

# 2 Utilización del hormigón reforzado con fibras de acero en la actualidad

## 2.1 Introducción

Las ventajas en las características ingenieriles y económicas que pueden conseguirse a través de la utilización de fibras de acero en la matriz cementicia que forma el hormigón está popularizando el uso de estos hormigones de alta performance para una gran variedad de aplicaciones en la ingeniería de la construcción.



En este capítulo se nombran algunas de las aplicaciones de los hormigones reforzados con fibras de acero. Todas ellas se basan en la mayor resistencia a la tracción y a la mayor ductilidad que las fibras generan en la matriz cementicia.

Al final del capítulo también se muestran los posibles problemas que pueden generar las fibras a largo plazo, aunque en este aspecto no se han realizado suficientes estudios.

## 2.2 Aplicación en hormigones de alta resistencia<sup>1,2</sup>

El término hormigones de alta resistencia (HSC: High Strength Concrete) se refiere a aquellos cuya resistencia a la compresión supera los 42MPa. En la industria de la construcción los HSC se utilizan para piezas premoldeadas y pretensadas, columnas y tabiques de edificaciones de grandes alturas, etc. por sus ventajas sobre los hormigones convencionales. En edificaciones de grandes alturas permite evitar las columnas de grandes dimensiones en los pisos inferiores, permite mayores luces entre columnas o el almacenamiento de mayor cantidad de carga sobre las losas. La reducción en la masa también supone una gran ventaja económica en el diseño de estructuras antisísmicas. Si se usa el HSC para puentes pueden disminuirse las cargas muertas de gran incidencia en puentes de grandes luces o mayores luces entre apoyos para ampliar el ancho de paso.

---

<sup>1</sup> Song, P.S. and Hwang, S. (2002). *Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete*. Science direct, Construction and Building Materials.

<sup>2</sup> Song, P.S.; Wu, J.C.; Hwang, S. and Sheu, B.C. (2002). *Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high strength steel fiber reinforced concrete*. Science direct, Construction and Building Materials.

También representan un ahorro sustancial en el mantenimiento de los puentes y permiten prolongar el período de servicio pronosticado. Los HSC presentan alta densidad y muy baja impermeabilidad que los protege de ambientes agresivos. Con esto se consigue mayor durabilidad en edificaciones y estructuras.

En breve el diseño de piezas con HSC permite la reducción de secciones transversales, disminuyendo el peso muerto y aumentando la capacidad de las estructuras.

Pero esta mayor resistencia a la compresión de los HSC van en detrimento de la ductilidad propia del los hormigones convencionales. Luego de la tensión pico la resistencia de los HSC baja de forma abrupta consiguiendo modos de fractura muy frágiles. Para mejorar la ductilidad los ingenieros recurrieron al concepto antiguo de reforzar una matriz frágil mediante fibras discretas. Cuando el resultante hormigón de alta resistencia reforzado con fibras de acero (HSFRC High Strength Fiber Reinforced Concrete) desarrolla las fisuras bajo las cargas de servicio, las fibras actúan como puentes entre una cara de la fisura y la otra generando un mecanismo de transferencia. Este mecanismo reduce la propagación de fisuras, contribuye a la ductilidad y aumenta la resistencia.

Existe además una ventaja de los HSFRC que es su resistencia al impacto. Por esto puede usarse en grandes aplicaciones como ser solados industriales, estructuras hidráulica, tableros de puentes, pavimentos, estructuras resistentes a impactos y penetraciones, etc. Esta mayor resistencia reside principalmente en el extremo conformado de las fibras de acero que hace las veces de gancho y provoca una resistencia cinco veces mayor a la que producen las fibras lisas. También se publicó que el hormigón con fibras es seis veces mejor para la resistencia al recibir cargas de impacto que el hormigón sin fibras.

## 2.3 Aplicación en hormigones de agregado liviano<sup>3</sup>

Existen varios métodos para producir hormigones livianos (LWC Lightweight Concrete). En uno de los métodos denominado “sin-finos” (no-fines), la porción fina del total de los agregados se excluye. Otra manera de producir LWC es introduciendo burbujas de aires estables dentro del hormigón mediante el uso de mezclas químicas y burbujas mecánicas. A este tipo de hormigón se lo llama hormigón aireado, celular u hormigón gas. La forma más común de producir LWC es usando agregados livianos. Estos agregados pueden ser naturales o artificiales y existen en un amplio rango de pesos unitarios y resistencias que pueden utilizarse para los distintos campos de aplicación.



<sup>3</sup> Oguz Akin Duzgun; Rustem Gul and Cuneyt Aydin (2002). *Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete*. Science direct, Construction and Building Materials.

El principal objetivo de los LWC es obtener un buen aislamiento térmico. Sin embargo dado el poco peso del material existen varias ventajas tales como menor peso propio y por lo tanto menores secciones transversales y mayor durabilidad. En las aplicaciones estructurales donde el peso propio es un ítem a tener en cuenta tales como: tableros de puentes, garajes de estacionamiento, viaductos de grandes luces, etc. los LWC son una buena opción. Reduciendo el peso propio pueden conseguirse importantes ahorros, no solo en material, sino también en los costos de construcción. El LWC también se destaca por su durabilidad a largo plazo, por lo cual está siendo utilizado cada vez en más aplicaciones de la construcción.

La adición de fibras de acero mejora significativamente muchas de las propiedades ingenieriles del mortero y del hormigón, en especial la resistencia al impacto y la tenacidad. También produce mejoras en la resistencia a la tracción, a la flexión y a la fatiga, como ya se remarcó en el subapartado anterior. Además la adición de fibras hace al hormigón más homogéneo e isotrópico con lo cual lo transforma de un material frágil a uno más dúctil.

La disminución en la resistencia que generan los agregados livianos en reemplazo de los agregados comunes se compensa con el aumento de resistencia dado por las fibras de acero. Por lo tanto se mantiene la resistencia con todas las ventajas que pueden obtenerse mediante el uso de LWC.

## 2.4 Aplicación en reparación de estructuras<sup>4</sup>

En los últimos años se ha utilizado una técnica de refuerzo de notable eficiencia llamada Superficie Cercana Montada (NSM Near Surface Mounted) para aumentar la resistencia flexional y de corte del hormigón. La técnica NSM se basa en adherir tiras de polímero reforzado con fibras de carbono (CFRP Carbon Fiber Reinforced Polymer) en la capa superficial de hormigón del elemento a reforzar. La técnica NSM es apropiada para aumentar la resistencia a la flexión de losas de hormigón. Sin embargo, si la losa de hormigón también tiene su resistencia a la compresión reducida, el aumento de resistencia a la flexión que provee el NSM está limitado por la deformación máxima que puede admitir la fibra más comprimida del hormigón.

Como resultado de esta restricción la máxima tensión de tracción que alcanza la fibra es apenas un mínimo porcentaje de la resistencia a tracción de la misma. Por esta razón se comienza a cuestionar los beneficios que pueden conseguirse mediante el uso de esta técnica en estos casos.

Para superar esta limitación, como solución, se propone aplicar una capa de hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC Steel Fiber Reinforced Concrete) sobre la superficie existente de hormigón, usando un compuesto adhesivo. Dado que para este fin alcanza una capa fina de este material, la contracción por fraguado y la variación de temperatura pueden llevar a una fisuración descontrolada de esta capa. El añadir fibras de acero al hormigón evita la pérdida de resistencia luego de la fisuración. Si se consigue la suficiente adherencia la estructura reforzada actúa monolíticamente. El ensayo de arrancamiento o pull-off es uno de los ensayos de tracción más comúnmente utilizados para verificar la adherencia entre la capa a reforzar y la reforzante.

---

<sup>4</sup> Everaldo Bonaldo; Joaquim A.O. Barros and Paulo B. Lourenço (2005). *Bond characterization between concrete substrate and repairing SFRC using pull-off test*. Science direct, Construction and Building Materials.

## 2.5 Aplicación como refuerzo de corte<sup>5</sup>

En estructuras de hormigón armado reticuladas diseñadas para resistencia sísmica cuando las acciones son severas, hace falta un mecanismo de colapso altamente disipativo. Para permitir el desarrollo completo de la capacidad de la resistencia flexional en las zonas críticas, es necesario que se evite el colapso prematuro por corte. Esto es porque el colapso por corte implica una falla frágil que es muy peligrosa. Por esta razón existen muchas normas que requieren un gran porcentaje de armadura transversal en las zonas críticas.

Varios papers publicados en los últimos 25 años consideran la posibilidad de utilizar SFRC asignando a las fibras el trabajo de refuerzo de corte.

Las investigaciones experimentales muestran que la inclusión de las fibras de acero en el hormigón, en adecuadas cantidades, mejoran la resistencia al corte por las siguientes razones: el aumento en la resistencia a la tracción retarda la formación y crecimiento de fisuras, una menor distancia entre fibras que la que existe entre estribos implica mayor efectividad en el mecanismo de “coser las fisuras” que tienen ambos refuerzos y por último una mejor distribución de las fisuras de tracción.

## 2.6 Aplicación en hormigón proyectado<sup>6,7</sup>

El hormigón proyectado es ampliamente usado como soporte de rocas en minas y proyectos civiles. El proceso de aplicación consiste en disparar a presión el hormigón o el mortero sobre una superficie para producir una capa auto-compactante y con capacidad de carga. A fines de los 70s se comenzó a utilizar el método wet-mix, que hoy día se usa en casi todos los hormigones proyectados.

Una mayor profundidad en los túneles subterráneos requiere una mayor demanda de resistencia para contener el peso de las rocas. En términos de la tecnología se requiere mayor resistencia y tenacidad. Para esto se desarrolló el implemento de fibras de acero en hormigones de alta resistencia proyectado (SFRS Steel Fiber Reinforced Shotcrete).

Las principales características de del SFRS es su alta resistencia y su ductilidad luego del pico de tensión. El valor de la resistencia del SFRS aumenta rápidamente luego de su aplicación, y alcanza a casi el doble que el hormigón proyectado ordinario. La ductilidad del SFRS que se obtiene con la introducción de las fibras de acero y es efectiva para mantener el túnel estable luego de la fluencia. Asimismo, SFRS es efectivo para sostener la presión de la tierra.



<sup>5</sup> Calogero  
reinforcem

<sup>6</sup> Malmgre  
Science o

<sup>7</sup> Masayasu  
Construc

hear

ent.

ect,

En algunas de estas obras se ha llegado a incrementar el rendimiento de avance hasta un 40%, debido al ahorro de tener que instalar la malla de refuerzo, que además implica un alto riesgo.

Las fibras se distribuyen uniformemente en todo el espesor del hormigón proyectado, impartiendo un mejor comportamiento triaxial frente a las tensiones de corte y flexión debido a la disminución drástica de las fisuras por contracción. No hay que dejar de mencionar que el efecto de sombra que se produce detrás de la malla electrosoldada puede dejar vacíos que inducen corrosión en la misma y posterior fisuración del hormigón (ver foto).

El comportamiento del hormigón proyectado frente a la absorción de esfuerzos mejora notablemente gracias a la ductilidad que le otorgan las fibras en dosis adecuadas, llegando a aumentar el valor de energía de rotura del hormigón hasta en 5 veces. La energía absorbida antes de la rotura por el hormigón es el área bajo la curva (figura 1); se le denomina igualmente “tenacidad” y se expresa en Joules. La figura 2 muestra que la absorción de energía de rotura de las fibras es mayor que la de las mallas electrosoldadas (Estudio realizado en Noruega por la Asociación de Investigación Técnica de Noruega - NTNF).

Ventajas

- Mayor resistencia a la abrasión y al impacto.
- Mayor estanqueidad y resistencia a la congelación.
- Mayor capacidad de adherencia.
- Reducción en el espesor promedio de shotcrete debido a que el mismo copia el perfil de la roca.



Las fibras producen además ahorros de tiempo y dinero. • Ahorro en costos directos ya que el costo de la fibra equivale a un 50% del costo directo de la malla (contando mano de obra).

- Ahorro en el costo indirecto por evitar la colocación del shotcrete en dos capas.
- Ahorro en el hormigón utilizado ya que las fibras permiten aplicar el espesor requerido en toda la superficie, independiente de las irregularidades del sustrato.
- Ahorro debido a la disminución del rebote provocado por la malla de refuerzo.

Recomendaciones

- El hormigón proyectado y reforzado con fibras requiere el uso de microsílíce y aditivos para poder contrarrestar los efectos negativos que tienen las fibras sobre el bombeo y la proyección. Por otro lado su uso mejora la adherencia entre la fibra y la matriz de hormigón.

- El largo de la fibra no deberá exceder el 50% del diámetro interno de la manguera de proyección y deberá como mínimo tener el triple del tamaño máximo de árido (por razones de anclaje, ver figura 4).
- El contenido de fibra por metro cúbico de hormigón y el espesor del mismo deberá ser determinado en base a los ensayos de carga sobre panel. El contenido teórico de fibra metálica varía entre 35 y 50 kg/m<sup>3</sup> y el de fibra de polipropileno rígida es de 5 a 10 kg/m<sup>3</sup>.
- Para hormigones ubicados a la intemperie o sometidos a ataque de aguas sulfatadas (p.ej. minería subterránea) se recomienda fibras de material sintético (Masterfiber 50PS o similar).
- Tal como se aprecia en fig. 5, donde comparando con la fibra de acero, la fibra sintética muestra una caída más brusca después de la primera fisura, pero con un posterior aumento de resistencia a la deformación, lo que la hace estructuralmente interesante, especialmente en labores mineras donde se esperan grandes deformaciones.

La cantidad adecuada de fibra a utilizar deberá ser determinada con ensayos en obra.

## 2.7 El problemas de las fibras de acero: corrosión a través de las fisuras<sup>8</sup> y fatiga<sup>9</sup>

Como ya se ha visto, la adición de fibras en el hormigón trae un mejor control de fisuración y mejora sus propiedades mecánicas. Particularmente, entrega al material una ductilidad post fisuración por medio de su capacidad de transporte de cargas.

El comportamiento de las fibras de los SFRC comenzó a ser conocido en el caso de cargas de tiempo limitado, sin embargo, su comportamiento a largo plazo todavía queda extensamente sin estudiar. El comportamiento a largo plazo de estructuras reforzadas con fibras de acero en el modo fisurado dependen de la capacidad de la fibra de tomar esfuerzos entre los dos labios de las fisuras. Esto depende por un lado del efecto de fatiga y del efecto mecánico de creep y por otro lado la corrosión de las fibras.

La corrosión de las fibras en el SFRC puede resultar en el estallo de la matriz cementicia por el aumento de volumen que produce el desarrollo de la corrosión, o un debilitamiento en la capacidad del efecto de puente de las fibras entre fisuras debido a la disminución de la sección. Según los ensayos efectuados se confirma la pequeña sensibilidad del SFRC a la corrosión.

Durante las últimas décadas se han realizado varios intentos para mejorar los conocimientos acerca del comportamiento de fatiga de los materiales. Se conoce mucho sobre el comportamiento de los materiales dúctiles como el acero, pero la comprensión del fenómeno de fatiga está todavía relativamente incompleto para los materiales frágiles como el hormigón. Para los materiales compuestos tales como el SFRC este malentendido sobre el comportamiento de la fatiga es aún mas pronunciado.

El tema de la fatiga es de interés actual debido al desarrollo de puentes, rutas, estructuras oceánicas o autopistas donde la carga de diseño puede actuar para un gran numero de ciclos. Además de esto existe también una percepción de que la repetición de las cargas puede aumentar el ancho de fisura, o la deformación o puede reducir la rigidez de la estructura para cargas de servicio, aunque o ocurran mas las fallas de fatiga.

La fatiga del hormigón es un proceso de desarrollo progresivo de pequeñas imperfecciones existentes en el material debido a cargas repetitivas. Estas imperfecciones

---

<sup>8</sup> Jean- Louis Granju and Sana Ullah Balouch (2003). *Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks*. Science direct, Construction and Building Materials.

<sup>9</sup> Paulo Cachim; Joaquim A Figueiras and Paulo A Pereira (2002). *Numerical Modelling of fibre-reinforced concrete fatigue in bending*. Science direct, Construction and Building Materials.