



Concretos de ultra alto desempeño

Pierre Rossi

El concreto de ultra alto desempeño (UHPC *Ultra-High Performance Concrete*) ha sido objeto de numerosas investigaciones.

El UHPC tiene una relación de agua-material cementante (w/cm) menor que 0.2 y por lo tanto, puede ser muy denso y tener altas resistencias a compresión. Las resistencias a la tensión del UHPC están limitadas a aproximadamente 8 MPa, y los UHPCs pueden ser frágiles. Para resolver estos proble-

mas, se les agregaron fibras. Aquí se resume el estado actual de la investigación en el concreto de alto desempeño reforzado con fibras de acero (UHPRFC: *Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete*).

Tipos

Existen tres tipos principales de UHPRFCs:

Tipo 1: UHPRFCs con altas proporciones de fibras cortas: Un ejemplo es el concreto reforzado compacto. El contenido de fibras para este producto está entre 5 y 10% por volumen, y las fibras no exceden 6 mm en longitud. Las fibras mejoran la resistencia a la tensión del concreto, pero poco contribuyen a aumentar la ductilidad. El material, por lo tanto, se usa en estructuras con altos porcentajes de varillas de refuerzo tradicionales.

Tipo 2: UHPRFCs con porciones intermedias de fibras largas: Los ejemplos incluyen DUCTAL® y CERAMECEM®. El contenido de fibras para estos productos varía entre 2 y 3% por volumen, y las fibras están entre 13 y 20 mm de largo. Las fibras mejoran la resistencia a la tensión y la ductilidad del concreto y se pretende que reemplacen todas o una parte de las varillas de refuerzo que normalmente serían usadas en elementos de concreto presforzado o reforzado.

Tipo 3: UHPRFCs con proporciones muy altas de fibras de varias longitudes: Un ejemplo de este producto es CEMTECMultiscale®. El contenido de fibras de este producto puede ser de hasta 11% por volumen y las fibras cortas pueden variar desde 1 hasta 20 mm de largo. Las fibras incrementan significativamente tanto la resistencia a la tensión como la ductilidad del concreto, y pueden reemplazar todas las varillas de refuerzo tradicionales en un elemento. Al igual

que con los compuestos reforzados con fibras que se forman usando una matriz orgánica, la matriz de un UHPFRC del Tipo 3 transfieren los esfuerzos entre las fibras y asegura ciertas propiedades físicas y químicas del material.

Resistencia a la tensión

Es bien sabido que la orientación de las fibras en un elemento estructural será afectada por las dimensiones de las fibras y el elemento, así como también por el método de colocación del concreto. Si un alto porcentaje de fibras de acero son generalmente paralelas a los esfuerzos de tensión en un miembro, pueden incrementar significativamente la resistencia a la tensión. Por lo tan-



to, el comportamiento en tensión de un UHPFRC puede variar con su aplicación. Por ejemplo, en un UHPFRC colocado en un molde para producir una losa delgada con

nervaduras delgadas, las fibras tenderán a tener orientaciones al azar en el plano en la losa, pero una orientación unidireccional en cada nervadura. Por lo tanto, el miembro tendrá propiedades isotrópicas en el plano en la losa, y propiedades no isotrópicas en las nervaduras, las cuales tendrán resistencias a la tensión más altas en la dirección longitudinal.

Tensión directa

Las pruebas de tensión uniaxiales son difíciles de llevar a cabo apropiadamente y es difícil evitar esfuerzos de flexión o fractura por las mordazas de

la máquina. Cuando la proporción de las fibras bien orientadas (fibras paralelas al esfuerzo de tensión) es alta y el comportamiento de tensión del compuesto es elástico –perfectamente plástica o de endurecimiento con deformación elástica– únicamente la porción elástica de la curva esfuerzo-deformación determinada experimentalmente puede ser representativa, ya que la flexión podría ser un factor después de que se ha iniciado el agrietamiento. A pesar de las dificultades mencionadas, se han determinado resistencias a la tensión confiables. Las resistencias medias a la tensión para los Tipos 2 y 3 de UHPFRCs, por ejemplo, son de aproximadamente 7.7 y 20 MPa, respectivamente.

Aunque pueden usarse para evaluar las características de fractura, los especímenes de tensión con muescas (Fig. 1) no son medios confiables para la evaluación directa de la tensión de un UHPFRC. La muesca perturba la tendencia natural del material a tener grietas múltiples, y cuando se inicia una sola grieta, el espécimen entra en flexión. Si se ignora esta flexión en los cálculos, la resistencia a tensión uniaxial es sobreestimada.

Fig. 1 Disposición para la prueba de tensión uniaxial para un espécimen con muescas.

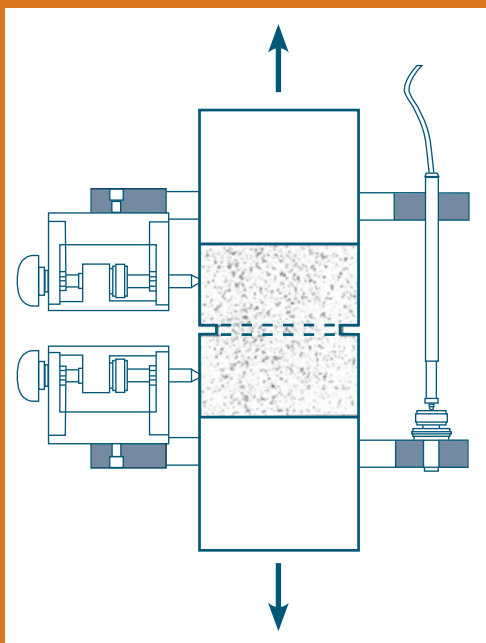
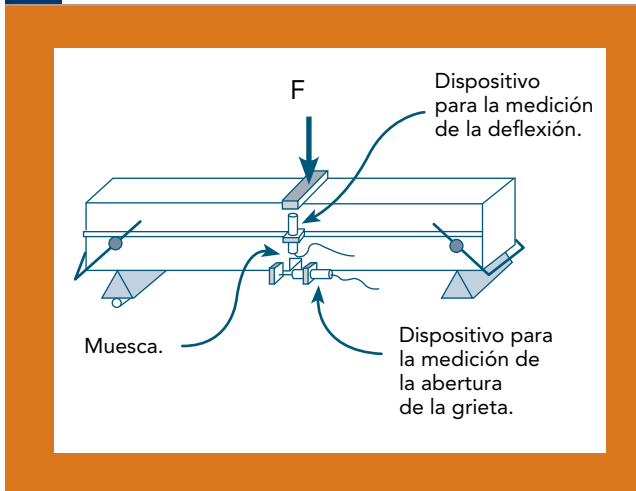


Fig. 2 Disposición para la prueba de flexión para un espécimen con muescas.



Flexión

Pueden obtenerse datos de resistencia a tensión representativos usando especímenes de flexión con muescas (Fig. 2). Se han propuesto recomendaciones provisionales para pruebas a flexión en el punto central de especímenes con muescas y un método para determinar la relación de la resistencia a tensión uniaxial al ancho de la grieta, a partir de estas pruebas. La base del modelo cinemático para determinar esta relación es que únicamente se propaga una grieta localizada, de modo que no es apropiado en el dominio de deformación-endurecimiento, cuando deben aparecer varias grietas (visibles o no). También pueden obtenerse datos representativos de resistencia a la tensión usando especímenes de flexión sin muescas. Al igual que con los especímenes con muescas, se ha propuesto un método para determinar el comportamiento a tensión uniaxial. En este caso, se utilizó una prueba de flexión de cuatro puntos. El comportamiento del concreto es simulado usando un modelo de material elastoplás-

tico en un programa de análisis de elementos finitos, y el modelado se basa en la suposición de que no aparece ninguna localización de agrietamiento en el material. Se ha demostrado que el método proporciona una buena caracterización del comportamiento de tensión uniaxial de un UHPFRC.

Ductilidad

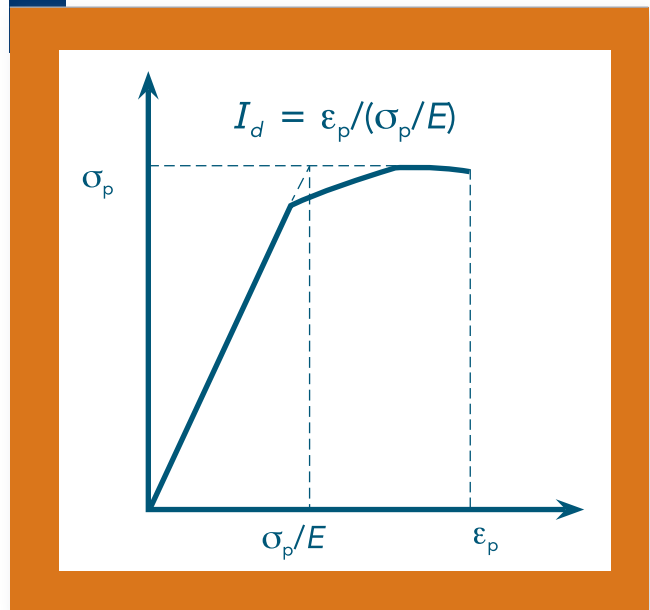
Un objetivo importante para los desarrolladores de UHPFRCs consistía en el reemplazo total o parcial de las varillas de refuerzo tradicionales. De modo que es necesario que el UHPFRC seleccionado asegure un cierto nivel de ductilidad en las estructuras.

Escala material

La ductilidad de la escala material está relacionada con el comportamiento antes de un agrietamiento localizado; es decir, antes de que se desarrolle el esfuerzo pico. El índice de ductilidad (I_d) está dado por: $I_d = \epsilon_p / (\sigma_p / E)$

En donde ϵ_p y σ_p son la deformación y el esfuerzo en el pico en

Fig. 3 Determinación del índice de ductilidad.



la curva de esfuerzo de tensión-deformación, respectivamente, y E es el módulo de Young para el material (Fig. 3). Para comparación:

- Los concretos ordinarios y de alta resistencia tienen $I_d = 1$
- El UHPFRC Tipo 2 tiene $I_d = 1.3$ a 3
- El UHPFRC Tipo 3 tiene $I_d = 17.5$ a 30 , y
- El acero tiene $I_d = 30$ a 60 .

Escala estructural

La ductilidad en la escala estructural es condicional. En primer lugar, las fibras deben estar bien orientadas respecto a las macrogrietas que se desarrollan en la estructura. En segundo lugar, la estructura no debe tener gran espesor debido a que un ancho unitario de la abertura de grietas en un miembro peraltado produce menos rotación y menos ductilidad que la misma extensión de la abertura de una grieta en un miembro menos peraltado (un efecto puramente geométrico).

Para el UHPFRC, un espesor máximo razonable es aproximada-



mente tres veces el largo máximo de la fibra. Así pues, el espesor máximo para un UHPFRC con una longitud máxima de fibras de 30 mm debe ser de aproximadamente 100 mm. Para estructuras presforzadas, generalmente se usarán las fibras en el UHPFRC para reemplazar los estribos para comportamiento en cortante. Puesto que las grietas de cortante son más numerosas y tienen anchos más pequeños que las grietas de flexión en un elemento de concreto reforzado de las mismas dimensiones, la escala estructural es menos importante.

Heterogeneidad

La distribución espacial de las fibras en un UHPFRC es un factor que afecta el comportamiento en tensión, y la heterogeneidad de la distribución de las fibras tiene un fuerte efecto sobre la variabilidad en el comportamiento de tensión. Los factores principales que afectan la heterogeneidad incluyen el método de colocación y la proporción de las fibras.

Puesto que la variabilidad en el comportamiento de tensión es tan importante, debe tomarse en cuenta de una manera rigurosa. Los cálculos de diseño deben incluir valores característicos, no valores y curvas promedio. Los valores promedio no son de gran interés e inclusive pueden llevar a resultados equivocados.

Comportamiento de fatiga

Aparentemente, los estudios sobre el comportamiento de fatiga de los UHPFRCs son del dominio público. Un estudio, sobre el UHPFRC Tipo 2, no proporciona datos suficientes para permitir la determinación del límite de resistencia. El otro estudio sobre el UHPFRC Tipo 3

indica que el límite de resistencia para ese material es el 60% de la resistencia a la tensión característica. En general, los concretos reforzados con fibra parecen tener pobre comportamiento de fatiga. La carga por fatiga es muy demandante en la adherencia de la fibra con la matriz, y por eso afecta de modo importante el comportamiento mecánico del UHPFRC. A medida que la relación longitud de fibras-diámetro se incrementa, la adherencia de las fibras a la matriz se reduce y la sensibilidad a la fatiga se incrementa.

Efectos de los incrementos de esfuerzo

Al igual que con los efectos de la fatiga, existen pocos estudios que describen los efectos de los incrementos en las características mecánicas acentuarse los esfuerzos para los UHPFRCs. Sin embargo, es claro que los efectos crecen al incrementarse el número de las fibras. Para comparación, se probaron la resistencia a la tensión uniaxial para diferentes materiales a base de cemento cargados a un régimen de esfuerzo de entre 10^{-4} y 10 GPa/s. Para cada orden de incremento en la magnitud del régimen de carga, los incrementos en la resistencia a tensión fueron de:

- 0.7 MPa para concretos ordinarios y de alto desempeño
- 0.8 MPa para UHPFRC Tipo 2 con 7.7×10^7 fibras/m³
- 1.5 MPa para UHPFRC Tipo 3 con 1.9×10^{10} fibras/m³

Claramente, los efectos de la tasa se incrementan al aumentarse el contenido de fibras. Los beneficios de la mayor capacidad y ductilidad asociadas con el refuerzo de fibras son más grandes para estructuras sometidas a cargas de impacto que para aquellas sometidas a cargas estáticas.

Durabilidad

Al considerar los UHPFRCs es natural sentir preocupación por el potencial de corrosión de las fibras de acero. Aun cuando las fibras localizadas cerca de la superficie pueden corroerse ligeramente, las pruebas han demostrado que esta corrosión superficial no conduce a pérdida de las propiedades mecánicas. Los estudios demuestran que los especímenes con el nivel de servicio que se agrietan en soluciones acuosas (con y sin cloruro) exhiben calentamiento autógeno en las grietas. El UHPFRC Tipo 2 con aberturas de grietas de 55 a 200 μm mostraron reducciones de 0% y 12% en la capacidad de soporte después de la exposición a soluciones de cloruro. Después de una exposición similar, los especímenes de UHPFRCs Tipo 3 mostraron un incremento de 14% en la capacidad de soporte comparados con los especímenes de referencia no agrietados almacenados al aire libre.

Para grietas muy finas de menos de aproximadamente 50 μm , el alivio autógeno parece ser suficiente para evitar daños por corrosión. No se han llevado a cabo pruebas en especímenes UHPFRC sometidos simultáneamente a cargas por fatiga y exposición a cloruros. **C**

Nota: Este documento está basado en el artículo "Ultra High Performance Concretes", publicado por el American Concrete Institute (www.concrete.org) en *Concrete International*, febrero de 2008.