

3. OBJETIVOS, PROGRAMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

3.1. OBJETIVOS

En este trabajo se pretende analizar el comportamiento frente a esfuerzo cortante de elementos estructurales prefabricados con hormigón autocompactante (HAC) y con hormigón reforzado con fibras (HRF).

Estos tipos de hormigones quedan fuera del campo de aplicación de la Instrucción EHE 98, en el HAC se debe tanto a su estructura granular, como a que su consistencia queda fuera del margen tipificado. A pesar de ello su aplicación en obra, y especialmente en prefabricación se está desarrollando mucho, hasta el punto de que varias empresas de prefabricación realizan toda su producción de elementos pesados con estos hormigones. Este vacío normativo quede cubierto con la aparición de los anejos de HRF y de HAC de la nueva EHE 2008.

La aplicación a estos hormigones de alguno de los criterios de cálculo aceptado por la EHE 1998 para los hormigones tradicionales se ha puesto en duda. En concreto el Ponente General de la EHE planteó en la jornada de presentación en Valencia del borrador "0" la necesidad de verificar la validez de las ecuaciones utilizadas en los cálculos de ELU de cortante.

Se pretende analizar la influencia de la utilización del HAC en el comportamiento estructural frente a cortante y verificar si su producción cumple con las exigencias de nuestra instrucción en este campo, o plantear las acciones pertinentes para que así sea.

Además, se pretenden comprobar las diferencias existentes entre armar una viga a corte únicamente con fibras y con las mismas añadiendo además armado transversal convencional. La contribución de las fibras junto con la contribución del armado transversal deberá resistir el cortante aplicado. Por otro lado, también se fabricará la misma viga sin fibras para poder comprobar las diferencias entre añadir fibras y no añadirlas.

3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL.

3.2.1. Descripción del trabajo.

Las críticas más frecuentes al HAC se han centrado en el tipo de rotura con fisura más lisa que el hormigón tradicional, suele plantearse que el efecto encajamiento de los áridos colaborará en menor medida al esfuerzo cortante. Sin embargo nuestra hipótesis se basa en proponer que las señales de alarma creadas se basan en experiencias HAC con dosificaciones con un contenido en finos excesivo, y que por lo tanto, con dosificaciones mejor diseñadas pueden llevar a comportamientos frente a esta propiedad similares a los de un hormigón tradicional (HT).

Para conocer el comportamiento a cortante en HAC y en HRF se hizo un estudio sobre probetas en "Z", en laboratorio, con diferentes dosificaciones del hormigón, diferente armado y diferente tratamiento en la zona de fisura (para un mejor análisis del fenómeno de engranamiento de áridos). Como se describió en el estado del arte, ya se han realizado ensayos de cortante en probetas tipo "Z", esto es así porque al someterlas a carga centrada se genera una rotura de cizalla entre los bloques.

Las variables del estudio se centraron en:

- la composición granulométrica del hormigón,
- la presencia de armaduras transversales a la sección de rotura,
- el nivel de autocompactabilidad del hormigón.

En estos ensayos se analizó la respuesta en "tensión de corte / deslizamientos (tanto de abertura de fisura como de deslizamiento de la fisura)" con diferentes dosificaciones, y se forzó una rotura por cortante, en la se mostró un especial interés en el "encajamiento o engranamiento de los áridos".

Con ello se pretendía analizar el efecto de encajamiento en HAC en función de las variables analizadas, evidentemente comparando siempre con hormigones tradicionales. Por tanto, se comparará el comportamiento a corte entre probetas fabricadas con hormigón autocompactante y hormigón tradicional.

Además, se realizó un estudio experimental de la respuesta frente a esfuerzos cortantes de vigas prefabricadas con hormigones autocompactantes, de diferentes grados de autocompactabilidad y características mecánicas equivalentes, y vigas prefabricadas de HRF.

3.2.2. Programa experimental.

3.2.2.1. Estudio del efecto engranamiento de áridos en probetas tipo "Z".

Se planteó un programa experimental para analizar las variaciones en el comportamiento frente a esfuerzos cortantes cuando se utiliza hormigón tradicional (HT) u hormigón autocompactante (HAC) con diferentes estructuras granulares.

Para realizar los ensayos de cizallamiento sobre HAC, se fabricaron 46 probetas tipo "Z". Este tipo de probetas, como se vió en el estudio bibliográfico (Capítulo 1) son las que se utilizan para estudiar el esfuerzo cortante, ya que al someterlas a una carga centrada en su eje, las probetas sufren una rotura de cizalla.

Cada una de estas probetas tiene las siguientes dimensiones, dadas en milímetros:

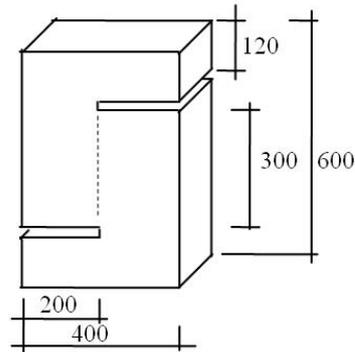


Figura 3.1. Dimensiones de la probeta Z. (Datos en mm).
Profundidad de la probeta=120mm. E.Cuenca (2008)

Fue necesaria hacer una buena planificación de los ensayos para poder dar respuesta a las críticas planteadas. Para ello se tuvieron en cuenta una serie de variables.

- **Variables analizadas en el estudio del efecto de engranamiento de áridos.**

Se fabricaron probetas tipo “Z” con un armado base ($\varnothing 10$) pero con distintos tipos de refuerzo transversal. Algunas probetas no tenían refuerzo transversal (sólo tenían el refuerzo base), otras además del refuerzo base tenían un armado transversal formado por 3 cercos $\varnothing 6$, y otras tenían armado base y refuerzo transversal formado por 4 cercos $\varnothing 10$.

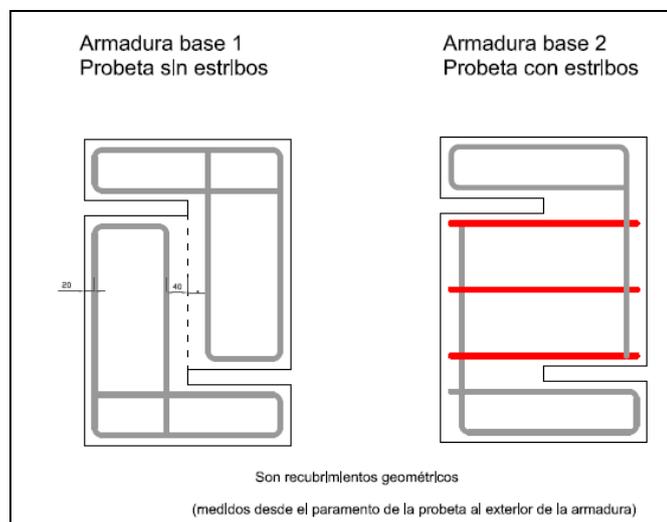


Figura 3.2. Armado base de las probetas “Z”. E.Cuenca (2008).

Por otro lado, se fabricaron probetas sin prefisura y otras con prefisura: lisa, rugosa fina, rugosa gruesa y rugosidad con tratamiento de inhibidor de fraguado.

Se fabricaron probetas “Z” con 6 tipos de hormigones:

- Hormigón tradicional H-35. (H-35 Normal)
- Hormigón tradicional H-35, pero con una consistencia más blanda que el hormigón anterior. (H-35 Fluido).

3. Objetivos, Programa Experimental y Metodología.

- Hormigón autocompactante A-35, de consistencia poco fluida. (A-35 Duro).
- Hormigón autocompactante A-35. (A-35 Normal).
- Hormigón tradicional H-35 + fibras: 60 Kg./m³. (H-35 Normal + F).
- Hormigón autocompactante A-35, de consistencia poco fluida + fibras: 60 Kg./m³. (A-35 Duro + F).

De cada combinación de variables se hicieron 2 probetas iguales, para obtener una mayor fiabilidad de resultados. Y para hacer un control del hormigón fabricado en central se hicieron 3 probetas cilíndricas de 15x30 por cada amasada.

El programa experimental y las variables comentadas se resumen en la *Tabla 3.1*.

Día	Ensayo No.	Refuerzo Transversal	Prefisura	Hormigón	Moldes un.	Probetas un.	Piezas	6 Probetas 15x30																
1°	A	Ninguno	No	H-35 Normal	2	6 1ª	A1 A2	A																
	B	3 ø6	No	H-35 Normal	2		B1 B2																	
	C	4 ø10	No	H-35 Normal	2		C1 C2																	
2°	D	3 ø6	Lisa	H-35 Normal	2	6 2ª	D1 D2	D																
	E	3 ø6	Rugosa FI	H-35 Normal	2		E1 E2																	
	F	3 ø6	Rugosa GR	H-35 Normal	2		F1 F2																	
3°	G	Ninguno	No	H-35 Fluido	2	6 1ª	G1 G2	G																
	H	3 ø6	No	H-35 Fluido	2		H1 H2																	
	I	4 ø10	No	H-35 Fluido	2		I1 I2																	
4°	J	3 ø6	Rugosa GR	H-35 Fluido	2	6 2ª	J1 J2	J																
	K	Fibras 60kg/m3	No	H-35 Normal + F	2	6	K1 K2	K																
	L	Fibras 60kg/m3	No	A-35 Duro + F	2	6	L1 L2	L																
5°	M	Ninguno	No	A-35 Duro	2	6 1ª	M1 M2	M																
	N	3 ø6	No	A-35 Duro	2		N1 N2																	
	O	4 ø10	No	A-35 Duro	2		O1 O2																	
6°	P	3 ø6	Lisa	A-35 Duro	2	6 2ª	P1 P2	P																
	Q	3 ø6	Rugosa FI	A-35 Duro	2		Q1 Q2																	
	R	3 ø6	Rugosa GR	A-35 Duro	2		R1 R2																	
7°	S	Ninguno	No	A-35 Normal	2	6 1ª	S1 S2	S																
	T	3 ø6	No	A-35 Normal	2		T1 T2																	
	U	4 ø10	No	A-35 Normal	2		U1 U2																	
8°	V	3 ø6	Rugosa GR	A-35 Normal	2	6 2ª	V1 V2	V																
9°	W	3 ø6	Inhibidor Frag.	A-35 Normal	2		W1 W2																	
					46	60																		
<table border="0"> <tr> <td>H-35 Normal</td> <td>Hormigón H-35 normal</td> </tr> <tr> <td>H-35 Fluido</td> <td>Hormigón H-35 fluido</td> </tr> <tr> <td>A-35 Normal</td> <td>Hormigón Autocompactante A-35 normal</td> </tr> <tr> <td>A-35 Duro</td> <td>Hormigón Autocompactante A-35 con menos fluidez</td> </tr> <tr> <td>Rugosa GR</td> <td>Rugosidad grano grueso</td> </tr> <tr> <td>Rugosa FI</td> <td>Rugosidad grano fino</td> </tr> <tr> <td>Lisa</td> <td>Sin rugosidad</td> </tr> <tr> <td>Inhibidor Frag.</td> <td>Con inhibidor de fraguado lavado a 15 horas aprox.</td> </tr> </table>									H-35 Normal	Hormigón H-35 normal	H-35 Fluido	Hormigón H-35 fluido	A-35 Normal	Hormigón Autocompactante A-35 normal	A-35 Duro	Hormigón Autocompactante A-35 con menos fluidez	Rugosa GR	Rugosidad grano grueso	Rugosa FI	Rugosidad grano fino	Lisa	Sin rugosidad	Inhibidor Frag.	Con inhibidor de fraguado lavado a 15 horas aprox.
H-35 Normal	Hormigón H-35 normal																							
H-35 Fluido	Hormigón H-35 fluido																							
A-35 Normal	Hormigón Autocompactante A-35 normal																							
A-35 Duro	Hormigón Autocompactante A-35 con menos fluidez																							
Rugosa GR	Rugosidad grano grueso																							
Rugosa FI	Rugosidad grano fino																							
Lisa	Sin rugosidad																							
Inhibidor Frag.	Con inhibidor de fraguado lavado a 15 horas aprox.																							

Tabla 3.1. Planificación de la fabricación de las probetas. E. Cuenca (2008)

3.2.2.2. Ensayo de vigas de HT, HAC y HRF.

A) Elección del elemento viga.

El objetivo de este proyecto, es el de poder asegurar a las empresas de prefabricados que, los elementos que producen con hormigón autocompactante (HAC), son tan fiables estructuralmente como los elementos fabricados con hormigón tradicional (HT). Además, se pretende también conocer mejor el comportamiento frente a cortante del hormigón reforzado con fibras (HRF) y comparar el valor de cortante obtenido en el ensayo con el valor calculado mediante el Anejo de fibras de la nueva EHE 2008.

Durante el estudio bibliográfico vimos que se planteaban algunas dudas acerca del HAC. Se apuntaba a que el HAC diera lugar a unas caras de fisura más lisas que el hormigón tradicional y que, por tanto, se comportara peor frente a la resistencia a esfuerzo cortante. Por otra parte, tampoco se tiene un conocimiento profundo del comportamiento del HRF a cortante, o si éste, puede sustituir o no al armado transversal.

Nuestro objetivo no era diseñar una sección transversal y que nos la fabricaran, sino dar solución al problema real. Por ello, se eligieron vigas cuya sección transversal estaba en el catálogo de la empresa. Por tanto, eran vigas fabricadas dentro del ciclo de producción habitual de la empresa.

Se fabricaron 5 vigas. Dos vigas pretensadas y tres de hormigón armado:

Viga 1 =Viga D → Viga Pretensada (A-45)
Viga 2 =Viga E → Viga Pretensada (A-45 + fibras)
Viga 3 =Viga B → Viga Armada (A-35)
Viga 4 =Viga C → Viga Armada (A-35 + fibras)
Viga 5 =Viga A → Viga Armada (H-35)

Nota: A= Hormigón Autocompactante; H= Hormigón Tradicional.

Tabla 3.2. Vigas ensayadas

Las vigas armadas tenían la misma longitud: 7.88 m. Mientras que las vigas pretensadas tenían una longitud de 6.66m.

La dosificación del hormigón autocompactante (HAC) es el que utiliza diariamente esta empresa de prefabricados. Además, destacar que la gran mayoría de los elementos fabricados en dicha empresa de prefabricados son de HAC.

Las dosificaciones de las vigas fueron las siguientes:

Referencia	A	B	C	D	E
Número de Amasada	96142	96191	96237	96771	96814
Fecha+hora	05-mar-2008 16:50	06-mar-2008 16:36	07-mar-2008 16:23	01-abr-2008 17:22	02-abr-2008 13:08
Tipo de hormigón	H-35	A-35	A-35+Fibras	A-45	A-45+Fibras
Viga	Armada	Armada	Armada	Pretensada	Pretensada
Cemento CEM I 52.5R LAFARGE kg	296	344	331	410	398
Grava SOINVAL (6/10mm) kg	952	844	854	793	793
Arena Blanca ARISAN kg		978	1030	1028	1029
Arena Lavada PARDO & BALLESTER kg	846				
Cantidad total de agua kg	104	173	168	169	175
Relación a/c	0.35	0.50	0.51	0.41	0.44
Fibras DRAMIX kg			60		60
Fluidificante - SIKA Viscocrete 5720 l	4.0	8.6	8.5	9.5	9.5
Acelerante - SIKA Sikaset 3 l	4.8	5.4	5.4		
Destensado				07-abr-2008 12:00	07-abr-2008 12:00
Edad al destensar h				139	119
Contraflecha al destensar cm				0.4	0.4
% de Humedad en arena PARDO&BALLESTER	5.1%				
% de Humedad en arena ARISAN		2.0%	1.9%	1.8%	1.9%
Agua de inicio kg	39	145	140	135	139
Agua en arena kg	43	20	20	19	19
Agua de afino kg	22	8	8	16	17
Tiempo de mezclado (seg)	198	122	139	153	101
Cantidad amasada m ³	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Asentamiento cm	17		20		
Escurrimiento cm		66	70	60	40
Temperatura ambiental °C	nd	nd	nd	19°C	20°C
Temperatura del hormigón °C	26°C	26°C	31°C	30°C	29°C

Tabla 3.3. Datos de dosificación de las vigas

***Observaciones respecto a la dosificación:**

Las cantidades pesadas de arena son netas, ya descontada el agua de humedad.

La cantidad de agua incluye: agua de inicio + agua de arena + agua de ajuste de fluidez.

Las cantidades son para 1 m³.

B) Armado de las vigas.

Lo que se hizo fue calcular un armado para las vigas, de modo que, cuando se ensayaran en laboratorio, la rotura fuera por cortante (para mayor detalle, véase *Proyecto Final de Carrera, E. Cuenca, 2008*). Y este armado se le proporcionó a la empresa de prefabricados. Proyectista y tutor estuvieron presentes durante la fabricación de las vigas.

Una vez elegida una sección transversal del catálogo de la empresa de prefabricados, nos dispusimos a calcular su armado. Se buscaba disponer un armado, de modo que la rotura de la viga tuviera lugar por cortante. Para ello se sobredimensionaron las vigas a flexión.

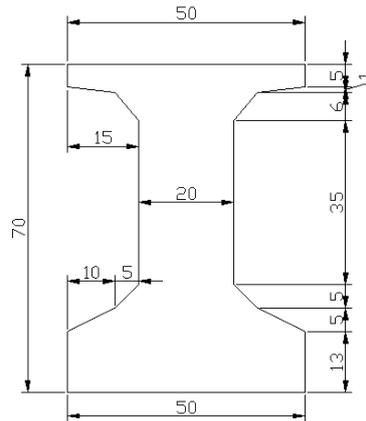


Figura 3.3. Dimensiones de la sección transversal de las vigas armadas (Datos en cm)

El armado calculado para las tres vigas armadas es el mismo y constante a lo largo de toda la viga. Se dispondrá el siguiente armado longitudinal:

COMPRESIÓN → $As' = 4'52 \cdot 10^{-4} m^2$ ($4\phi 12$) [Armadura superior]

TRACCIÓN → $As = 39'27 \cdot 10^{-4} m^2$ ($8\phi 25$) [Armadura inferior]

Además, en centro del alma pongo armadura de piel = $2\phi 12$.

Y, como armado transversal: $c\phi 8 / 30$ cm

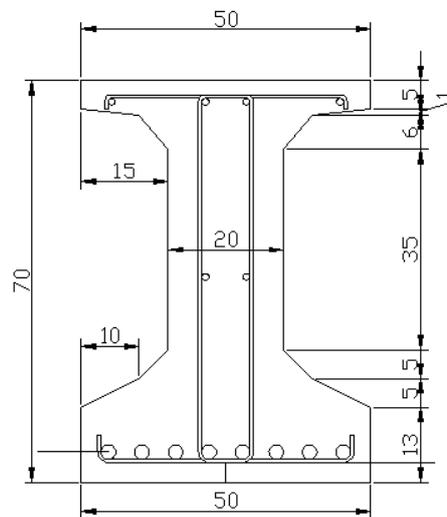


Figura 3.4. Armado de la viga

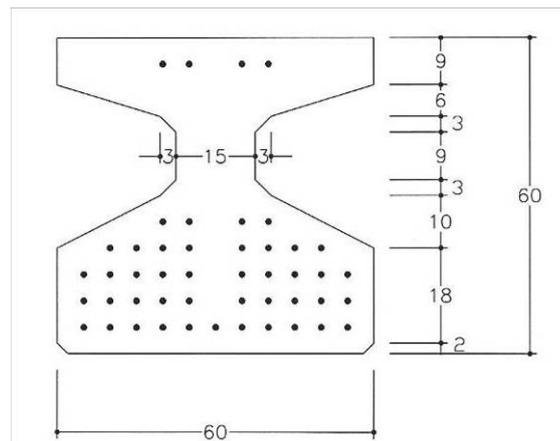


Figura 3.5. Dimensiones de la sección transversal de las vigas pretensadas (Datos en cm)

Las vigas pretensadas se sobredimensionaron a flexión con la suficiente armadura activa para forzar una rotura por cortante. Se dispusieron 25 cables pretensados en el ala inferior, mientras que únicamente se dispusieron 2 en el ala superior. Se envainaron los 10 cables pretensados de la fila 2 hasta una distancia de 1.35m desde el extremo de la viga. Al estar envainados, el pretensado de dichos cables no se transmitirá en la zona envainada, sino que se realizará progresivamente a partir de donde termina el envainado.

Respecto del armado transversal a colocar distinguiremos dos zonas de las vigas. La zona A es aquella comprendida entre el extremo izquierdo de la viga y el punto de aplicación de la carga puntual izquierda mientras que la zona B corresponde a aquella situada entre el extremo derecho de la viga y el punto de aplicación de la carga puntual derecha.

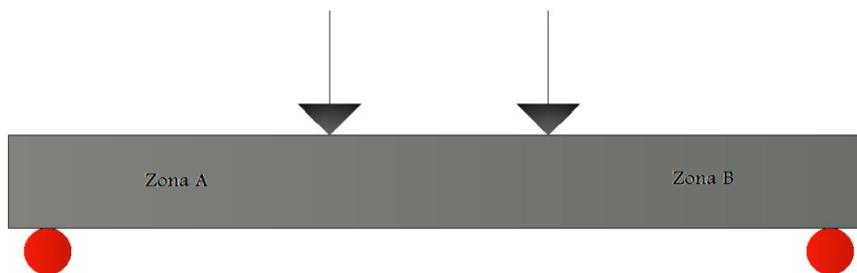


Figura 3.6. Distinción de las dos zonas de armado transversal.

El objetivo del experimento reside por un lado en comprobar la eficacia de las fibras actuando en solitario para resistir el esfuerzo cortante y por otro lado apreciar el comportamiento de la viga cuando están colaborando las fibras y el armado transversal convencional. También se estudiará el comportamiento de las fibras actuando únicamente con la armadura activa y el efecto del envainado con las fibras. La zona A se armará con el armado transversal que se había calculado inicialmente para el tramo I:

$$A_{\alpha} = 16,349 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

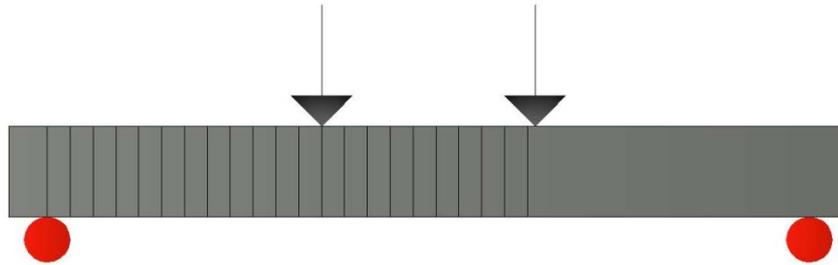


Figura 3.7. Zonas de armado transversal.

- El armado transversal que se incluiría con esa cuantía sería el siguiente:
- Estribos en el alma: c Φ 12/15
 - Refuerzo en el apoyo de estribos: 5 Φ 12 intercalados en los primeros estribos.
 - Refuerzo por rasante en las alas: c Φ 10/15

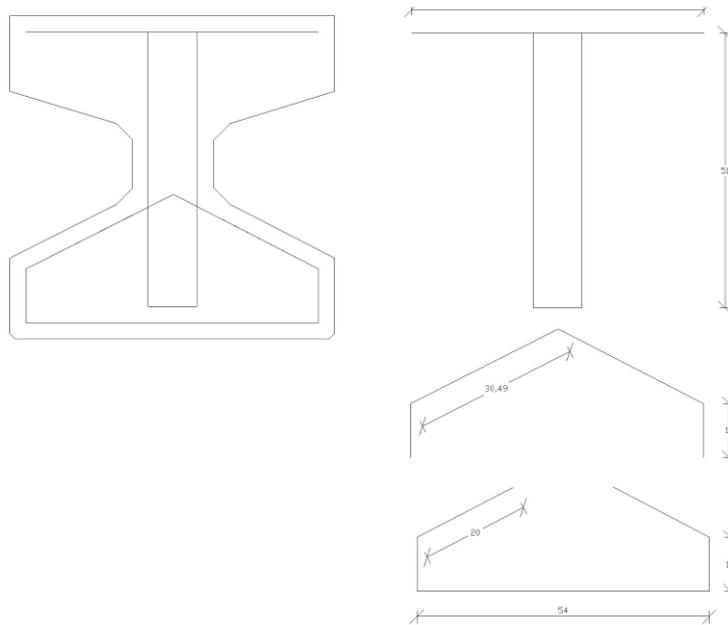


Figura 3.8. Armado transversal dispuesto. En cm.

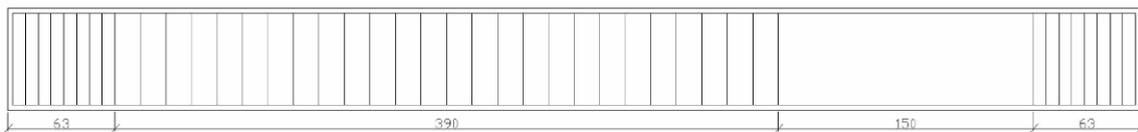


Figura 3.9. Distribución del armado transversal. En cm.

La zona con estribos total será de 4,68m con un total de 31 estribos.

Por otro lado la zona B se dejará sin armadura transversal convencional. Esto quiere decir que el esfuerzo cortante será resistido por la contribución a la resistencia a corte del hormigón y de las fibras.

3.3. METODOLOGÍA.

3.3.1. Fabricación de probetas y vigas.

3.3.1.1. Fabricación de probetas "Z".

A) Tipologías de probetas "Z" según armado y rugosidad en zona de cizalla.

En la *figura 3.10* se observan los encofrados y las armaduras para las probetas dispuestas para ser hormigonadas.



1



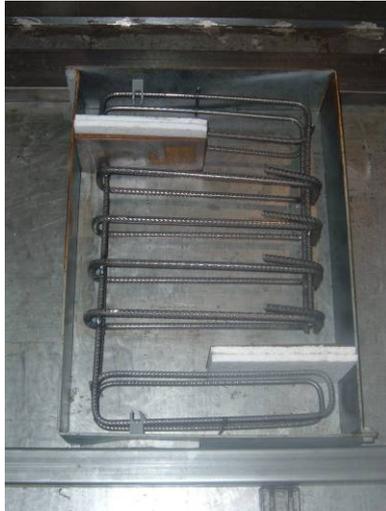
2



3



4



5



6

1. Armadura transversal: 3 ϕ 6. Prefisura con rugosidad fina.
2. Armadura transversal: 3 ϕ 6. Prefisura con rugosidad gruesa.
3. Armadura transversal: 3 ϕ 6. Prefisura lisa.

4. Armadura transversal: 3 ϕ 6. Sin prefisura.
5. Armadura transversal: 4 ϕ 10. Sin prefisura.
6. Sin armadura transversal y sin prefisura.

Figura 3.10. Tipologías de armado de las probetas Z. E. Cuenca (2008)

B) Preparación de la zona de fisura.

Se realizaron distintos acabados en la zona de fisura (área de cizallamiento de 300mm x 120mm), dando lugar a las siguientes rugosidades:

<u>Ninguna</u>	Hormigonado de una sola vez.
<u>Rugosa GR</u>	Hormigonado en 2 fases separadas por la zona prevista de rotura un separador de PVC y colocando como encofrado en esta zona una malla de plástico con paso fino en el contacto con el elemento separador y encima de esta otra malla de plástico con paso grueso. Al poner dos mallas creamos una rugosidad artificial de mayor profundidad que si colocáramos una sola malla.
<u>Lisa</u>	Hormigonado en 2 fases separadas por la zona prevista de rotura un separador de PVC liso.
<u>Rugosa FI</u>	Hormigonado en 2 fases separadas por la zona prevista de rotura un separador de PVC y colocando como encofrado en esta zona una malla de plástico con paso fino.

Rugosidad conseguida con inhibidor de fraguado:

Para generar otro tipo de rugosidad, se hormigonó la mitad de una probeta y se puso en la superficie de posterior contacto inhibidor de fraguado, a las 15h, aproximadamente, se lavó la superficie quedando los áridos a vista, después de esto, se pasó a hormigonar la otra mitad de la probeta.

En las fabricaciones en dos fases:

- Se utilizó desencofrante en la zona antes de verter la segunda capa.
- Las armaduras transversales se colocaron previamente, atravesando la placa de separación y la malla.
- En superficie rugosa, antes de verter la segunda capa se rascó con cepillo de púas para eliminar las partes mal adheridas.

Al hormigonar en 2 fases estamos generando una prefisura, estamos facilitando la rotura por esa zona pues así podemos estudiar lo que ocurre cuando la fisura ya ha tenido lugar, y analizar así el fenómeno del encajamiento de áridos, en distintas tipologías de probeta, variando: tipo de hormigón, rugosidad en la zona de fisura y armado transversal. De esta manera, se fabricaron distintos tipos de probetas que nos permitían tener en cuenta todos los factores que influyen en el comportamiento a cortante.



Figura 3.11. Probeta hormigonada en dos fases

c)Vistas de detalle y acabados en las zonas de prefisura.

A continuación, se observa la preparación de las zonas de prefisura y su aspecto final.

	Preparación	Aspecto de la prefisura
Prefisura Lisa		
Prefisura Rugosa Fina		

<p>Prefisura Rugosa Gruesa</p>		
<p>Prefisura Inhibidor de Fraguado</p>		

Tabla 3.4. Preparación y aspecto de las prefisuras. E. Cuenca (2008)

3.3.1.2. Fabricación de vigas.

Las vigas fueron fabricadas en PREVALESA, con el armado de cálculo previamente calculado de modo que se produjera una rotura de cortante.

A continuación se observan unas imágenes de la fabricación de las vigas:



Figura 3.12. Fabricación de las vigas.



Figura 3.13. Viga hormigonada



Figura 3.14. Viga durante el hormigonado y aspecto final. Detalle de las fibras en el hormigón.

3.3.2. Programa de ensayos.

3.3.2.1. Probetas de acompañamiento.

En cada amasada del hormigón para probetas en "Z" se fabricaron 6 probetas cilíndricas, para ensayo a 28 días:

- 3 probetas para rotura a compresión simple
- 3 probetas para determinaciones de módulo de deformación

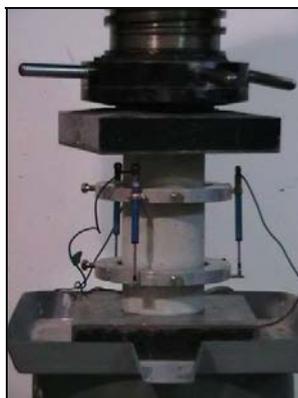


Figura 3.15. Determinación del módulo de deformación

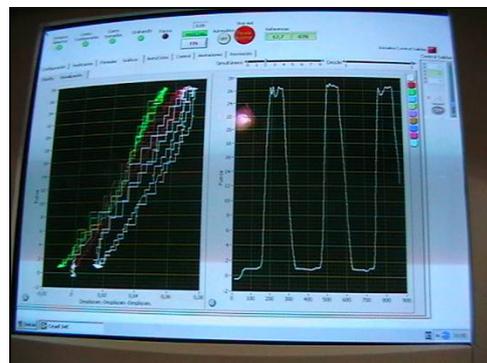


Figura 3.16. Programa de ordenador para obtención de datos necesarios para determinar el módulo de deformación



Figura 3.17. Prensa ICON para medición de resistencia a compresión de las probetas y determinación de módulos de deformación.

En hormigón de fibras se fabricarán además dos probetas prismáticas 150x150x600 mm.

También se hicieron probetas de acompañamiento de cada tipo de hormigón con el que se fabricaron las vigas para hacer un control de la calidad del hormigón. En cuanto al HRF, además de las probetas cilíndricas también se hicieron probetas prismáticas de 150x150x600mm para determinar su resistencia a flexotracción.

3.3.2.2. Descripción de los ensayos en las probetas "Z".

Los ensayos se organizaron de la siguiente manera:

En primer lugar, se agruparon las probetas según la fecha de fabricación. En cada palet, se pusieron las probetas que se fabricaron en un mismo día. Esto es necesario, pues la rotura de las probetas se hizo a los 28 días de su fabricación, para que tuvieran prácticamente toda su resistencia.

El ensayo de las probetas Z consistía en aplicar una carga centrada de modo que se generara una rotura de cizallamiento en la probeta por la zona prefijada (eje central de la probeta), en función del tipo de hormigón y de la rugosidad de la prefisura, la fisura de cortante se propagó de una manera u otra (esto se verá con más detenimiento en el *Capítulo 4*).



Figura 3.18. Pórtico para rotura de probetas en Z y centrado de la carga.

Dentro de cada grupo de probetas se empezaron a romper las probetas sin armado transversal, ya que al no disponer de dicho armado al someter a carga la probeta ésta rompía de forma frágil, por lo tanto, de estos ensayos únicamente se midió la carga de rotura. A continuación, se rompieron el resto de probetas del grupo, ya con armado transversal. Estas probetas, al estar armadas transversalmente, sufrían una rotura dúctil por lo que era posible medir: desplazamiento entre los bloques, a un lado y otro de la zona de cizalla, y aberturas de fisura, además de la carga de rotura.

Para que las probetas rompieran correctamente por la zona de cortante y no por la cabeza, se dispusieron chapas de acero de 0.8 cm de espesor sobre las caras de apoyo de la probeta que apoyaban en el pórtico. Había dos tipos de chapas de acero, unas chapas rectangulares que se pegaban en las citadas caras para las probetas con prefisura con armado $3\Phi 6$, y otro tipo de chapas soldadas en ángulo recto para proteger las esquinas de las probetas con armado $3\Phi 6$ sin prefisura, o con armado $4\Phi 10$. Estas chapas se pegaban a las probetas con resina epoxi Sikadur 31 (componente químico que consistía en dos fases A+B que había que mezclar).

En la *tabla 3.5* se recoge la planificación de rotura de las probetas:

FASE	PROBETA	PROBETAS	
1	1ª) CILINDRICAS	1.1.) Rotura a compresión	A,AA; D,DD; M,MM; P,PP.
		1.2.) Módulos de deformación	A,AA; D,DD; M,MM; P,PP.
	2ª) Z	2.1.) Probetas sin armado transversal (sin captadores)	A1,A2; M1,M2.
		2.2.) Probetas con armado transversal 3 fi 6 (con captadores)	B1,B2; C1,C2; D1,D2; E1,E2; F1,F2; H1,H2; P1,P2; Q1,Q2; R1,R2.
		2.3.) Probetas con armado transversal 4 fi 10 (con captadores)	O1,O2.
2	1ª) CILINDRICAS	1.1.) Rotura a compresión	G,GG; J,JJ; K,KK; L,LL.
		1.2.) Módulos de deformación	G,GG; J,JJ; K,KK; L,LL.
	2ª) PRISMÁTICAS	2.1.) Rotura a flexión	K,KK; L,LL.
	3ª) Z	3.1.) Probetas sin armado transversal (sin captadores)	G1,G2.
		3.2.) Probetas hormigón con fibras sin armado transversal (con captadores)	K1,K2; L1,L2.
		3.3.) Probetas con armado transversal 3 fi 6 (con captadores)	H1,H2; J1,J2.
		3.4.) Probetas con armado transversal 4 fi 10 (con captadores)	I1,I2.
3	1ª) CILINDRICAS	1.1.) Rotura a compresión	S,SS; V,VV.
		1.2.) Módulos de deformación	S,SS; V,VV.
	2ª) Z	2.1.) Probetas sin armado transversal (sin captadores)	S1,S2.
		2.2.) Probetas con armado transversal 3 fi 6 (con captadores)	T1,T2; V1,V2; W1,W2.
		2.3.) Probetas con armado transversal 4 fi 10 (con captadores)	U1,U2.

Tabla 3.5. Planificación de la rotura de probetas

- **Medidas efectuadas.**

Para medir el desplazamiento entre los bloques se dispuso, cercano a la zona de fisura (eje vertical central de la probeta), un captador de desplazamiento potenciométrico de 125mm de tolerancia. Y, para medir aberturas de fisura se dispusieron 3 captadores de desplazamiento potenciométricos de 50mm de tolerancia cada uno. Se puso un captador de desplazamiento horizontal en medio de la zona de cizalla, en la misma cara que el captador de desplazamiento vertical. Y, en la otra cara de la probeta, se pusieron los otros 2 captadores horizontales, uno en la parte superior de la zona de cizalla y otro en la parte inferior. Se pusieron 3 captadores de desplazamiento horizontal para tener datos de abertura de fisura en 3 puntos de la probeta, ya que estos valores no tenían porqué ser los mismos, ya que podía producirse giro entre los bloques.

Los captadores de desplazamientos utilizados fueron los siguientes:



Figura 3.19. Captadores de desplazamientos para medir deslizamiento de bloques y aberturas de fisura. (Captador de 50mm para aberturas y de 125mm para deslizamientos).



Figura 3.20. Colocación de los captadores de desplazamiento en las probetas

3.3.2.3. Descripción de los ensayos en vigas.

A) Planteamiento del ensayo.

Las vigas fabricadas se ensayaron en laboratorio. Se tomaron medidas de flecha en tres puntos de la viga: en centro luz y en los extremos a tres cantos de la luz, aberturas de fisura a lo largo del ensayo y carga de rotura.

Para las cinco vigas se tomará una longitud de vano de cortante igual a $3h$, de este modo, las vigas armadas tendrán un vano de cortante de $3 \cdot 0.70 = 2.1$ m, mientras que las vigas pretensadas tendrán un vano de cortante de $3 \cdot 0.60 = 1.8$ m. Con este vano de cortante se consigue una rotura de cortante adecuada, pues con un vano de cortante menor el efecto arco sería muy acusado y con un vano de cortante mayor podría darse una rotura por flexión, así pues tomamos un valor intermedio, adecuado para que se dé una rotura de cortante.

En las vigas pretensadas lo que se pretendía era que al ensayar la viga primero rompiera por cortante en la zona B donde no hay armadura transversal de refuerzo. Se realizó una estimación de lo que debería resistir la viga en dicha zona. Posteriormente, una vez alcanzada la rotura, se colocó una capucha en la zona B de forma que la misma quedara confinada. Se desplazó el apoyo de la viga y las cargas del gato para proceder de nuevo a la rotura de la viga. Se realizó previamente una estimación de la carga de rotura por cortante que se produjo y se elevó la carga a la que estaría sometida la viga para que se produjera la rotura en la zona A.

Al colocar la capucha lo que se pretendía era evitar que la zona B fuera una zona débil y lo que se buscaba era que se produjera la rotura por cortante en la zona A. La zona A resistía más que la B ya que poseía la contribución de las fibras, la del hormigón y la de la armadura transversal a cortante.

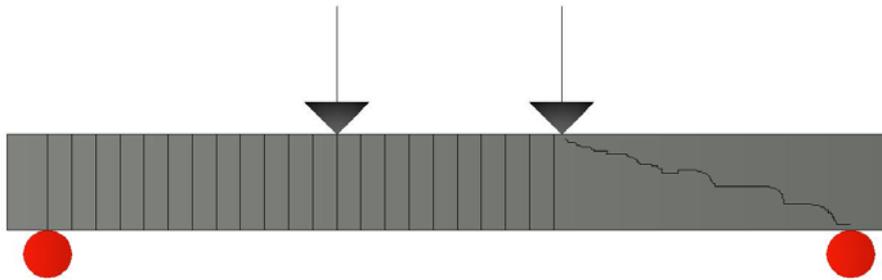


Figura 3.21. Primera parte (fase 1) del ensayo. Rotura zona B.

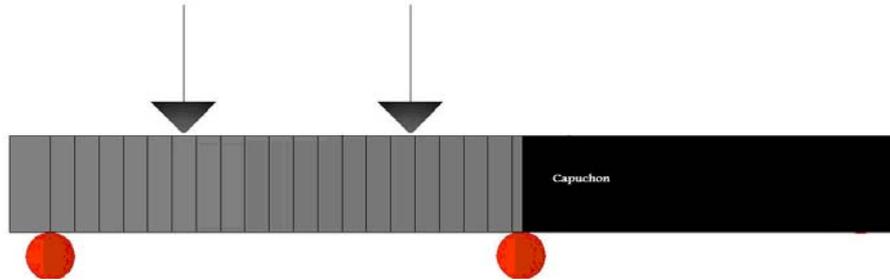


Figura 3.22. Segunda parte (fase 2) del ensayo. Rotura zona A.

B) Montaje del ensayo e instrumentación.

Se tuvo que montar un pórtico adrede para realizar los ensayos en las vigas. Para materializar el montaje propuesto durante el diseño para el cálculo de la armadura necesaria, se dispusieron dos dinteles apoyados en basas para apoyar la viga. Después, sobre la viga, se dispusieron dos dinteles de sección cuadrangular, para materializar las dos fuerzas puntuales aplicadas sobre la viga, sobre ellos se apoyaba un dintel de mayores dimensiones sobre el cual aplicaba la fuerza un gato de 100 toneladas. El gato se enganchó a un pórtico en dirección perpendicular a la dirección de la viga, a la altura de centro-luz.



Figura 3.23. Imágenes del acopio de las vigas en el laboratorio

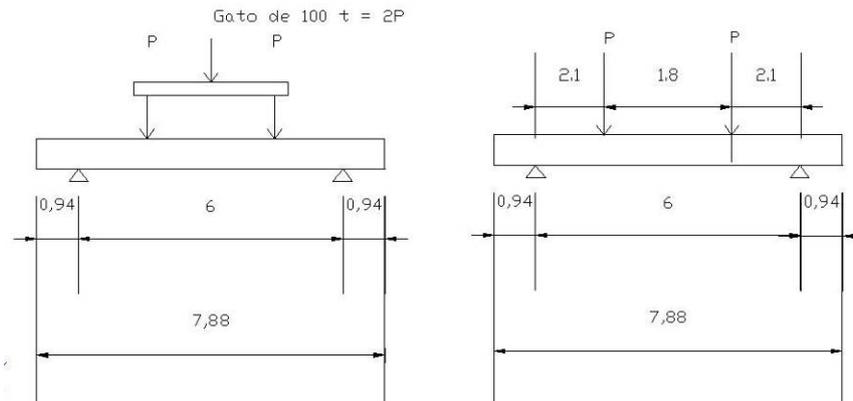


Figura 3.24. Esquema del montaje de la viga en el pórtico (Datos en metros). En este caso concreto, los valores se corresponden con los de las vigas armadas.

Las vigas se transportaron de la planta de prefabricados hasta el laboratorio de Construcción, donde fueron ensayadas hasta llegar a rotura. Durante el ensayo, se dispuso la instrumentación necesaria para tomar medidas de: flecha, abertura de fisuras y carga.

Para medir **flechas** se utilizaron captadores potenciométricos de 125 mm de tolerancia. Los captadores se engancharon a unas barras metálicas introducidas en basas circulares. Se dispusieron tres captadores: uno en centro-luz y dos a mitad de longitud entre apoyo y cada carga. Los datos medidos por los captadores eran recogidos en el ordenador, de modo que, además del valor de la flecha, tomábamos **tiempo transcurrido del ensayo y carga**.

Una vez finalizado el ensayo, se midieron las **aberturas de fisura** finales, con ayuda de un fisurómetro. También, se midió la **inclinación de las fisuras de cortante**. Esto serviría para hacer posteriormente un recálculo de la viga con la resistencia a compresión obtenida de la rotura de las probetas cilíndricas (f_{ck}) y con la nueva inclinación de bielas (ϑ). Además, se hicieron videos durante todo el ensayo. Se dispuso una cámara en cada zona de cortante de la viga, esto es, en el canto central entre la carga y el apoyo (como se ha dicho, la distancia entre la carga y el apoyo (vano de cortante) es de 3 cantos ($3h$), por tanto, se puso una cámara en el canto central en cada uno de los lados de la viga. De esta manera, había un seguimiento total de las zonas de fisura y posterior rotura por cortante.

Aunque no estaba previsto inicialmente en el proyecto, se ha hecho uso de un programa que se está desarrollando en el departamento para tomar medidas de ensayos a partir de sus videos. Con el tratamiento de las imágenes tomadas en el vano de cortante que acabó rompiendo, se determinó la abertura de fisuras a lo largo de todo el ensayo. Además de video, se hacían 25 fotos por segundo, de modo que, además de determinar aberturas de fisura en cada instante, pudimos analizar la evolución de las fisuras a lo largo del ensayo.