

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

5.1. CONCLUSIONES.

5.1.1. Hormigones empleados.

A partir de los hormigones, tradicional (HT) y autocompactante (HAC) empleados en la empresa colaboradora de forma habitual, se desarrollaron otras dos dosificaciones. A partir del HT, se obtuvo otro hormigón de consistencia fluida y, a partir del HAC, se obtuvo otro hormigón con consistencia menos fluida.

Las modificaciones han consistido únicamente en adaptar la dosificación de aditivo, sin intervenir en otros componentes del hormigón.

No se ha pretendido optimizar las dosificaciones y, en estas condiciones los hormigones modificados han alcanzado los mismos niveles de resistencia que los equivalentes originales. Las consistencias de los hormigones modificados han alcanzado los objetivos previstos.

5.1.2. Análisis de la respuesta frente a solicitaciones de cizallamiento en probetas armadas tipo "Z".

Se ha analizado la respuesta frente a solicitaciones de cizallamiento de los cuatro hormigones comentados en el punto anterior, mediante ensayo de probetas tipo "Z" armadas, incluyendo como variable de estudio la preparación de la zona de rotura (prefisurada con distintos niveles de rugosidad o sin tratar).

Del estudio de resultados se deduce:

- 1) La consistencia (HT o HAC originales frente a sus correspondientes modificados) no influye de una manera clara en los resultados de carga máxima. En cambio, la granulometría sí que influye en los resultados obtenidos, incrementándose la carga de rotura en un 25% para los hormigones de estructura granular gruesa frente a los de estructura granular más fina.
- 2) Las probetas sin prefisura son las que alcanzan mayores cargas de rotura. La prefisura supone una reducción del pico de resistencia (valor de rotura) del orden de un 40% respecto del pico de las probetas sin prefisura. Las probetas con prefisura lisa son las que alcanzan menores cargas de rotura, *(52% de la carga de rotura de una probeta sin prefisura del mismo hormigón de estructura granular gruesa)*.
- 3) Las probetas de hormigones de estructura granular gruesa necesitan mayores aberturas de fisura (*entorno a un 18%*) para lograr un mismo desplazamiento vertical que las probetas fabricadas con hormigones de granulometría más fina con un mismo tipo de prefisura. Una vez se alcanzan aberturas de fisura mayores a 0.5 mm los valores son muy dispersos para extraer conclusiones.

- 4) La preparación de la fisura influye en la relación desplazamiento vertical / abertura de fisura de manera que las probetas con prefisura lisa sufren mayor desplazamiento vertical (25%) con pequeñas aberturas de fisura. Pero no hay una clara influencia de los distintos niveles de rugosidad (en el ámbito de este estudio) cuando la superficie es rugosa.
- 5) Las resistencias residuales obtenidas cuando en el ensayo se alcanzan grandes aberturas de fisura son similares en todas las preparaciones de fisura, y con resultados muy dispersos. Sólo parece notarse una cierta tendencia a mayor resistencia residual (apenas del 10%) para los hormigones de estructura granular gruesa que para los de estructura granular más fina.
- 6) Para el mismo hormigón, las probetas prefisuradas tratadas con inhibidor de fraguado y las prefisuradas con rugosidad gruesa, se comportan de la misma manera en lo relativo a: desplazamiento de bloques (desplazamiento vertical), carga de rotura y relación entre aberturas de fisura-desplazamiento vertical.
- 7) En hormigones con granulometría similar, independientemente de su consistencia, las diferencias de comportamiento no son apreciables (ni en carga máxima ni en resistencia residual).
- 8) En hormigones muy armados (mucho armadura transversal), los efectos fundamentales dependerán casi exclusivamente de la armadura transversal y las diferencias debidas a la estructura granular no serán importantes.
- 9) En hormigones poco armados transversalmente la influencia del tipo de hormigón o preparación de fisura será máxima.

5.1.3. Análisis de la respuesta frente a cortante de vigas prefabricadas con HT y HAC.

Se diseñaron 2 vigas armadas con misma sección y armado longitudinal idéntico, y con armadura transversal mínima que garantizara la rotura por cortante, de manera que, según las conclusiones del estudio de cizallamiento, la influencia del tipo de hormigón fuera máxima. La diferencia entre ellas fue el tipo de hormigón empleado, siendo éste el HT y HAC originalmente utilizado por la empresa colaboradora.

Al seleccionar un HT con estructura granular gruesa y un HAC con estructura fina se analizó el comportamiento en la situación más desfavorable desde el punto de vista del material.

Del estudio de resultados del ensayo sobre vigas se deduce:

- 1) En situación de servicio, las vigas de HAC y las de HT han presentado los mismos niveles de deformación (flechas) y aberturas de fisura similares.
- 2) Las vigas de HAC y las de HT alcanzan la misma resistencia última (carga de rotura).

- 3) Tras calcular el cortante último según los códigos: EHE, EC-2, CM-90 y ACI. Se observó que todos los códigos eran muy conservadores en la determinación del cortante. Los más conservadores fueron la EHE y el EC-2, pues el cortante analítico era más del doble (2,23 veces) que el cortante experimental. En el caso del CM-90, el valor analítico era el doble del experimental, siendo el ACI el menos conservador de los cuatro códigos estudiados, con un cortante último analítico de 1,82 veces el valor experimental.
- 4) En el ámbito de este estudio las vigas de HAC tienen una respuesta similar a las de un HT desde el punto de vista del comportamiento a cortante; por tanto, las empresas de prefabricados pueden producir elementos constructivos tipo viga con toda garantía y seguridad, ya que se ha comprobado que, en servicio, el comportamiento de las vigas de HT y HAC es el mismo tanto en aberturas como en flechas, y las cargas de rotura no varían.

5.1.4. Análisis de la respuesta frente a cortante de vigas prefabricadas con HRF.

Se diseñó un HRF a partir de la dosificación de HAC, no se pretendió optimizar las dosificaciones, únicamente se utilizó la dosificación de HAC que se emplea habitualmente en la empresa colaboradora y se le añadieron fibras.

Para comprobar el comportamiento del HRF a cortante se fabricaron 2 vigas: una de hormigón armado, con la misma geometría y armado que las vigas de HT y HAC, y otra viga pretensada con distinta geometría y armado.

De los ensayos se deducen las siguientes conclusiones:

- 1) Del estudio comparativo de las formulaciones para el cálculo a cortante entre el Anejo de Fibras de la EHE-08 (*Anejo 14 de EHE-08, 2008*) y la Normativa CNR-DT Italiana se deduce que ambos códigos difieren en los criterios con los que se analiza la contribución de las fibras a la resistencia a esfuerzo cortante. A pesar de ello, para contenidos medios en fibras y secciones de viga de proporciones usuales en construcción, el estudio paramétrico demuestra que las formulaciones de ambas normativas proporcionan valores similares, aunque difieren notablemente en los casos extremos, pues para dosificaciones reducidas de fibras, el Anejo de la EHE-08 resulta más conservador que la normativa Italiana, mientras que, para dosificaciones elevadas de fibras sucede lo contrario.
- 2) Con la adición de fibras se consigue una mejora notable en el comportamiento de las vigas, tanto en servicio como en rotura. El comportamiento de las vigas es mucho más dúctil, ya que las fibras controlan la aparición y la propagación de las fisuras.
- 3) Las fibras aumentan la resistencia última a cortante. En vigas armadas (con misma geometría y armado), la resistencia última a cortante (valor experimental) de la viga de HRF fue un 50.6% mayor que la de la viga de HAC. Y, en vigas pretensadas, la resistencia a cortante en la viga de HRF fue un 62.7% superior a la de la viga de HAC.

4) Tras comparar los valores de cortante experimentales con los obtenidos por cálculo según la formulación de la EHE-08, y determinando márgenes de seguridad, MS, ($MS = V_{experimental} / V_{teórico}$), se llegan a las siguientes conclusiones:

4.1) Factor de ala.

No es evidente que el coeficiente K_f (para tener en cuenta la contribución al cortante de las alas en secciones en T) actúe en el valor de V_{fu} de la viga armada de HRF, pues el canto del alma sin alas es de gran tamaño en comparación con el de las alas, de modo que, en el alma, puede desarrollarse la rotura por cortante. Si se elimina K_f de los cálculos, los resultados de la contribución de fibras, V_{fu} , siguen mostrando un margen de seguridad inferior a 1 en el caso de la viga de hormigón armado con fibras, aunque más ajustado. Sin embargo, en el caso de la viga pretensada de HRF, si se tiene en cuenta K_f , dicho margen de seguridad aumenta superando la unidad, tanto para ambos casos: con y sin armado transversal y, si no se tiene en cuenta K_f , el margen de seguridad es superior a 2. Por tanto, el factor de ala puede tener un mayor efecto en vigas pretensadas, e incluso podría actuar en vigas sin fibras.

4.2) Efecto de las fibras en las vigas pretensadas.

Al comparar los valores de cortante en las zonas sin estribos, el margen de seguridad para el caso de HAC ($MS=1,8$) es mayor que para el HRF ($MS=1,62$), aunque parece que el efecto de las fibras está valorado con mayor margen de seguridad ($MS=1,62$) que el de las armaduras ($MS=1,39$) o que, al menos, este margen es suficientemente grande y que, además, contribuye a evitar roturas por efectos secundarios, como la rotura por aplastamiento de la cabeza comprimida.

4.3) Colaboración de las fibras, V_{fu} .

La colaboración de las fibras (si se analiza por separado del resto de los factores que actúan en la resistencia a cortante) ha dado valores con márgenes de seguridad muy variables según el tipo de elemento.

5) Una de las conclusiones a las que se llega es que mediante el empleo de HRF se puede reducir parcial ó totalmente el armado transversal en vigas.

6) Los resultados experimentales obtenidos en cuanto a la resistencia a cortante, han sido, en todos los casos, mayores que los esperados mediante el empleo de la formulación del Anejo de fibras. Esto justificaría la propuesta de la Normativa Italiana de reducir los coeficientes de seguridad de 1,5 a 1,3, puesto que se trata de una rotura dúctil.

5.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

Aún así, sería muy interesante ampliar este estudio de la siguiente manera:

- Tras el ensayo de las probetas en “Z”, se observó que el tipo de rugosidad (lisa o rugosa) influía de manera importante en la carga de rotura, de aquí surge el planteamiento de ver hasta qué punto será de rugosa la fisura real dependiendo del:
 - Tipo de hormigón: HAC o HT. Con estructura granular gruesa o fina.
 - Tipo de sollicitación:
 - Tracción directa.
 - Tracción diagonal (cortante).

 Para ello resultaría interesante realizar ensayos de tracción directa o flexión sobre probetas cilíndricas y prismáticas para verificar cómo es la rugosidad real de la fisura de cortante.

- Sería muy interesante optimizar las dosificaciones de los hormigones ensayados. En los ensayos realizados se utilizaron los 2 hormigones empleados habitualmente en la empresa colaboradora, obteniendo otros dos variando únicamente la cantidad de aditivo con el fin de variar la consistencia. Lo que se propone es mejorar las dosificaciones para optimizar el comportamiento frente a cortante de los elementos constructivos.
- Otra propuesta sería la de realizar ensayos con superficie rugosa adecuada.
 -  Analizar el cortante según los distintos modos de rotura.
- Se debería profundizar en el concepto del coeficiente K_f , que tiene en cuenta el efecto ala en la contribución de las fibras al cortante, V_{fu} , para conocer su origen y cómo se justifica.
- En cuanto al modo de rotura de la viga pretensada con armadura transversal sin fibras, se debería analizar la aparición y evolución de fisuras de cortante (apertura máxima de fisuras como indicio de plastificación de armaduras) que se detectan previamente a la rotura por compresión en cabeza, para analizar si se estuviera próximo a la rotura.
- En este estudio, los valores de resistencia a flexotracción del hormigón de fibras se determinaron a partir de un número muy limitado de ensayos. Teniendo en cuenta que la dispersión en esta propiedad suele ser importante, la obtención de un valor característico fiable podría dar lugar a un valor real menor. Por tanto, para futuros trabajos será necesario afinar esta propiedad.
- Como conclusión final se puede deducir que la colaboración de las fibras ha dado valores con margen de seguridad muy variables según el tipo de elemento, si se analiza por separado del resto de los factores que actúan en la resistencia a cortante.

Por ello tiene sentido:

- Revisar la literatura y analizar los resultados experimentales con un criterio crítico similar al de este trabajo para discernir entre los fallos según las distintas contribuciones, para poder valorar realmente de qué depende la contribución de las fibras.
- Ampliar ensayos orientados en este fin.

Valencia, Noviembre de 2008

Estefanía Cuenca Asensio