

RESISTENCIA AL CORTE EN COLUMNAS DE SECCIÓN CIRCULAR HUECA ELABORADAS CON HORMIGÓN DE ULTRA ALTA PERFORMANCE

Lucía G. Alvarez Roldán^{a,b}, Carina R. Caballero^a

^aUniversidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina,
lucia_alvarezroldan@yahoo.com.ar, carina.cab@gmail.com

^bBecaria en el período 2010-2011 Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (Instituto de Materiales de Construcción, Estructuras de Hormigón y Protección contra Incendios), perteneciente a la Universidad Técnica de Braunschweig, Alemania.

Keywords: UHPC, Resistencia al corte, Columnas de hormigón armado, sección circular hueca, Crack Sliding Model, Método de Elementos Finitos.

Abstract. El presente trabajo se ha dedicado al estudio de la resistencia al corte de columnas de sección circular hueca elaboradas con Hormigón de Ultra Alta Performance Reforzado con Fibras de Acero (UHPC). El interés de este estudio radica en la ausencia de un método racional para determinar la capacidad al cortante para elementos con estas secciones, considerando su extendida aplicación en sub-estructuras de puentes y su potencial empleo para torres de turbinas de viento. Se procedió a adaptar una expresión teórica ya desarrollada basada en el teorema del límite superior de la Teoría de la Plasticidad, validada con base experimental para distintas secciones y tipos de hormigones, a fin de estimar la resistencia al cortante de elementos de Hormigón Armado constituidos de UHPC. Posteriormente, utilizando el software *ABAQUS*, se procedió a modelar una viga de sección circular hueca elaborada con hormigón convencional con resultados experimentales conocidos, a fin de ajustar el modelo a nivel material y geométrico. Se obtuvo una buena concordancia entre la respuesta experimental y las predicciones realizadas. Finalmente, se comparó la resistencia al corte de un miembro de sección circular hueca elaborado con UHPC, estimada mediante el método basado en la Teoría de la Plasticidad, con la resistencia obtenida a partir de la modelación con elementos finitos.

1 INTRODUCCIÓN

El Hormigón de Ultra Alta Performance Reforzado con Fibras de Acero, conocido por sus siglas en inglés como UHPFRC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete) o simplemente UHPC (Ultra High Performance Concrete), constituye un hormigón especial con una resistencia a la compresión entre 150 y 250 MPa, que contiene fibras de acero dispersas en su matriz, siendo esto último fundamental para otorgar ductilidad y resistencia a la tracción al material compuesto. El término “Ultra Alta Performance” implica además un importante incremento en la durabilidad del material respecto de otros hormigones.

Las propiedades especiales del UHPC abren paso a nuevas o mejoradas aplicaciones del hormigón en todo tipo de estructuras. En contrapartida, el UHPC posee un comportamiento tan distinto de otros hormigones que constituye prácticamente un nuevo material en sí mismo, requiriendo reformular las recomendaciones de diseño para generalizar su aplicación.

El interés en el estudio de los elementos de sección circular hueca, radica en su eficiencia estructural para soportar esfuerzos de compresión y en la ventaja de poseer idénticas características resistentes en todas las direcciones de la sección transversal. Resulta notable la relación resistencia-a-flexo-compresión/peso de estos elementos, permitiendo reducciones en el área de la sección de hasta un 70% respecto de secciones macizas de resistencia equivalente. Adicionalmente, en estructuras donde el peso de los elementos verticales es relevante, este tipo de sección puede permitir una reducción importante de la masa total de la estructura, mejorando su comportamiento frente a acciones sísmicas.

Los elementos de hormigón armado de sección anular son ampliamente utilizados en subestructuras de puentes como pilares y pilas, y en plataformas offshore, donde son sometidos a importantes esfuerzos de compresión y a momentos flectores en más de una dirección. Con la aplicación de UHPC como material constitutivo, surge una nueva aplicación de estos elementos para torres de turbinas de viento, compitiendo con el acero convencional como material de construcción.

En contraste con la amplia variedad de aplicaciones para miembros de hormigón de sección circular hueca, los códigos de diseño actuales no hacen casi ninguna mención de este tipo de elementos, en especial respecto de su resistencia al corte. Algunos reglamentos, como el ACI 318 o el AASHTO LRFD, sugieren que la resistencia a cortante de los miembros de sección circular maciza sea estimada a partir de una sección rectangular equivalente, con lo cual se desprecian las particularidades en el comportamiento de dichas secciones, sin mencionar que el efecto de la carga axial se tiene en cuenta a través de relaciones empíricas.

Cabe destacar que actualmente existen recomendaciones técnicas (desarrolladas en Francia y en Japón) que tratan con el diseño a cortante en elementos elaborados con UHPC. Sin embargo, las expresiones de diseño han sido formuladas únicamente para vigas de sección rectangular maciza.

Los trabajos de investigación acerca del comportamiento a cortante en miembros de sección transversal circular hueca son muy limitados. Sólo a partir del trabajo de Jensen y Hoang (2010), se ha desarrollado un método completamente racional, basado en la Teoría de la Plasticidad, para estimar la resistencia al corte en miembros de hormigón armado de sección anular, formulada para elementos elaborados con hormigón convencional.

Los modelos de Teoría de la Plasticidad, originalmente desarrollados por Nielsen (2011), consisten en formulaciones racionales basadas en la Teoría de la Plasticidad y en los teoremas de Análisis Límite. Estos modelos poseen la ventaja de ser adaptables a distintas formas de sección transversal y a diferentes tipos de hormigón, considerando -de manera racional- el efecto de las fuerzas axiales en la resistencia a cortante, en lugar de incorporarla empíricamente como se realiza con otros métodos.

En el presente trabajo se realiza la adaptación un método formulado a partir del Crack Sliding Model (CSM) que deriva del Teorema de Límite Superior de la Teoría de la Plasticidad, con el objeto de predecir la carga última por cortante en una viga de Hormigón Armado de sección circular hueca, constituida por UHPC. La misma viga es modelada mediante elementos finitos con el software ABAQUS, a fin de observar en qué medida se corresponden los resultados numéricos con las estimaciones teóricas. Adicionalmente, la modelación con MEF permite observar con más detalle el comportamiento de la viga previo a la falla por cortante.

2 MECANISMO DE FALLA A CORTANTE EN VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO

2.1 Generalidades

Cuando una viga de Hormigón Armado ($H^{\circ}A^{\circ}$) está sometida a esfuerzos de flexión y corte, es posible que estos últimos resulten críticos para la resistencia de la misma. Si esto ocurre, al incrementarse los esfuerzos se generarán fisuras diagonales y en consecuencia de éstas se producirá la falla o colapso de manera abrupta del elemento, es decir, una falla del tipo frágil.

La resistencia al corte y el mecanismo de falla por cortante en una viga de $H^{\circ}A^{\circ}$ depende de factores como la resistencia a la tracción del hormigón, la cuantía de armadura longitudinal y transversal, la relación luz de corte-altura efectiva de la viga, la altura de la viga (efecto geométrico) y de las fuerzas axiales aplicadas al elemento estructural.

El mecanismo de resistencia a cortante en vigas de $H^{\circ}A^{\circ}$ resulta muy complejo y ha generado el estudio de distintas metodologías para su estimación. Actualmente, los métodos basados en la analogía del reticulado son los más difundidos, aunque su formulación se limita a secciones rectangulares.

2.2 Elementos de sección circular y anular

En el caso de vigas o columnas $H^{\circ}A^{\circ}$ de sección circular hueca, el estudio experimental de la falla por corte es bastante limitado. Adicionalmente, los métodos formulados para estimar la resistencia al corte en secciones rectangulares son de cuestionable aplicación, debido a las siguientes particularidades:

- Dirección de los esfuerzos de corte en la sección trasnversal: en la sección anular los esfuerzos no se orientan paralelamente a la dirección de la carga, sino que -en base a la teoría de la elasticidad- éstos de orientarían con direcciones aproximadamente tangentes al borde de la sección;
- Patrón de fisuración debido al corte: la fisura no está contenida en un plano, sino que forma una elipse en el espacio;
- Contribución de los zunchos y los espirales: contiene particularidades geométricas que contrastan con los estribos rectangulares.

2.3 Elementos de $H^{\circ}A^{\circ}$ elaborados con UHPC

Como puede suponerse, tanto la elevada resistencia a la compresión como la baja ductilidad del UHPC (respecto del hormigón normal) presentan una especial influencia en el comportamiento a cortante en los miembros de este material. Típicamente, a medida que la resistencia a la compresión del hormigón es más elevada, su falla tiende a ser más frágil.

Con respecto a la resistencia a cortante de los miembros hechos de UHPC, los resultados experimentales permiten concluir lo siguiente:

- La cantidad de fibras de acero posee una influencia significativa en la capacidad de soportar cortante; con el incremento del contenido de fibras, la falla se vuelve más dúctil. Este efecto atenúa la elevada fragilidad del UHPC.
- La cantidad y el tipo de fibras no afectan apreciablemente la carga de fisuración, pero sí poseen una influencia significativa en la velocidad de propagación de las grietas y en la carga que produce la falla por cortante.
- La carga última o de falla por corte puede tener un valor de más del doble de la carga de fisuración. La falla ocurre cuando se han formado numerosas fisuras en el alma, con posiciones bien distribuidas.
- La acción de arco parece estar presente para relaciones luz de corte-altura efectiva mayores que para vigas de hormigón convencional, se observa hasta relaciones $a/d \sim 4$.

3 TEORÍA DE LA PLASTICIDAD APLICADA AL DISEÑO A CORTANTE

3.1 General

A fin de aplicar la Teoría de la Plasticidad en el diseño a cortante en miembros de $H^\circ A^\circ$, resulta necesario adoptar algunas suposiciones:

- El hormigón es un material rígido-plástico perfecto, que obedece al criterio de falla de Coulomb modificado, con la ley de flujo asociada.
- La resistencia a la compresión efectiva del hormigón está dada por $v \cdot f_c$; donde v es el factor de efectividad y f_c es la resistencia cilíndrica a la compresión uniaxial estándar.
- El material de las armaduras es rígido y perfectamente plástico, con una tensión de fluencia f_y .
- El refuerzo longitudinal no gobierna la capacidad portante (la falla por flexión no es crítica).
- La columna es reforzada transversalmente con zunchos circulares de diámetro D' .

3.2 Crack Sliding Model (CSM)

El modelo CSM (Crack Sliding Model), desarrollado por Zhang (1997, 1994), consiste en un modelo basado en la aplicación del Teorema del Límite Superior de la Teoría de la Plasticidad, que incluye un criterio de fisuración y un criterio de deslizamiento de las grietas, para determinar la resistencia al cortante en miembros de Hormigón Armado.

Según este modelo, para la falla por corte en hormigón “no fisurado” el factor de efectividad del hormigón v_0 sólo debe tener en cuenta los efectos de la micro-fisuración y del ablandamiento (softening). Pero si la falla por deslizamiento tiene lugar en una grieta existente (existe agrietamiento previo a la carga última), es necesario reducir la resistencia efectiva a la compresión del hormigón mediante el factor de reducción por deslizamiento v_s . Luego, para hormigón normal, el factor de efectividad v está dado por,

$$v = \begin{cases} v_0 = \frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}}\right) \cdot (1 + 26 \cdot \rho_l) & \text{Hormigón no fisurado} \\ v_s \cdot v_0 = 0,5 \cdot \left[\frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}}\right) \cdot (1 + 26 \cdot \rho_l) \right] & \text{Hormigón fisurado} \end{cases} \quad (1)$$

Para estimar si la falla se producirá con hormigón fisurado o no fisurado, se compara la carga última por corte con la carga P_{cr} a la que se produce la fisuración.

En el presente trabajo, se adaptan los coeficientes para miembros de sección anular

elaborados con UHPC. Éstos son calibrados en base a resultados experimentales extraídos del trabajo de Voo, Foster y Gilbert (2003), quedando la siguiente expresión:

$$v_0 \begin{cases} = \frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}}\right) \cdot (1 + 26 \cdot \rho_l) \cdot \left[1 + 1,17 \cdot \left(\frac{a}{h} - 4\right)^2\right] & \text{para } a/h \leq 4 \\ = \frac{0,88}{\sqrt{f_c}} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}}\right) \cdot (1 + 26 \cdot \rho_l) & \text{para } a/h > 4 \end{cases} \quad (2)$$

Para el caso de hormigón fisurado, v_s se adopta como 0,5.

3.3 Aplicación de la Teoría de la Plasticidad al Diseño a Cortante en vigas de H^oA^o - Solución de Límite Superior - CSM

A continuación se describe brevemente la deducción de las ecuaciones del CSM para estimar la resistencia al corte en vigas o columnas de sección circular hueca de hormigón convencional o bien de UHPC, de forma de estimar la resistencia al corte en cada uno de estos casos con fines comparativos.

Se considera una viga simplemente apoyada, con sección transversal circular hueca y estribos circulares, cargada con dos fuerzas simétricas P y una fuerza normal N, como se muestra en la Figura 1.

La viga tiene un grado de refuerzo de corte Ψ constante a lo largo de la misma, definido como:

$$\Psi = \frac{2 \cdot A_{sh} \cdot f_y}{(D - D_0) \cdot s \cdot f_c} \quad (3)$$

Dónde:

- A_{sh} , es el área transversal de los estribos,
- f_y , es la tensión de fluencia de los estribos;
- s , es el espaciamiento de los estribos a lo largo del eje longitudinal;
- f_c , es la resistencia efectiva a compresión del hormigón.
- n es igual a 2 para “estribos simples o de 2 ramas”.

A fin de encontrar una solución de límite superior, se propone el siguiente campo de desplazamientos: la parte central de la viga o Parte I tiene un desplazamiento vertical u mientras que la Parte II se mantiene fija. La línea entre la Parte I y la Parte II representa una línea de fluencia, es decir, una línea de discontinuidad en los desplazamientos.

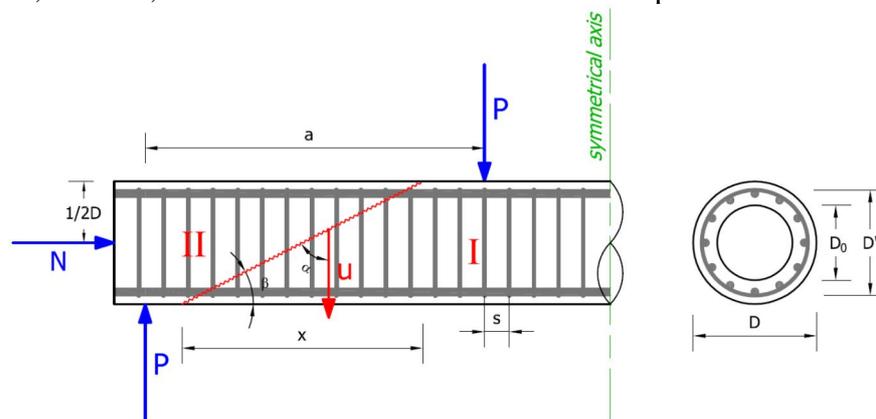


Figura 1: Mecanismo de falla a cortante para una viga de sección circular maciza con armadura transversal.

Los trabajos externo e interno están dados por,

$$W_E = P \cdot u \quad (4)$$

$$W_I = W_{IS} + W_{IC} \quad (5)$$

Donde W_{IS} es la disipación de energía en los estribos y W_{IC} es la disipación en el hormigón.

El trabajo interno disipado por los zunchos que fluyen puede ser expresado como,

$$W_{IS} = \frac{\pi(2 \cdot A_{sh} \cdot f_y) \cdot D' \cdot \cot\beta}{4 \cdot s} \cdot u \cdot C \quad (6)$$

Donde C es un factor que tiene en cuenta el efecto del espaciamiento finito entre estribos.

Por otro lado, al aplicar la fórmula de la disipación por unidad de área de la superficie de fluencia (deslizamiento) para un material de Mohr Coulomb modificado sin resistencia a la tracción, el trabajo interno del hormigón es,

$$W_{IC} = \frac{1}{2} \cdot f_{cp} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{x}{D}\right)^2} - \frac{x}{D} \right] \cdot A_c \cdot u \quad (7)$$

Al aplicar la ecuación del trabajo $W_E = W_I$, adicionando los factores de efectividad y reorganizando, puede deducirse la siguiente expresión:

Para hormigón fisurado (Modelo de deslizamiento):

$$\tau_u = \frac{P_u}{A_c} = \frac{1}{2} \cdot v_s \cdot v_0 \cdot f_c \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{x}{D}\right)^2} - \frac{x}{D} \right] + \left(\frac{1 - (D/D_0)}{1 - (D_0/D)^2} \right) \cdot \left[\frac{D'}{D} \cdot \psi \cdot f_c \cdot \left(\frac{x}{D}\right) \cdot C + \alpha \cdot v_f \cdot \left(\frac{l_f}{d_f}\right) \cdot \frac{x}{D} \cdot f_{tf} \right] \quad (8)$$

Para hormigón no fisurado (Modelo plástico clásico):

$$\tau_u = \frac{P_u}{A_c} = \frac{1}{2} \cdot v_0 \cdot f_c \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{x}{D}\right)^2} - \frac{x}{D} \right] + \left(\frac{1 - (D/D_0)}{1 - (D_0/D)^2} \right) \cdot \left[\frac{D'}{D} \cdot \psi \cdot f_c \cdot \left(\frac{x}{D}\right) \cdot C + \alpha \cdot v_f \cdot \left(\frac{l_f}{d_f}\right) \cdot \frac{x}{D} \cdot f_{tf} \right] \quad (9)$$

Donde α es un factor calibrado de acuerdo con los resultados de ensayos en miembros hechos de UHPC. Debido a que ésta es una solución de límite superior, las ecuaciones anteriores deben ser minimizadas con respecto a x ($3/4 \cdot h \leq x \leq a$) para encontrar la resistencia al corte de la viga.

De acuerdo con la Teoría de la Plasticidad, una grieta puede desarrollarse cuando se alcanza la tensión de tracción efectiva f_t^* a lo largo de la trayectoria de la fisura, lo cual corresponde con la carga de fisuración (P_{cr}).

$$P_{cr} = \frac{f_t^* \cdot A_c \cdot \left[1 + \left(x/D\right)^2 \right] + N}{2 \cdot a/D} \quad (10)$$

Se determina la resistencia efectiva a la tracción del hormigón f_t^* por medio de las ecuaciones siguientes:

Para hormigón normal,

$$f_t^* \cong 0,6 \cdot f_t$$

$$f_t = 1,2 \cdot \left(\frac{f_c}{10}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{h}{0,1}\right)^{-0,3}$$

Para el UHPC,

$$f_t^* = v_{tf} \cdot f_{tf}$$

Donde el factor de efectividad para la resistencia a la tracción (Spinella, Colajanni y Recupero 2010) puede adoptarse como:

$$v_{tf} = \frac{\sigma_{cf}(w_m)}{f_{tf}} = \left(1 - \frac{w_m}{w_{ts}}\right) + \left[\frac{\tan^{-1} \cdot (w_m/\alpha)}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot w_m}{l_f}\right)^2 \cdot F_\tau\right] \quad (11)$$

Donde,

- w_m es la apertura admisible de las fisuras en corte.
- σ_{cf} es la tensión de tracción efectiva.
- f_{tf} , es la resistencia a la tracción directa del hormigón reforzado con fibras.
- $w_{ts} = 2 \cdot G_c/f_t$, es el ancho de fisura máximo de la matriz
- $\alpha = d_f/3,5$ es un parámetro del material, siendo d_f el diámetro de las fibras.
- l_f es el largo de las fibras.
- $F_\tau = \beta_\tau \cdot V_f \cdot (l_f/d_f)$
- V_f es el contenido volumétrico de fibras, en proporción.

4 MODELACIÓN NUMÉRICA

4.1 Modelado de Hormigón Armado con MEF

Para el modelado de Hormigón Armado con el Método de Elementos Finitos (MEF), resulta necesario comprender los efectos de la interacción, bajo tensiones de tracción, entre el hormigón y la armadura de acero, estos son: “rigidización por tracción” y “ablandamiento por deformación”.

De acuerdo a lo expuesto en el informe del Comité ACI 224, la modelación de la fisuración del hormigón puede realizarse en base a dos enfoques básicos: el modelo de las fisuras discretas y el modelo de las fisuras distribuidas.

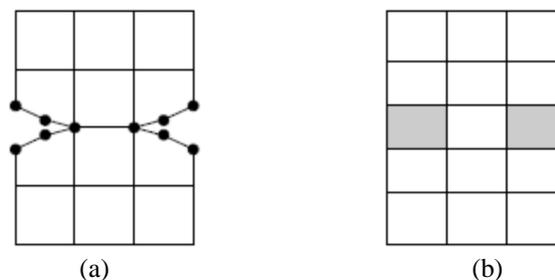


Figura 1: (a) Modelo de fisuras discretas. (b) Modelo de fisuras distribuidas.

En el modelo de las fisuras discretas, las fisuras individuales se representan usando puntos nodales independientes para los elementos de hormigón ubicados en las fisuras, lo cual permite separar elementos en las fisuras (Figura 2.a). Los efectos de la degradación de la adherencia sobre la rigidización por tracción, se pueden modelar mediante la utilización de elementos de unión lineales o no lineales que conecten el hormigón y los elementos de acero.

En el modelo de las fisuras distribuidas, la rigidización por tracción se puede simular de dos maneras: reteniendo un módulo de elasticidad decreciente para el hormigón y no modificando el módulo de elasticidad del acero; o bien primero aumentando y luego disminuyendo gradualmente el módulo de elasticidad del acero y fijando el módulo del hormigón igual a cero a medida que progresa la fisuración.

Los modelos para hormigón proporcionados en el software ABAQUS Student Edition 6.9 son modelos de fisuras distribuidas, es decir que no detectan macro-fisuras individuales, como

se detallará más adelante.

4.2 Modelos constitutivos del Hormigón disponibles en ABAQUS

En ABAQUS Student Edition 6.9 se ofrecen tres modelos constitutivos para el hormigón. Estos modelos asumen que los principales mecanismos de falla son el agrietamiento por tracción y el aplastamiento por compresión. A continuación se explican brevemente:

1. Concrete Smearred Cracking: Se utiliza para aplicaciones donde el hormigón está sometido a deformaciones principalmente monotónicas y en las cuales el material exhibe agrietamiento bajo tracción o aplastamiento bajo compresión.

2. Brittle cracking: Está diseñado para aplicaciones donde el comportamiento del hormigón está dominado por la falla a tracción, siendo poco relevante la rotura a compresión. Asume el comportamiento elástico del material bajo compresión.

3. Concrete Damaged Plasticity: Está basado en la suposición de daño escalar isotrópico y se haya orientado a aplicaciones en las cuales el hormigón está sometido a todo tipo condiciones de carga, incluyendo cargas dinámicas y cíclicas. El modelo considera la degradación de la rigidez elástica causada por la deformación plástica tanto en tracción como en compresión. Frente a cargas cíclicas, permite representar el efecto de recuperación de rigidez por cerramiento de las fisuras.

En el presente trabajo se adoptarán los modelos de Concrete Smearred Cracking (CSC) y Concrete Damaged Plasticity (CDP), disponibles en el módulo ABAQUS/CAE.

4.3 Modelos constitutivos para el UHPC

Debido a que las propiedades mecánicas del UHPC difieren significativamente respecto de los hormigones convencionales, los parámetros de su modelo constitutivo deben ser cuidadosamente calibrados, en base a un conocimiento profundo del comportamiento del material e, idealmente, utilizando datos experimentales, obtenidos mediante -al menos- los ensayos de compresión simple y tracción, directa o indirecta.

Para ajustar los modelos constitutivos del UHPC, se utilizaron los resultados experimentales extraídos del trabajo llevado a cabo por Müller, Teutsch y Empelmann (2011) en la Universidad Técnica de Braunschweig.

Los parámetros restantes necesarios para la modelación del UHPC en ABAQUS se ajustaron en base a la publicación técnica de Chen y Graybeal (2010).

En este punto, cabe mencionar que las fibras de acero del UHPC no fueron simuladas de manera explícita; es decir, sólo se tuvo en cuenta el efecto que su adición produce sobre las propiedades del hormigón, considerando el material como un todo homogéneo e isotrópico y, consecuentemente, no teniendo en consideración los efectos de orientación de las fibras (efecto que en la realidad ocurre siempre, y está fuertemente afectado por la dirección de colado del hormigón, las dimensiones del miembro y el largo de las fibras) ni el efecto de adherencia/arrancamiento de las fibras. Estas limitaciones se aceptaron en beneficio de una importante simplificación del problema.

A modo de comparación y dado que se modeló una viga de hormigón armado de sección anular constituida de hormigón convencional con resultados experimentales conocidos para validar el modelo, en la siguiente tabla se incluyen los parámetros del UHPC y de un hormigón de resistencia normal sin fibras (denominado "HN"), con una resistencia a la compresión de aproximadamente 32 MPa.

La curva tensión-deformación bajo compresión así como los parámetros restantes son estimados en base a relaciones teóricas extraídas del trabajo de Wahalathantri, Thambiratnam, Chan y Fawzia (2011).

		HN	UHPC	
Densidad (kg/cm ³)		0,0024	0,002565	
Elasticidad del Hormigón				
E (kg/cm ²)		235.000	537.149	
u		0,2	0,18	
Hormigón en compresión				
Relación tensión-deformación	Tensión de Compresión (kg/cm ²)	Deformación Inelástica	Tensión de compresión (kg/cm ²)	Deformación Inelástica
	125	0,0000	1250,3	0,00000
	321	0,0012	1570,8	0,00038
	302	0,0022	930,8	0,00296
	187	0,0062	530,4	0,00726
	114	0,0109	260,7	0,01601
	107	0,0116	-	-
Rigidización por tracción del Hormigón				
Relación tensión desplazamiento post-falla	Tensión de Tracción (kg/cm ²)	Desplazamiento de la fisura (cm)	Tensión de Tracción (kg/cm ²)	Desplazamiento de la fisura (cm)
	23,6	0	-	-
	10	0,0035	-	-
	6	0,005	-	-
	0	0,015	-	-
Criterio de energía de fractura	Desplazamiento máximo (cm)		Desplazamiento máximo (cm)	
	0,005		>0,008	
	Tensión de tracción (kg/cm ²)	Energía de Fractura (kg/cm)	Tensión de tracción (kg/cm ²)	Energía de Fractura (kg/cm)
	23,6	0,04	96	1,735
	Tensión de tracción (kg/cm ²)	Desplazamiento de fisura (cm)		
	23,6	0		
	10	0,005		
0	0,015			
Parámetros del Modelo CSC				
Radios de Falla	Radio 1	1,16	1,16	
	Radio 2	0,074	0,061	
	Radio 3	1,28	1,28	
	Radio 4	1/3	1/3	
Retención del corte	Rho-close	1	1	
	Eps-máx	0,1	0,1	
Parámetros del modelo CDP				
Ángulo de dilatación		15°	15°	

Excentricidad	0,1	0,1
f_{b0}/f_{c0}	1,16	1,16
K	2/3	2/3
Parámetro viscosidad	0	0,00

Tabla 1: Parámetros constitutivos para la modelación de Hormigón Normal (HN) y UHPC en ABAQUS.

4.4 Generalidades del modelado de vigas de H°A° en ABAQUS

Para modelar la viga de hormigón se adoptaron elementos sólidos tridimensionales hexaédricos o “HEX” denominados C3D20R (ladrillo cuadrático de 20 nodos, con integración reducida). La armadura de acero longitudinal se modeló con elementos tipo barra o “truss”, cuya denominación es T3D2 (barra lineal 3-D de 2 nodos).

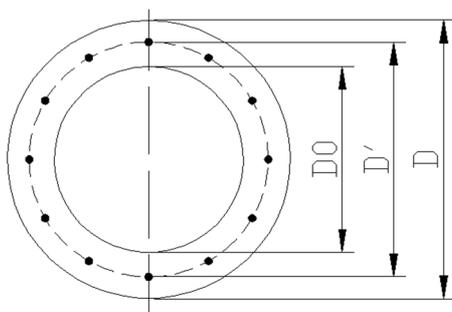
Para considerar en el modelo la interacción entre elementos de hormigón y de acero, las barras fueron definidas como elementos embebidos dentro de la masa de hormigón. Esto implica que los nodos del elemento barra están restringidos cinemáticamente respecto de los nodos del elemento sólido dentro del que se hayan ubicados. Más precisamente, el desplazamiento de un nodo de un elemento barra se obtiene a partir del valor promedio de los desplazamientos de los nodos circundantes del elemento sólido donde dicho elemento barra se haya embebido.

En cuanto a los materiales, para simular el comportamiento del hormigón se adoptó el modelo CDP, por haber presentado un comportamiento más cercano a lo observado en resultados experimentales. Las características del hormigón se extraen de la Tabla 1.

Se optó por el análisis estático tipo STATIC-RIKS para la aplicación de la carga. Este método trabaja mediante incrementos de carga, que se detienen con un criterio de parada. Como criterio de parada se adoptó el desplazamiento máximo en el nodo ubicado en la parte inferior central de la sección correspondiente a la mitad de la luz del miembro (donde se supone que se producirá la máxima deflexión).

4.5 Viga de H°A° de sección anular constituida de hormigón normal

La viga a ser modelada es extraída del trabajo presentado por Turmo, Ramos, y Aparicio (2009), donde se ensayan una serie de vigas de sección circular hueca que fallan por cortante. Las características geométricas de la viga de sección anular se resumen en la Tabla 2. Las condiciones de vínculo y de carga, así como la carga última de la viga, son expuestas en la Figura 2 y la Tabla 2. La viga en estudio es simplemente apoyada, con una carga aproximadamente puntual aplicada en el centro de la luz.



D (cm)	60
D' (cm)	52,4
D0 (cm)	40
Largo total (cm)	300
Luz entre apoyos (cm)	280
Armadura longitudinal	12 Ø20
Estribos	Ø6 c/30cm
f'_{ck} H° (MPa)	32
Tipo Acero	ADN 420

Tabla 2: Características de la viga anular de H°A°.

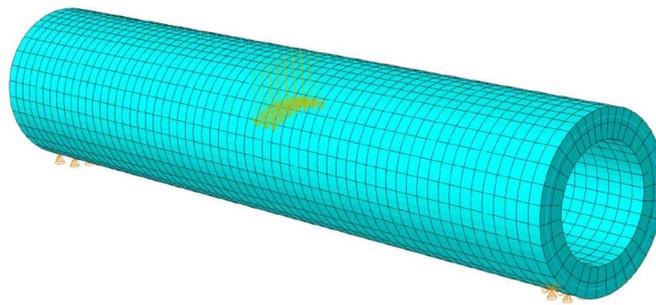


Figura 2: Modelo de Elementos Finitos de viga de H°A° de sección anular elaborada con Hormigón normal, simplemente apoyada con carga localizada en el centro de la luz.

Carga última experimental (Kgf)	Carga última CSM (Kgf)
46.600	46.181

Tabla 3: Carga última de la viga anular de H°A°.

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de la modelación con ABAQUS de la viga anular en estudio, los datos mostrados corresponden con la carga última que alcanzó el modelo.

Carga última (Kgf)	Deflexión máxima (cm)	Tensión de Compresión en fibra externa (Kgf/cm ²)	Máxima tensión de Tracción en las armaduras (Kgf/cm ²)	Máxima tensión (absoluta) en los estribos (Kgf/cm ²)
33.390	-0,37	-328	2.669	1.426

Tabla 4: Resultados de la modelación en ABAQUS de la viga de H°A° de sección anular elaborada con hormigón normal. La tensión de compresión en la fibra externa corresponde es la perteneciente a la sección más solicitada.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en forma de gráficos de diversas variables que provee el ABAQUS-CAE.

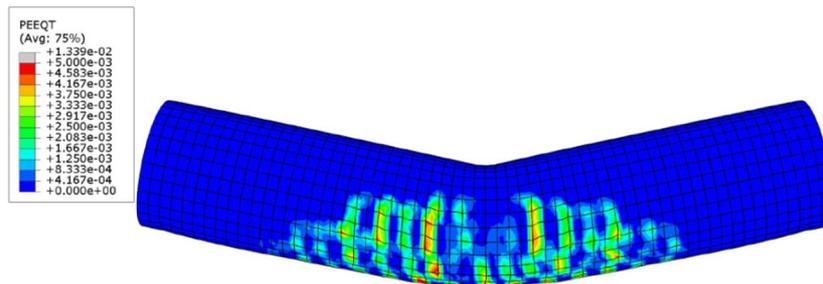


Figura 3: Deformaciones plásticas máximas positivas (en cualquier dirección) para viga anular sometida a carga última según modelo CDP. Estas zonas indican la ubicación aproximada de las fisuras.

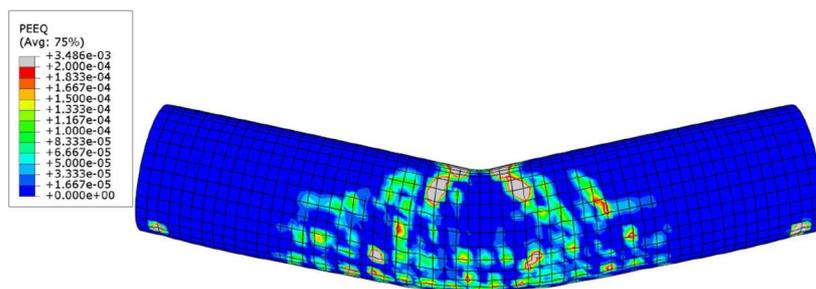


Figura 4: Deformaciones plásticas máximas (en cualquier dirección) para viga anular sometida a carga última según modelo CDP.

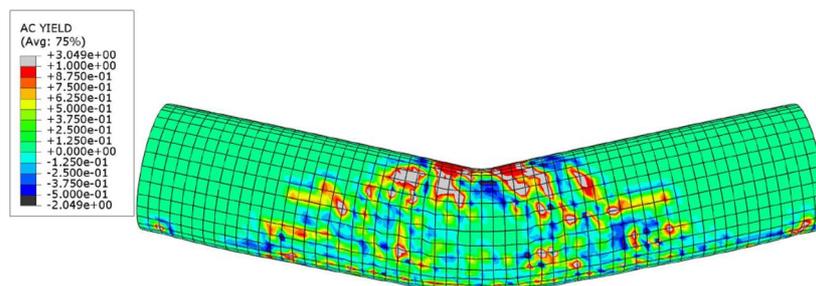


Figura 5: Zonas de fluencia instantánea en el momento de la falla de la viga de sección anular.

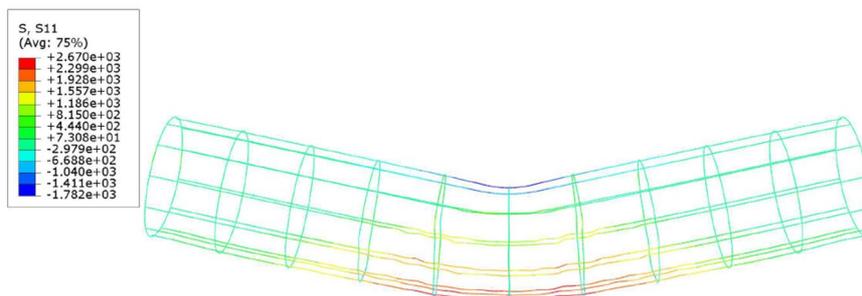


Figura 6: Tensiones en dirección longitudinal de las barras de refuerzo de la viga anular de Hormigón Armado.

A partir de las figuras anteriores, puede deducirse que la falla de la viga anular es causada por fisuración diagonal. De este modo, puede afirmarse que este modelo de elementos finitos se encuentra reproduciendo satisfactoriamente el comportamiento experimental del elemento. Sin embargo, la carga última obtenida mediante el modelo numérico resulta algo inferior a la experimental, resultado que puede atribuirse a la falta de datos acerca del comportamiento del hormigón que constituye el miembro, así como a otras incertidumbres y particularidades asociadas al ensayo realizado.

4.6 Viga de H°A° de sección anular constituida de UHPC

A continuación, se procede a modelar una viga de H°A° de sección anular elaborada con UHPFRC. Tanto las dimensiones como la cantidad de acero de refuerzo longitudinal de la viga fueron diseñadas de manera tal que la misma presente –teóricamente- una falla por cortante, de acuerdo al modelo CSM.

En la siguiente tabla se resumen las cargas últimas a flexión –acorde a los lineamientos de la recomendación SETRA/AFGC- y a corte, estimada ésta última mediante el Crack Sliding Model (CSM).

Carga última P flexión (Kgf)	Carga última P cortante por CSM (Kgf)
57.727	52.394

Tabla 5: Cargas últimas estimadas para viga anular de UHPFRC.

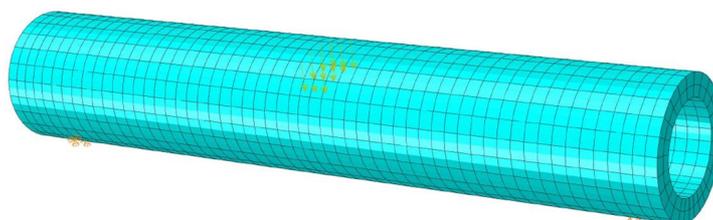


Figura 7: Modelo de Elementos Finitos de viga de H°A° de sección anular, elaborada con UHPFRC, simplemente apoyada con carga localizada en el centro de la luz.

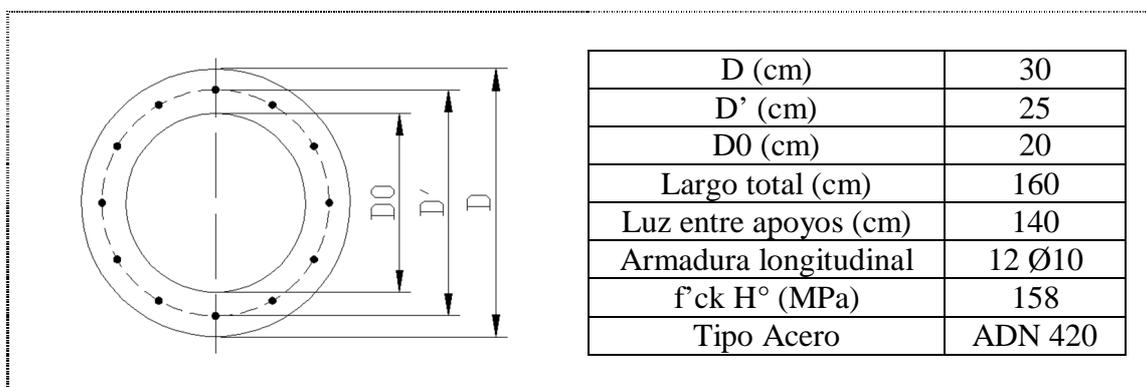


Tabla 6: Características de la viga anular de H°A°.

A partir del modelo en ABAQUS se obtuvieron los siguientes resultados:

Carga última (Kgf)	Deflexión máxima (cm)	Tensión de Compresión en fibra externa (Kgf/cm2)	Máxima tensión de Tracción en las armaduras (Kgf/cm2)
23.166	-0,37	-1.500	5.159

Tabla 7: Resultados de la modelación de la viga anular de UHPFRC.

Se observa que la carga última de la modelación resulta considerablemente inferior que la carga última estimada, tanto en corte como en flexión. A continuación se muestran gráficamente los resultados.

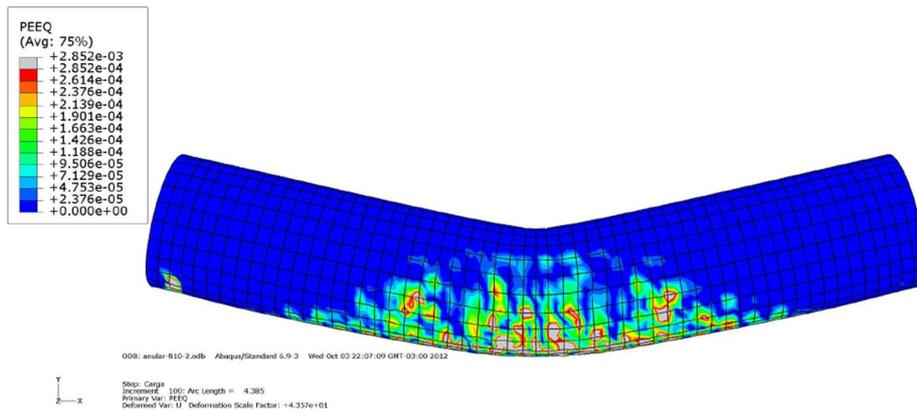


Figura 8: Deformaciones plásticas máximas (en cualquier dirección) para viga sometida a carga última según modelo CDP.

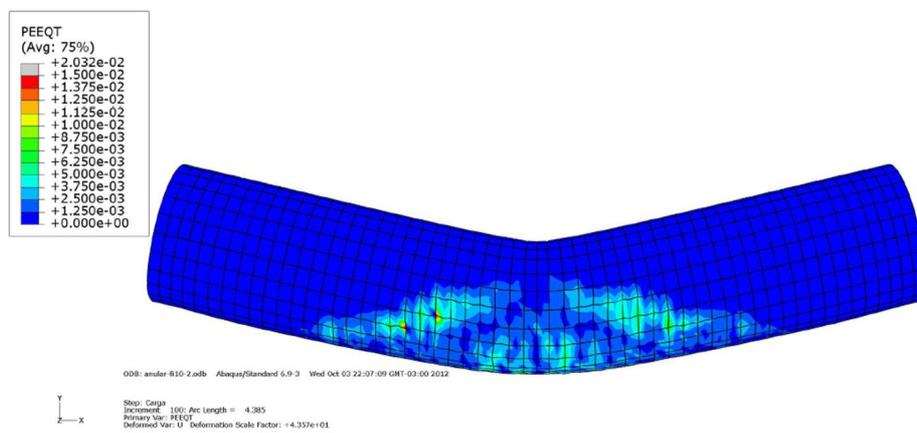


Figura 9: Deformaciones plásticas máximas positivas (en cualquier dirección) para viga sometida a carga última según modelo CDP. Estas zonas indican la ubicación aproximada de las fisuras.

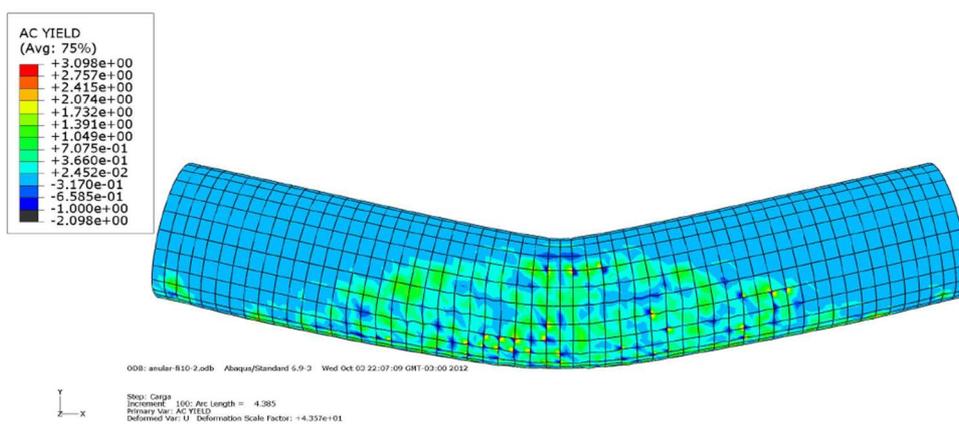


Figura 10: Zonas de fluencia instantánea en el momento de la falla de la viga de sección anular constituida por UHPFRC.

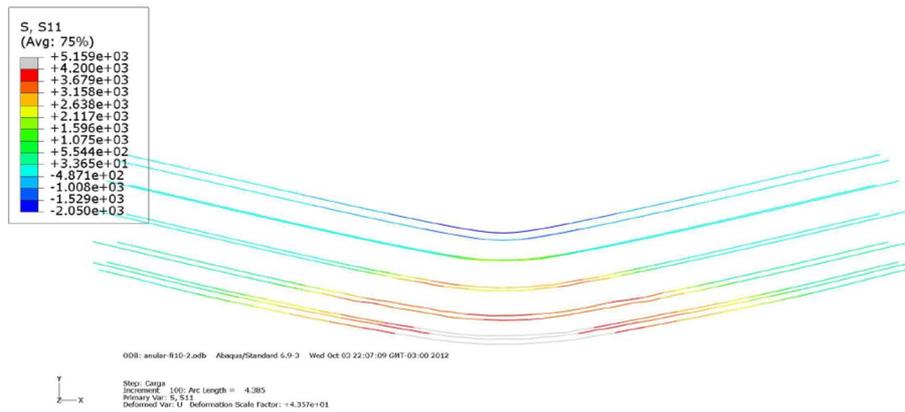


Figura 11: Tensiones en dirección longitudinal de las barras de refuerzo de la viga anular de Hormigón Armado constituida de UHPFRC. Se observa que las armaduras inferiores alcanzan la fluencia.

De las figuras anteriores puede deducirse lo siguiente:

- El patrón de fisuración corresponde con fisuras causadas por flexión.
- La falla es dúctil, causada por fluencia de las armaduras traccionadas. Dado que no se modeló el comportamiento plástico del acero, se deduce que la falla se producirá para una carga algo inferior a lo que arroja el resultado de la modelación.
- Debido al “ascenso” del nivel del eje neutro provocado por la fisuración del hormigón traccionado, se producen tensiones de compresión en la fibra externa del hormigón mucho más elevadas de lo predicho al asumir una sección homogénea comportándose elásticamente.

Por lo anterior, puede concluirse que la falla al corte no ha sido crítica. Este resultado, sin embargo, no resulta tan lejano a lo esperado, dado el reducido margen entre la carga última estimada a flexión y la carga última estimada para la falla a cortante.

5 CONCLUSIONES

La versatilidad que ha demostrado el método CSM ha permitido adaptarlo, en el presente trabajo, a miembros de sección anular constituidos por UHPC. De este modo, se optó por modelar vigas de estas características mediante el Método de Elementos Finitos, aplicando el Software ABAQUS/CAE.

De la modelación en FEM se observó lo siguiente:

- En lo que concierne a miembros de H^oA^o de sección anular con estribos, el modelo de FEM estima una falla por corte al igual que lo observado en los ensayos, no obstante, tiende a subestimar la resistencia al corte del miembro, pudiendo ser esta tendencia atribuible a la falta de información respecto del hormigón constituyente.
- En cuanto al miembro de sección anular constituido por UHPC, pese a que se limitó la resistencia a la flexión con consideraciones conservadoras para facilitar el mecanismo de falla por corte en el elemento, no resultó posible alcanzar este tipo de falla. En el modelo, la fisuración del hormigón traccionado elevó el eje neutro y provocó la falla por flexión, por fluencia de las armaduras, con una carga inferior a la prevista. A su vez, aplicando el CSM, resultó muy difícil obtener una geometría de la viga tal que la carga última por corte superara con amplio margen la que provocara falla por flexión (esto es debido a que se restringieron las dimensiones del elemento al rango que permitieran un posible ensayo a escala real).

Se concluye que el método CSM puede ofrecer una buena solución para estimar la resistencia al corte en elementos de sección anular elaborados con UHPC, sin embargo precisa ser calibrado con mayor base experimental debido a la utilización del hormigón

especial. Asimismo, la modelación numérica constituye una herramienta para verificar la adaptabilidad del modelo frente a distintas situaciones de carga, condiciones de vínculo o geometrías, reduciendo la necesidad en cuanto a cantidad de ensayos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a todo el equipo del Instituto MPA TU Braunschweig, por los recursos y el apoyo brindado, en especial a Corinna Müller, por compartir sus conocimientos y su experiencia en hormigones de Ultra Alta Performance.

Asimismo al sistema de becas ALE-ARG del Ministerio de Educación de la Nación en conjunto con la DAAD, que hicieron posible esta experiencia.

REFERENCIAS

- Abaqus 6.9. Documentation. Simulia Dassault Systèmes, 2009.
- ACI 224.2R-92 – Comité 224 “Fisuración de Miembros de Hormigón en tracción directa”.
- Chen L. & Graybeal B. A., *Finite Element Analysis of Ultra-High Performance Concrete: Modeling Structural Performance of an AASHTO Type II Girder and a 2nd Generation Pi-Girder*, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, 2010.
- Hoang L.C & Jensen U.G., Shear Strength of Reinforced Concrete Piers and Piles with Hollow Circular Cross Section, *Structural Engineering International*, Volume 20, Number 3, August 2010, pp. 260-267.
- Müller, C., Teutsch M. & Empelmann, Tragverhalten von Ultra-Hochleistungsbeton im Nachbruchbereich, *Technische Universität Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) – Fachgebiet Massivbau*, 2011.
- Nielsen M. P. & Hoang, *Limit Analysis and Concrete Plasticity*, Taylor and Francis Group LLC, Londres, 3° Edición, 2011.
- Spinella N., Colajanni P. and Recupero A., Simple Plastic Model for Shear Critical SFRC Beams, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, April 2010, pp. 390-400.
- Turmo J., Ramos G. and Aparicio A.C., Shear Truss Analogy for Concrete Members of Solid and Hollow Circular Cross Section, *Eng Struct* 31, 2009, pp. 455–465.
- Voo Y. L., Foster S. J. and Gilbert R. I., Shear Strength of Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete Prestressed Girders without Stirrups, *UNICIV Report R-421, The University of South Wales, School of Civil and Environmental Engineering*, Kensington, Sydney, Australia, November 2003, ISBN:85841 388 4, 131 pp.
- Wahalathantri, B.L., Thambiratnam, D.P., Chan, T.H.T., & Fawzia, S., A Material Model For Flexural Crack Simulation In Reinforced Concrete Elements Using Abaqus, *Faculty of Built Environment and Engineering*, Queensland University of Technology, 2011.
- Zhang J. P., *Strength of Cracked Concrete. Part 1: Shear Strength of Conventional Reinforced Concrete Beams, Deep Beams, Corbels, and Prestressed Reinforced Concrete Beams without Shear Reinforcement*, Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering, Lyngby, 1994, Report R No. 311.
- Zhang J. P., *Strength of Cracked Concrete. Part 2: Micromechanical Modelling of Shear Failure in Cement Paste and in Concrete*, Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering and Materials, Lyngby, 1997, Report R No. 17.