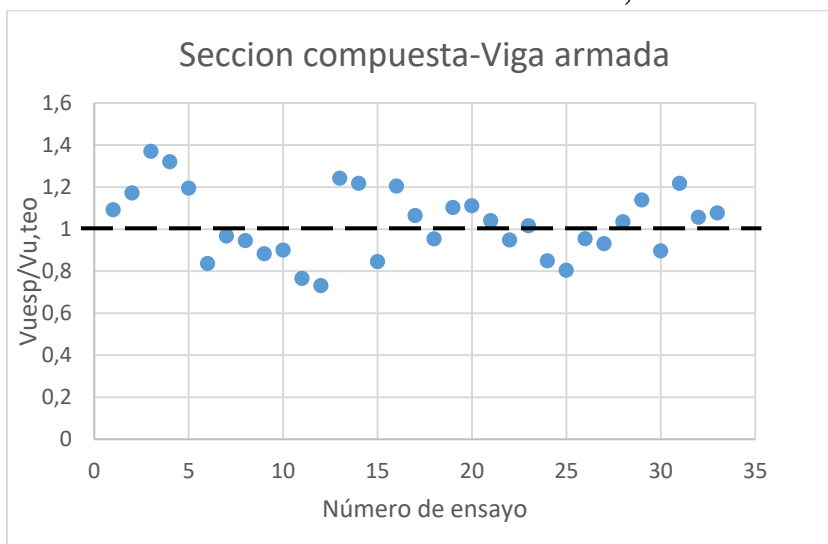


Figura 6. Relación $V_{u,exp}/V_{u,teo}$ para piezas con sección compuesta viga armada.

En cuanto a piezas con vigas pretensadas, se incluyen los datos procedentes de dos campañas experimentales llevadas a cabo en las referencias [12] y [13], en donde se estudia el

comportamiento a cortante de secciones de hormigón compuestas por una viga pretensada y una losa superior, construidas evolutivamente. Solo se han considerado las piezas que rompen

por cortante (19 vigas), excluyendo las roturas por rasante en la junta. La tabla y el gráfico de la figura 7 muestran la comparación de los

$V_{u,exp}/V_{u,teo}$	Sección compuesta
Numero	19.00
Media	1.042
Stand Dev	0.192
CoV	18.5%
Max.	1.399
Min.	0.704
Percentil. 5%	0.734
Percentil 95%	1.281

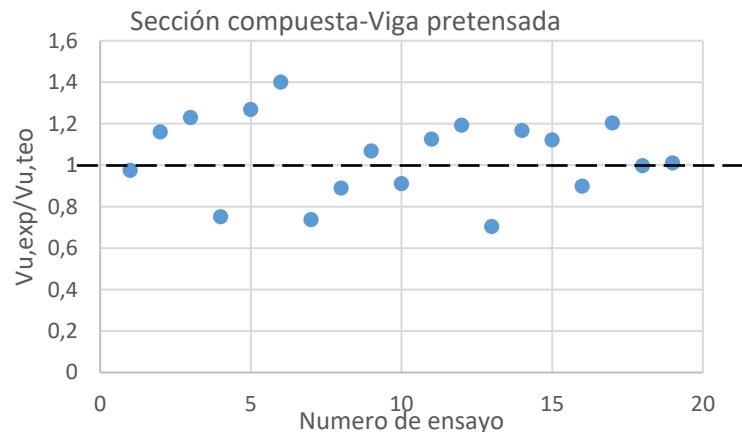


Figura 7. Relación $V_{u,exp}/V_{u,teo}$ para piezas con sección compuesta viga pretensada.

Se observa una buena aproximación a la media (1.04) entre resultados de ensayos y predicciones, y un coeficiente de variación de la razón $V_{u,exp}/V_{u,teo}$ es de 18.5%, un poco alto más alto que en las secciones con viga armada.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha mostrado la extensión del modelo de cortante CCCM a piezas compuestas por varios hormigones, así como la comparación de sus predicciones con los resultados de 55 ensayos a cortante realizados sobre piezas con armadura transversal pasante en la junta, disponibles en la bibliografía Las conclusiones más importantes obtenidas son:

- La rotura a cortante de una viga compuesta viene muy influida por la existencia de dos hormigones diferentes y de tensiones previas en la viga, debidas al pretensado o al proceso constructivo. Estos aspectos afectan de forma significativa a la profundidad de la fibra neutra de la sección, al momento de fisuración y a la posición e inclinación de la fisura crítica y, por tanto, al cortante resistido.

- En piezas compuestas por viga y losa de hormigón armado, los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo propuesto son

resultados experimentales y las predicciones del modelo.

muy próximos a los experimentales, sobre todo en los casos de sección compuesta en T. El valor medio y el coeficiente de variación del cociente $V_{u,exp}/V_{u,teo}$ son 1.03 y 15.7%, respectivamente.

- En piezas con viga pretensada y losa de hormigón armado, los resultados del modelo propuesto son también próximos a los experimentales, siendo la media y el coeficiente de variación de la razón $V_{u,exp}/V_{u,teo}$ 1.04 y 18.5%. Si bien la media es muy parecida y aceptable, el coeficiente de variación es más alto que en el caso de vigas armadas, fruto de las incertidumbres existentes en el valor de las tensiones debidas al pretensado en el momento del ensayo.

- De lo anterior se deduce que si bien el modelo desarrollado capta con razonable aproximación la resistencia a cortante vertical, las incertidumbres asociadas a la rugosidad y desarrollo de la fisura crítica en la junta y al valor de la fuerza de pretensado en una sección compuesta, muestran la necesidad de profundizar más en este campo de investigación.

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en el proyecto de investigación "Evaluación de la capacidad resistente frente a esfuerzos tangentes de

estructuras de hormigón mediante modelos mecánicos para la extensión de su vida útil". BIA2015-64672-C4-1-R, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España. Parte del trabajo se desarrolló en el "Department of Engineering Structures, TU Delft" (Países Bajos), durante la estancia de movilidad del primer autor financiada por la ayuda PRX21/00097 del Ministerio de Universidades.

Referencias

- [1] CEN. EN 1992 Eurocode 2: Design of concrete structures- Part 1-1: General rules and rules for buildings. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2005.
- [2] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete ACI 318-19. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020.
- [3] A. Mari, A. Cladera, J.M. Bairán, J., E. Oller, E., C. Ribas, Un modelo unificado de resistencia a flexión y cortante de vigas esbeltas de hormigón armado bajo caras puntuales y repartidas, *Hormigón y acero*. 65 (274) (2014) 247-265.
- [4] A. Cladera Marí, J.M. Bairán, C. Ribas, E. Oller, N. Duarte, The compression chord capacity model for the shear design and assessment of reinforced and prestressed concrete beams, *Structural Concrete*. 17 (2016) 1017–1032.
- [5] A. Cladera, A. Marí, C. Ribas, J. Bairán, E. Oller, Predicting the shear–flexural strength of slender reinforced concrete T and I shaped beams. *Engineering Structures* 101 (2015) 386-398.
- [6] A. Marí, Numerical Simulation of the Segmental Construction of Three-Dimensional Concrete Frames, *Eng. Structures*. 22 (2000) 585-596.
- [7] A L. J. Ortiz Contreras, Resistencia a cortante de piezas compuestas de hormigón pretensado construidas por fases. Tesis de Master. Dept. Ing. Civil y Ambiental, UPC, 2024.
- [8] L. Gómez Navarro, Resistencia a cortante de piezas compuestas de hormigón armado. Tesis de Master. Dept. Ing. Civil y Ambiental, UPC, 2023.
- [9] C.G.Kim, H.G. Park, G.H. Hong, S.M. Kang, and H. Lee, Shear Strength of Concrete Composite Beams with Shear Reinforcements, *ACI Struct J*. 114 (2017) 827-37.
- [10] L. Rueda-García, J. L. Bonet Senach, P. F. Miguel Sosa, M. Á. Fernández Prada. Analysis of the shear strength mechanism of slender precast concrete beams with cast-in-place slab and web reinforcement, *Engineering Structures*. 246 (2021) 113043.
- [11] L. Rueda-García, J.L. Bonet, P. Miguel, M.A. Fernandez, Experimental study on the shear strength of reinforced concrete composite T-shaped beams with web reinforcement, *Engineering Structures* 255 (2022) 113923.
- [12] C.G.Kim, H.G Park, G.H Hong, H. Lee, y JI.Suh, Shear Strength of RC-Composite Beams with Prestressed Concrete and Non-Prestressed Concrete. *ACI Struct. Journal* 115 (4) (2018).
- [13] V. Avendaño V., Alejandro R., y Oguzhan Bayrak. Shear Strength and Behavior of Prestressed Concrete Beams, Reporte Técnico IAC-88-5-DD1A003-3. The University of Texas, at Austin, Texas Department of Transportation, 2008.