



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
INGENIERÍA DE  
EDIFICACIÓN



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# Proyecto fin de carrera

**Estudio del HACRF-P sometido a  
esfuerzo de flexión**

Alumnos:

Chuliá Sequí, Vicente  
Garrido Benaches, Fernando

Tutor:

Albio Ibañez, Jose Ramón  
García Ballester, Luis Vicente

Junio del 2013

Taller I17. Materiales Avanzados

# Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar queremos agradecer a nuestros tutores José Ramón Albiol Ibañez y Luis Vicente García Ballester por su empeño y esfuerzo durante nuestro PFG, ya que sus conocimientos y consejos han sido la mejor guía posible para la realización de este proyecto.

A los técnicos del laboratorio Rafa y Jesús, por ayudarnos cada día y resolver todas las dudas que la práctica nos planteaba.

A nuestros compañeros de taller de Proyecto Final de Grado, por la ayuda que nos han dado a lo largo de la ejecución del proyecto. Y a nuestras compañeras Raquel Pardo Hernández y Vanessa Armero Lavie en la elaboración del proyecto, los cuatro hemos formado un grupo de trabajo.

A las empresas SIKA y CEMENTVAL por habernos proporcionado el material que ha hecho posible este proyecto.

Como agradecimientos personales, de parte del alumno Fernando Garrido Benaches; le agradezco a toda mi familia por soportarme este año que no ha sido tarea fácil. A mis amigos de la carrera Alfredo Martínez Vidal y Sergio Martínez Altarejos, a mis amigos que me han ayudado cada día Javier Ribes Sanchez y Alex Ruiz Larrea Pascual y a mi amigo y compañero Vicente Chuliá Sequi, que ha sido un placer tenerlo a mi lado en este proyecto.

Por último, agradecer a Belén Folgado de la Herrán cada esfuerzo que ha hecho durante estos 4 años de carrera, ya que gracias a ella ha sido todo mucho más sencillo.

Como agradecimientos personales, de parte del alumno Vicente Chuliá Sequi; le agradezco a toda mi familia todo el apoyo que me han dado estos años de carrera universitaria, donde siempre han confiado en mí y me ayudado en mis momentos más difíciles. A mis amigos de la carrera, en general se han preocupado por mí, tanto en la carrera como en la elaboración de este proyecto. A mis amigos externos a la escuela. Y a mi amigo y compañero de trabajo Fernando Garrido Benaches, que ha sido un placer tenerlo a mi lado en este proyecto.

Por último, agradecer a Gracia García Madrid, toda su ayuda, toda su comprensión y todos los ánimos que me ha dado día a día para que las cosas salgan adelante y con un resultado óptimo. Gracias a ella he tenido las fuerzas como para poder llegar hasta este punto y espero que se incremente.



## 1.-Objetivos

## 2.-Estado del arte

2.1.- Antecedentes

2.2.- Hormigón autocompactante reforzado con fibras

2.3.- Ensayos del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas

2.4.- Estudio de la resistencia a flexión del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas

## 3.- Programa experimental

3.1.- Tipificación de cada amasada

3.2.- Tipificación del material

3.3.- Tipificación de cada viga

3.4.- Tabla tipo de dosificación y ensayos del hormigón fresco

3.5.- Programación de ejecución y rotura de las probetas y vigas

3.6.- Proceso de ejecución

## 4.- Metodología

4.1.- Materiales

4.2.- Dosificación

4.3.- Tipificación del hormigón

4.4.- Fabricación de las vigas

4.5.- Curado

4.6.- Ensayo de las probetas

4.7.- Ensayo de las armaduras

4.8.- Ensayo de las vigas realizadas

## 5.- Resultados



5.1.- Introducción

5.2.- Ensayo de hormigón fresco

5.3.- Ensayos de hormigón endurecido

5.4.- Ensayo de las armaduras

5.5.- Análisis de la tenacidad

6.- Análisis de los resultados

7.- Futuras líneas de trabajo

8.- Bibliografía

9.- Anexos

I.- Granulometría



## Objetivos

El presente trabajo de título **“Estudio del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas sometido a esfuerzos de flexión”**, tiene como objetivo estudiar la influencia de la incorporación de fibras poliméricas en hormigones autocompactantes, en concreto sus propiedades mecánicas, sometido a esfuerzo de flexión.

En el proyecto que hemos realizado, se ha diseñado un hormigón autocompactante y lo hemos comparado con la adición de fibras poliméricas de poliolefinas con distinto porcentaje de fibra y de armado de las vigas.

El contenido de las fibras lo hemos distribuido de la siguiente forma: hormigón patrón, el cual no contiene fibras poliméricas; el 6,2 y 12,4 kg/m<sup>3</sup> de hormigón, creando un nivel intermedio de 9,3 kg/m<sup>3</sup>. Las propiedades del hormigón que se estudiarán serán la resistencia a compresión y la resistencia a flexión.

El trabajo se ha desarrollado de acuerdo a los siguientes puntos:

- En el primer apartado se exponen los objetivos que se persiguen.
- En el segundo apartado se presenta una evolución histórica del hormigón reforzado con fibras, desde los antecedentes más inmediatos hasta la consolidación y situación actual. Estudiaremos y analizaremos las fibras de poliolefinas, tipos y características, así como las propiedades que la adición de estas fibras le confiere al hormigón.
- En el tercer apartado se presenta el programa experimental realizado para la elaboración del proyecto. En él se describen los procesos previos y los ensayos realizados del hormigón, tanto en estado fresco como en estado endurecido a 28 días.
- En el cuarto apartado se describen los procesos que se llevan a cabo para la realización de las amasadas, proceso de hormigonado de las vigas y, posteriormente, los ensayos realizados tanto a las probetas obtenidas en cada amasada como de la propia viga.
- En el quinto se describen los resultados obtenidos en el proceso experimental y se realiza un análisis de los mismos.

- En el sexto, y último apartado, a partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior expondremos nuestras conclusiones y abriremos una nueva línea de investigación para estudios posteriores.

Como objetivos de este trabajo podemos remarcar:

- ✓ Reflejar la evolución histórica del hormigón autocompactante y reforzado con fibras poliméricas, desde sus orígenes hasta la actualidad; estudiando diferentes proyectos, estudios y teorías.
- ✓ Estudiar las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras poliméricas, tanto en su estado fresco como en su estado endurecido.
- ✓ Estudiar el comportamiento a flexión del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas a partir de la construcción y de los diferentes ensayos de vigas con diferente densidad de fibras y cantidad de armadura longitudinal inferior.
- ✓ Estudiar y valorar las gráficas obtenidas de los diferentes ensayos y rotura de las vigas a flexión para determinar cuáles son las ventajas e inconvenientes de la utilización de las distintas cantidades de fibras poliméricas.

## Objectius

El present treball de títol “Estudi del formigó autocompactant reforçat amb fibres polimèriques sotmès a esforços de flexió” té com a objectiu estudiar la influència de la incorporació de fibres polimèriques en formigons autocompactants , en concret les seues propietats mecàniques, sotmeses a esforços de flexió.

En el projecte que hem realitzat, s’ha dissenyat un formigó autocompactant i l’hem comparat amb l’adició de fibres polimèriques de poliolefines amb distint percentatge de fibra i d’armat de les bigues.

El contingut de les fibres l’hem distribuït de la següent manera: formigó patró, el qual no conté fibres polimèriques; el 6,2 y 12,4 kg/m<sup>3</sup> de formigó, creant un nivell intermedi de 9,3 kg/m<sup>3</sup>. Las propietats del formigó que s’estudiaran seran la resistència a compressió i la resistència a flexió.

El treball realitzat s’ha desenvolupat d’acord als següents punts:

- En el primer apartat s’exposen els objectius que es persegueixen.
- En el segon apartat es presenta una evolució històrica del formigó reforçat amb fibres, des de els antecedents més immediats fins a la consolidació i situació actual. Estudiarem i analitzarem les fibres de poliolefines, tipus i característiques, així com les propietats que la adició d’aquestes fibres li confereixen al formigó.
- En el tercer apartat, es presenta el programa experimental realitzat per a l’elaboració del projecte. En ell es descriuen els processos previs i assajos realitzats al formigó, tant en estat fresc om en estat endurit a 28 dies.
- En el quart apartat es descriuen els processos que es duen a lloc per a la realització de les amassades , processos de formigonat de les bigues i, posteriorment, els assajos realitzats tant a les provetes obtingudes en cada amassa com de la pròpia biga.
- En el quint es descriuen els resultats obtinguts en el procés experimental i es realitza un anàlisi dels mateixos.
- En el sext i últim apartat, a partir dels resultats obtinguts en el apartat anterior exposarem les nostres conclusions i obrirem una nova línia d’investigació per a estudis posteriors.

Com a objectius d'aquest treball podem remarcar:

- ✓ Reflectir l'evolució històrica del formigó autocompactant i reforçat amb fibres polimèriques, des de els orígens fins a l'actualitat; estudiant diferents projectes, estudis i teories.
- ✓ Estudiar les propietats mecàniques del formigó reforçat amb fibres polimèriques.
- ✓ Estudiar el comportament a flexió del formigó autocompactant reforçat amb fibres polimèriques a partir de la construcció i dels diferents assajos de bigues amb diferent densitat de fibres i quantitat d'armadura longitudinal i transversal.
- ✓ Estudiar i valorar les gràfiques obtingudes dels diferents assajos i ruptura de les bigues a flexió.

## Objectives

That present work entitled "Study of self-compacting concrete reinforced polymer fibers subjected to bending" aims to study the influence of the incorporation of polymer fiber in self-compacting concrete, particularly, their mechanical properties subjected to bending

In the project, we have designed a self-compacting concrete and we have compared it with the addition of polyolefin polymer fibers with a different fiber percentage and reinforced beams

The content of the fibers we have distributed in the following way: concrete pattern which does not contain polymer fibers, the 6.2 and 12.4kg/m<sub>3</sub> of concrete, creating an intermediate level of 9.3kg/m<sub>3</sub>. Concrete properties are being studied compressive strength and flexural strength.

The work has been developed according to the following points:

- In the first chapter the objectives pursued.
- The second section presents an historical development of fiber reinforced concrete, from the more immediate background to the consolidation and current situation. We will study and analyse the polyolefin fiber types and characteristics and properties that the addition of these fibers gives the concrete.
- In the third section presents the experimental program for the development of the project. It describes the previous process and the concrete tests, both the fresh and hardened state to 28 days.
- In the fourth section describes the processes carried out for conducting kneaded concreting process of the beams and, then, the tests performed both the specimens obtained in each batch as the beam itself.
- In the fifth described results obtained in the experimental process and an analysis thereof of the same ones.
- In the sixth and final section, from the results obtained in the previous section we will discuss our findings and opinions and open up a new line of research for future studies.

As objectives of this work we can remark:

- ✓ Reflecting the historical evolution of self-compacting concrete and fiber reinforced polymer, from its origins to the present, studying various projects and theories.
- ✓ Studied the mechanical properties of fiber reinforced polymer concrete.
- ✓ Study the behavior of SCC flexural fiber reinforced polymer from the construction and testing of different beams with different density of fibers and number of longitudinal and transverse reinforcement.
- ✓ Study and evaluate the graphs obtained from different trials and broken beams in bending.



---

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

## 2.- Estado del arte

### 2.1.- Antecedentes

#### 2.1.1.- Introducción

#### 2.1.2.- Evolución y situación actual del Hormigón reforzado con fibras

### 2.2.- Hormigón autocompactante reforzado con fibras

#### 2.2.1.- Definición de hormigón autocompactante

#### 2.2.2.- Definición de hormigón reforzado con fibras

#### 2.2.3.- Tipificación del hormigón

#### 2.2.4.- Características del hormigón autocompactante reforzado con fibras

#### 2.2.5.- Clasificación de las fibras

##### 2.2.5.1.- Ventajas de las fibras poliméricas frente a las fibras de acero

#### 2.2.6.- Composición del hormigón reforzado con fibras

#### 2.2.7.- Propiedades del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas

##### 2.2.7.1.- Propiedades del hormigón en estado fresco

###### 2.2.7.1.1.- Retracción del hormigón

###### 2.2.7.1.2.- Docilidad del hormigón

##### 2.2.7.2.- Propiedades mecánicas del hormigón en estado endurecido

###### 2.2.7.2.1.- Módulo de deformación

###### 2.2.7.2.2.- Resistencia a compresión

###### 2.2.7.2.3.- Resistencia a tracción

###### 2.2.7.2.4.- Resistencia a flexión

###### 2.2.7.2.5.- Tenacidad del hormigón

###### 2.2.7.2.6.- Durabilidad del hormigón

###### 2.2.7.2.7.- Fluencia del hormigón

## 2.3.- Ensayos del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas

### 2.3.1.- Ensayos del hormigón en estado fresco

2.3.1.1.- Ensayo de escurrimiento

2.3.1.2.- Ensayo del anillo Japonés

2.3.1.3.- Ensayo de determinación de contenido de aire

2.3.1.4.- Ensayo del embudo en V

2.3.1.5.- Ensayo de la caja en L

2.3.1.6.- Ensayo del índice visual de estabilidad

2.3.1.7.- Ensayo por segregación por tamiz

### 2.3.2.- Ensayos del hormigón en estado endurecido

2.3.2.1.- Ensayo por compresión simple de probetas cilíndricas

2.3.2.2.- Ensayo de determinación del módulo de elasticidad a compresión.

2.3.2.3.- Determinación del índice de tenacidad a compresión

2.3.2.4.- Rotura de probetas por flexo-tracción con rotura a 4 puntos

2.3.2.5.- Determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura

2.3.2.6.- Determinación de la resistencia a cortante

2.3.2.7.- Determinación de la resistencia al impacto

2.3.2.8.- Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción (Método Barcelona)

2.3.2.9.- Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)

2.3.2.10.- Resistencia a tracción indirecta de probetas

## 2.4.- Estudio de la resistencia a flexión del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas.

## 2.- ESTADO DEL ARTE

### 2.1.- Antecedentes

#### 2.1.1.- Introducción

Para estudiar la evolución del hormigón como material de construcción, debemos remontarnos a la época de los romanos y su *“opus caementicium”*. Éste se basaba en una mezcla a base de cal y puzolanas para realizar las construcciones romanas. A partir de este momento y su constante investigación sobre el hormigón como material y el estudio de sus componentes y la aparición de nuevos componentes que le confieren trabajabilidad, tenacidad y demás propiedades mecánicas, como son los aditivos y las adiciones, siempre en un contenido controlado y tipificado; obtenemos hoy en día una mezcla llamada hormigón.

Durante las últimas décadas se ha producido un importante desarrollo en la industria de la construcción y a través de la investigación han aparecido productos nuevos como son el hormigón autocompactante. Éste es un hormigón que como bien dice la palabra, se autocompacta, es decir, no necesita de ninguna herramienta que vibre el hormigón, que extraiga el aire ocluido que queda dentro de la mezcla. Con ello conseguimos que la mano de obra no sea especializada, con lo que tenemos un ahorro económico, entre alguna de sus ventajas. Esta característica se consigue con aditivos, en nuestro proyecto, hemos utilizado un aditivo superplastificante de alto rendimiento. Gracias a este tipo de aditivo, se puede utilizar una relación agua/cemento baja y la característica de trabajabilidad y puesta en obra se la confiere al hormigón. La incorporación de adiciones como el humo de sílice ha permitido aumentar las resistencias y durabilidad del hormigón; en nuestro proyecto, no hemos utilizado ningún tipo de adición, pero sí, hemos empleado fibras poliméricas, con ello hemos conseguido aumentar considerablemente tanto la tenacidad como las propiedades mecánicas del mismo.

El empleo de fibras en el hormigón está siendo estudiado hoy en día y con ello conseguimos colaborar en nuestro proyecto en la investigación del empleo de fibras poliméricas en el hormigón, y dando hincapié en el esfuerzo de flexión del mismo. Los hormigones reforzados con fibras (HRF) constituyen una de las innovaciones más relevantes en el campo de los hormigones especiales.

Las fibras, cortas, discretas y separadas, generalmente orientadas al azar, se han incorporado dentro de una matriz cementicia frágil, constituida básicamente por el hormigón tradicional. Esta adición de las fibras al hormigón incrementa muchas

propiedades del hormigón, destacando entre ellas, la resistencia a flexión, tenacidad, fatiga, impacto, permeabilidad y resistencia a la abrasión.

En este trabajo estudiamos la influencia del porcentaje de las fibras y la cantidad de armaduras que insertamos en el hormigón ante el esfuerzo de flexión.

### 2.1.2.- Evolución y situación actual del Hormigón reforzado con fibras

El hormigón ha experimentado una profunda evolución como material de construcción, antiguamente se utilizaba pelos de caballo para reforzar morteros y paja en ladrillos de barro. Durante el siglo XX, el hormigón se ha visto estudiado y se ha mejorado su diseño, el cálculo, la tecnología y como material; buscando siempre mejoras en sus propiedades y su comportamiento.

El hormigón en sí, se considera que es un material relativamente frágil, cuando es sometido a tracción el hormigón se fisura. Desde mediados de 1800, el acero como refuerzo se ha utilizado para superar este problema. Como un sistema compuesto, el acero de refuerzo se supone que puede llevar todas las cargas de tracción. Cuando la fibra de refuerzo se agrega a la mezcla de hormigón, también puede aumentar la capacidad de carga de tracción del sistema compuesto. De hecho, las investigaciones han demostrado que la resistencia a la rotura del hormigón se puede aumentar hasta 5 veces por la adición de fibra de refuerzo.

Una de las primeras aplicaciones del hormigón armado (o reforzado) se da en la segunda mitad del siglo XIX, en la presentación de Lamblot en la Exposición Universal de Paris de 1855 de un barco de carcasa metálica recubierto por hormigón de cal hidráulica. Durante el siglo XX se han desarrollado tecnologías como la del hormigón pretensado y el hormigón proyectado, y han aparecido hormigones llamados especiales, entre ellos encontramos al hormigón objeto de estudio en este proyecto, el hormigón reforzado con fibras.

En 1911 fue la primera vez que se utilizó fibras de acero para incrementar la resistencia y estabilidad del hormigón armado convencional por Graham. Sin embargo los primeros estudios científicos sobre este tema se deben a Griffith, en 1920, a los que siguieron en 1963 los de Romualdi y Batson, Romualdi y Mandel.

En el año 1918 H. Alfesen patentó un proceso para aumentar la resistencia del hormigón a tracción utilizando fibras pequeñas.

En la década de los setenta se comenzó en España hormigones reforzados con fibras en diversos ámbitos: pavimentación de tableros de puentes, pavimentos industriales, contenedores de puertos, revestimientos de túneles, prefabricados, etc. Las fibras poliméricas actualmente se utilizan sobre todo en obra civil teniendo un gran éxito.

Las fibras sintéticas presentan grandes prestaciones: alta resistencia a tracción, poco peso, elevado módulo de elasticidad, etc. La principal aplicación de las fibras sintéticas en el campo de la construcción es el de control de la fisuración y la de reforzar hormigones frente a la acción de los impactos.

## 2.2.- Hormigón autocompactante reforzado con fibras

### 2.2.1.- Definición de hormigón autocompactante.

Según la EHE-08 y en su anejo 17, los hormigones autocompactantes se definen como *“aquel hormigón que, como consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación, no presentando segregación, bloqueo de árido grueso, sangrado, ni exudación de la lechada.”*

El menor contenido de árido grueso, que el tamaño máximo del árido sea menor o igual 25mm. (es aconsejable que debe estar comprendido entre 12 y 20mm. según la EHE-08) y una cantidad alta de contenido de finos, aproximadamente del 23% del peso seco del hormigón; son las diferencias en la composición entre el hormigón autocompactante y el hormigón convencional. Así como el empleo de aditivos superplastificantes y que la cantidad de cemento esté comprendida entre 250 y 500 kg/m<sup>3</sup>.



Fotografía 1.- Ensayo de escurrimiento.

### 2.2.2.- Definición de hormigón reforzado con fibras

Según la EHE-08 y en su Anejo 14, los hormigones reforzados con fibras (HRF), se definen como *“aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. El planteamiento es general para todo tipo de fibras, si bien hay que tener presente que la base fundamental del conocimiento de que se dispone es para fibras de acero, lo que se refleja, en cierta medida en el mismo.”*

La aplicación de estos hormigones puede ser con finalidad estructural o no estructural. El empleo de fibras en el hormigón tiene finalidad estructural cuando se utiliza su contribución en los cálculos relativos a alguno de los estados límite últimos o de servicio y su empleo puede implicar la sustitución parcial o total de armadura en algunas aplicaciones.

Se considerará que las fibras no tienen función estructural, cuando se incluyan fibras en el hormigón con otros objetivos como la mejora de la resistencia al fuego o el control de la fisuración.

La adición de fibras es admisible en hormigones en masa, armados o pretensados, y se puede hacer con cualquiera de los diversos sistemas. La densidad y las dosificaciones usuales de las fibras no llevan a modificar los valores del peso específico característico del hormigón con fibras respecto al hormigón sin ellas.



Fotografía 2.-Probetas prismáticas.

### 2.2.3.- Tipificación del hormigón

La tipificación de los hormigones autocompactantes es análoga a la de los hormigones de compactación convencional, sin más que utilizar como indicativo C de la consistencia las siglas AC.

#### ***T-R/AC/TM/A***

Dónde:

**T** Indicativo que será HMF en el caso de hormigón en masa, HAF en el caso de hormigón armado y HPF en el caso del hormigón pretensado;

**R** Resistencia característica a compresión especificada, en  $N/mm^2$ ;

**AC** Consistencia autocompactante;

**TM** Tamaño máximo del árido, en mm;

**A** Designación del ambiente.

Alternativamente, se podrá definir la autocompactabilidad mediante la combinación de las clases correspondientes al escurrimiento (AC-E), viscosidad (AC-V) y resistencia al bloqueo (AC-RB), de acuerdo con la siguiente expresión:

#### ***T-R/(AC-E+AC-V+AC-RB)/TM/A***

Clase	Criterio, según UNE 83.361
AC-E1	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 650 \text{ mm}$
AC-E2	$650 \text{ mm} < d_f \leq 750 \text{ mm}$
AC-E3	$750 \text{ mm} < d_f \leq 850 \text{ mm}^{(*)}$

Tabla 1.- Clases de escurrimiento. Anejo 17 EHE-08.

Clase	Criterio por el ensayo de escurrimiento, según UNE 83.361	Criterio alternativo por el ensayo del embudo en V, según UNE 83.364
AC-V1	$2'5 \text{ seg} < T_{50} \leq 8 \text{ seg}$	$10 \text{ seg} \leq T_v \leq 20 \text{ seg}$
AC-V2	$2 \text{ seg} < T_{50} < 8 \text{ seg}$	$6 \text{ seg} \leq T_v \leq 10 \text{ seg}$
AC-V3	$T_{50} \leq 2 \text{ seg}^{(*)}$	$4 \text{ seg} \leq T_v \leq 6 \text{ seg}^{(*)}$

Tabla 2.- Clases de viscosidad. Anejo 17 EHE-08.

## Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

Clase	Exigencia de la característica	Criterio por el ensayo del anillo J, según UNE 83362 (*)	Criterio por el ensayo de caja en L, según UNE 83363
AC-RB1	Exigible cuando el tamaño máximo del árido sea superior a 20 mm o el espesor de los huecos por los que pase el hormigón esté comprendido entre 80 y 100 mm	$d_{Jf} \geq d_f - 50$ mm, con un anillo de 12 barras	$\geq 0,80$ , con 2 barras
AC-RB2	Exigible cuando el tamaño máximo del árido sea igual o inferior a 20 o el espesor de los huecos por los que pase el hormigón esté comprendido entre 60 y 80 mm	$d_{Jf} \geq d_f - 50$ mm, con un anillo de 20 barras	$\geq 0,80$ , con 3 barras

Tabla 3.- Clases de resistencia al bloqueo. Anejo 17 EHE-08.

Dónde:

$d_f$  representa el escurrimiento en el ensayo según UNE 83361 y

$D_{Jf}$  representa el escurrimiento en el ensayo del anillo J, según UNE 83362

El HAC se caracteriza a partir del comportamiento en los ensayos de escurrimiento (la mezcla debe tener una distribución uniforme del árido grueso y ningún tipo de segregación o exudación en el perímetro obtenido en el ensayo de escurrimiento) y embudo en V. De acuerdo con los resultados de escurrimiento los hormigones se clasifican en las siguientes categorías:

Clase	Criterio, según UNE 83.361
AC-E1	$550mm \leq df \leq 650mm$
AC-E2	$650mm \leq df \leq 750mm$
AC-E3	$750mm \leq df \leq 850mm$

Tabla 4.-Clases de viscosidad. Anejo 17 EHE-08.

- Se considera la clase AC-E1 como la más adecuada para la mayor parte de los elementos estructurales que se construyen habitualmente.
- Se considera la clase AC-E3 en los siguientes casos:
  - Estructuras muy fuerte armadas.
  - Estructuras en las que el llenado de los encofrados es muy difícil.
  - Elementos estructurales horizontales en los que es muy importante la autonivelación.
  - Elementos estructurales muy altos, de gran esbeltez y muy fuertemente armados.

De acuerdo con el ensayo del embudo en V, los hormigones se clasifican de la siguiente forma:

Clase	Escurrecimiento, UNE 83.361	Criterio alternativo: Embudo en V, UNE 83.364
AC-V1	$2,5\text{seg} < T50 \leq 8\text{seg}$	$10\text{seg} \leq Tv \leq 20\text{seg}$
AC-V2	$2\text{seg} < T50 \leq 8\text{seg}$	$6\text{seg} \leq Tv \leq 10\text{seg}$
AC-V3	$T50 \leq 2\text{seg}$	$4\text{seg} \leq Tv \leq 6\text{seg}$

Tabla 5.- Clases de viscosidad. Anejo 17 EHE-08.

De acuerdo con la resistencia al bloqueo, los hormigones se clasifican en:

Clase	Exigencia	Anillo J, UNE 83.362	De caja en L, UNE 83.363
AC-RB1	Si $TM > 20\text{mm}$ ó $80 \leq \text{espesor(huecos)} \leq 100\text{mm}$	$d_{jf} \geq d_f - 50\text{mm}$ , con anillo de 12 barras	$\geq 0,80$ , con 2 barras
AC-RB2	Si $TM < 20\text{mm}$ ó $60 \leq \text{espesor(huecos)} \leq 80\text{mm}$	$d_{jf} \geq d_f - 50\text{mm}$ , con anillo de 20 barras	$\geq 0,80$ , con 3 barras

Tabla 6.- Clases de resistencias al bloqueo. Anejo 17 de la EHE-08

Los hormigones se clasifican en función del índice de estabilidad visual (IEV):

IEV	
$\leq 0$	No hay segregación ni lechada bordeando el hormigón en el resultado final del ensayo de extensión de flujo
0,5	No hay mortero desprendido de la pasta, pero hay algo de segregación o burbujas de aire en la superficie
1	No hay segregación en la masa de hormigón, pero hay pequeño asentamiento o burbujas de aire
1,5	Empieza a aparecer una pequeña banda de mortero alrededor de la masa de hormigón
2	Dicha banda de mortero puede llegar a estar en el orden de 10 mm
3	Indica evidencia de segregación. La banda de mortero alrededor de la masa total puede superar los 10 mm

Tabla 7.- Clasificación según el IEV. Anejo 17 EHE-08

Los hormigones reforzados con fibras se tipificarán de acuerdo con el siguiente formato (lo que deberá reflejarse en los planos de proyecto y en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto):

$$T - R / f - R1 - R3 / C / TM - TF / A$$

Dónde:

**T** Indicativo que será HMF en el caso de hormigón en masa, HAF en el caso de hormigón armado y HPF en el caso de hormigón pretensado.

**R** Resistencia característica a compresión especificada, en N/mm<sup>2</sup>.

**f** Indicativo del tipo de fibras, P en el caso de fibras poliméricas.

**R1, R3** Resistencia característica residual a flexotracción especificada  $fR_{1,k}$  y  $fR_{3,k}$ , en N/mm<sup>2</sup>.

**C** Letra inicial del tipo de consistencia, tal y como se define en el artículo 31.5 de la EHE-08.

**TM** Tamaño máximo del árido en milímetros.

**TF** Longitud máxima de la fibra, en mm.

**A** Designación del ambiente, de acuerdo con el artículo 8.2.1 de la EHE-08.

En cuanto a las resistencias residuales a flexotracción características especificadas, se recomienda utilizar la siguiente serie siempre que supere el valor mínimo exigido en el artículo 30.5 de la EHE-08:

$$1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 - 3,0 - 3,5 - 4,0 - 4,5 - 5,0 - \dots$$

En la cual las cifras indican la resistencia residual a flexotracción característica especificada del hormigón a 28 días, expresada en N/mm<sup>2</sup>.

Cuando las fibras no tengan función estructural los Indicativos R1 y R3 deberán sustituirse por: "CR" en el caso fibras para control de retracción, "RF" en el caso de fibras para mejorar la resistencia al fuego y "O" en otros casos.

En el caso de hormigones designados por dosificación se recomienda el siguiente formato:

$$T - D - G / f / C / TM / A$$

Dónde:

**G** es el contenido de fibra, en kg/m<sup>3</sup> de hormigón. El resto de los parámetros tiene el significado que se indica en el Articulado de la EHE-08. En este caso deberá garantizarse que el tipo, dimensiones y características de las fibras coincidan con los indicados en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

La EHE-08 en sus anejos 14 y 17, muestran la forma de tipificar los hormigones con fibras y autocompactantes respectivamente, al no haber ningún apartado, ni anejo, ni norma que indique como tipificar un hormigón autocompactante con refuerzo de fibras poliméricas, como es el objeto de este trabajo, hemos tipificado su designación con el siguiente formato:

***T-R/AC/f-R1-R3/ TM-TF/A***

Dónde:

**T** Indicativo que será HMF en el caso de hormigón en masa, HAF en el caso de hormigón armado y HPF en el caso del hormigón pretensado.

**R** Resistencia característica a compresión especificada, en N/mm<sup>2</sup>.

**AC** Consistencia autocompactante.

**F** Indicativo del tipo de fibras, P en el caso de fibras poliméricas.

**R1, R3** Resistencia característica residual a flexotracción especificada  $f_{R,1,k}$  y  $f_{R,3,k}$ , expresada en N/mm<sup>2</sup>.

**TM** Tamaño máximo del árido, en mm.

**TF** Longitud máxima de la fibra, en mm.

**A** Designación del ambiente

Para la designación del hormigón estudiado, proponemos que sea en ese orden y nombramos primero su consistencia autocompactante, ya que en la designación de un hormigón convencional a continuación de la resistencia a compresión se indica la consistencia del mismo. Después de este parámetro definimos el tipo de fibras y su resistencia característica residual a flexión. Para acabar la designación, definiríamos el tamaño máximo del árido, la longitud de la fibra y el ambiente para el que se ha proyectado el hormigón. Como abreviatura del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas, al no haber ninguna normativa en que quede reflejada, nosotros proponemos la siguiente:

**Hormigón Autocompactante Reforzado con fibras Poliméricas → HACRF-P****2.2.4.- Características del hormigón autocompactante reforzado con fibras**

Como propiedades del hormigón autocompactante podemos enumerar:

- Fluidez o habilidad de fluir el hormigón sin ayuda externa y llenar, así, el encofrado.
- Garantiza un buen acabado, de manera que se obtiene una superficie lisa, con color homogéneo y libre de coqueras.
- La masa tiene deformabilidad, lo que hace que la mezcla adquiera la capacidad de llenado homogéneo del encofrado.
- Al ser una mezcla fluida tiene resistencia al bloqueo y puede discurrir sin segregar el árido en el paso entre las armaduras del elemento.

Como consecuencia de la ausencia de vibración y al uso habitual de adiciones y fillers en el hormigón autocompactante, se suele obtener una interfase pasta-árido más densa que en los hormigones convencionales. Como consecuencia de ello, junto con la mayor compacidad general de la estructura granular, suele obtenerse una reducción en la velocidad de ingreso de la mayoría de los agentes agresivos.

La ausencia de vibración redundará, a su vez, en una capa exterior del hormigón de recubrimiento de superior densidad y, por tanto, menos permeable.

Debido a que los hormigones autocompactantes contienen un mayor volumen de pasta que el hormigón de compactación convencional, y teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad de la pasta es menor que el de los áridos, se podría prever un módulo de deformación ligeramente menor (entre un 7% y un 15%) para el caso del hormigón autocompactante.

Debido a que el hormigón autocompactante tiene una mayor cantidad de finos en su composición y una alta resistencia frente a la segregación, el material prácticamente no exuda agua durante la puesta en obra. Si bien teóricamente este aspecto resulta positivo, en la práctica el efecto puede resultar inverso, ya que muchas veces es el agua de exudación la que compensa el agua que se evapora en estado fresco y, consecuentemente, evita la fisuración por retracción plástica.

De esta manera, debido a las bajas relaciones agua/ligante que en general se consideran, cobra especial importancia el curado del hormigón autocompactante, especialmente en estructuras con altas relaciones superficie/volumen.

La incorporación de fibras modifica el comportamiento no lineal del hormigón estructural, especialmente en tracción, impidiendo la abertura y propagación de fisuras. Por ello, la aplicación del análisis no lineal puede ser especialmente recomendable en los casos en que las fibras constituyan una parte importante del refuerzo del hormigón.

El empleo de fibras estructurales puede aumentar la anchura de las bielas de compresión, lo cual puede ser tenido en cuenta en los modelos de bielas y tirantes. Por consiguiente, la combinación de armadura convencional y fibras puede suponer una alternativa para reducir la cuantía de armadura convencional en regiones donde se presente una alta densidad de armadura que dificulte el correcto hormigonado del elemento.

El empleo de fibras en hormigón puede provocar una pérdida de docilidad, cuya magnitud será función del tipo y longitud de la fibra empleada así como de la cuantía de fibras dispuesta. Este factor debe considerarse especialmente al solicitar la consistencia del hormigón en el caso de adición de fibras en obra.

En el caso de hormigones con fibras, se recomienda que la consistencia del hormigón no sea inferior a 9 cm de asiento en el cono de Abrams (si bien depende del tipo de aplicación y sistema de puesta en obra). En este caso, el ensayo del cono de Abrams es poco adecuado y se recomienda ensayar la consistencia de acuerdo con los ensayos propuestos en la norma UNE EN 12350-3 o UNE 83503.

### 2.2.5.- Clasificación de las fibras.

Según el Anejo 14 EHE-08 las fibras *“son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas.”*

Las fibras se pueden clasificar como estructurales o no estructurales; las primeras, son aquellas que proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa, la distribución de las fibras puede ser considerada en el cálculo de dimensionado de la sección de hormigón; las segundas, son aquellas que sin considerarlas en el

cálculo de la sección de hormigón suponen una mejora ante determinadas propiedades como por ejemplo el control de la fisuración, retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros.

CARACTERÍSTICAS MECANICAS DE LAS FIBRAS MAS COMUNES				
Material	Densidad (g/mm <sup>3</sup> )	Alargamiento de rotura (%)	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a tracción (MPa)
Matriz cementicia				
Hormigón	2,3	-	30	5-8
Fibras metálicas				
Acero	7,8	3,5	210	500-3000
Acero inox.	7,86	3	160	2100
Fibras poliméricas				
Polipropileno	0,9	8-20	5-25	400-800
Poliéster	1,4	11-13	8,2	700-900
Aramida	1,45	2,1-4	65-133	3600
Nylon	1,1	13-15	4	900
Fibras inorgánicas				
Vidrio	2,7	3,6	60	2000
Carbono	1,9	≈0,5	200-500	3000

Tabla 8.- Características mecánicas de las fibras; Hormigón, M Fernández Cánovas

Por su naturaleza las fibras pueden ser:

1) Fibras de acero

Estas fibras deberán ser conformes con la norma UNE14889-1 y, según el proceso de fabricación se clasifican en:

- GRUPO I: alambres estirados en frio
- GRUPO II: laminas cortadas
- GRUPO II: extractos fundidos
- GRUPO IV: conformados en frio
- GRUPO V : aserrados de bloques de acero

Las fibras deben ser rectas o deformadas. El fabricante debe de declarar la forma de la fibra. El control y las tolerancias sobre la forma deben especificarse para cada forma diferente.

Según su sección se clasifican en:

- Fibras con sección circular
- Fibras rectangulares
- Fibras con sección transversal irregular

Propiedad	Símbolo	Desviación del valor individual con respecto al valor declarado	Desviación del valor medio respecto al valor declarado
Longitud y longitud desarrollada >30 mm	$l, l_d$ (si es aplicable)	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$ $\pm 1,5$ mm
Diámetro (equivalente) >0,30 mm $\leq 0,30$ mm	$d$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$ $\pm 0,015$ mm
Relación longitud/diámetro	$\lambda$	$\pm 15\%$	$\pm 7,5\%$
<b>Leyenda:</b>			
$l$ = longitud de la fibra, en mm; $l_d$ = longitud desarrollada de la fibra, en mm;		$d$ = diámetro o diámetro equivalente de la fibra, en mm; $\lambda = l/d$ y es la relación de aspecto de la fibra;	

Tabla 9.- Tolerancias en la longitud y el diámetro de la fibra (UNE 14889-1)

A igualdad de longitud, fibras de pequeño diámetro aumentan el número de ellas por unidad de peso y hacen más denso el entramado o red de fibras. El espaciamiento entre fibras se reduce cuando la fibra es más fina, siendo más eficiente y permitiendo una mejor redistribución de la carga o de los esfuerzos.

El módulo de elasticidad del acero es diez veces mayor que el del hormigón, su adherencia es bastante buena, su deformación en rotura es elevada y son fáciles de mezclar.

Las fibras de acero mejoran la tenacidad y por tanto la resistencia al impacto del hormigón, levemente la resistencia mecánica a compresión y una mayor resistencia a tracción.

## 2) Fibras poliméricas

Las fibras plásticas están formadas por un material polimérico basado en poliolefina, (por ejemplo, polipropileno o polietileno), aramida, acetato de polivinilo, nylon, poliéster, poliacrílico y combinaciones de estos. Se trata de elementos rectos o deformados de material extruido, orientado y cortado, apropiado para ser adicionados homogéneamente al hormigón, mortero o pasta. Se rigen por la norma UNE 14889-2 y se clasifican en función de su forma física en:

- CLASE Ia: Micro-fibras: < 0,30 mm diámetro; mono-filamentosas
- CLASE Ib: Micro-fibras: < 0,30 mm diámetro; fibrilosas
- CLASE II: Macro-fibras: > 0,30 mm diámetro (este tipo de fibras se utilizan generalmente cuando se requiere un aumento de la resistencia residual a flexión).

Esta distinción la presenta también Rossi et al. (1987)<sup>15</sup> para describir la influencia de las distintas fibras y cómo éstas se comportan una vez iniciado el proceso de fisuración. Las macro-fibras mejoran susceptiblemente el comportamiento del hormigón una vez las macro-fisuras aparecen, y serán su forma y geometría las que determinen el grado de efectividad de dichas fibras. Sin embargo, las micro-fibras, para ser efectivas, deberían tener un relación de aspecto relativamente alto y así controlar el posterior crecimiento de las micro-fisuras.

Según su sección se clasifican en:

- Fibras con sección transversal circular
- Fibras con sección transversal elíptica
- Fibras rectangulares
- Fibras con sección transversal irregular

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

Propiedad	Símbolo	Desviación del valor individual respecto al valor	Desviación del valor medio respecto al valor declarado
Longitud y longitud Desarrollada (todas las fibras) >30 mm ≤30 mm	$l, l_d$  (si es aplicable)	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$ $\pm 1,5 \text{ mm}$
Fibras de Clase II > 0,30 mm diámetro (equivalente) relación longitud/diámetro Fibras de Clase I ≤ 30 mm densidad lineal	$d_e$  $\lambda$  $\rho_L$	$\pm 50\%$  $\pm 50\%$  $\pm 10\%$	$\pm 5\%$  $\pm 10\%$  $\pm 10\%$
$l$ longitud de la fibra, en mm $l_d$ longitud desarrollada de la fibra, en mm $\rho$ densidad del polímero, en kg/m <sup>3</sup>		$d_e$ diámetro equivalente de la fibra, en mm $\lambda = l/d$ y es la relación de aspecto de la fibra	

Tabla 10.- Tolerancias en la longitud y el diámetro de la fibra.

Las fibras poliméricas aportan al hormigón un elevado módulo de elasticidad, altas resistencias a tracción, disminuyen la incidencia de fisuras por retracción plástica, aumentan la resistencia a la abrasión por el control de exudación (debido a la capacidad que tienen las fibras de retener el agua en el interior del hormigón) y poco peso.

Se emplean fundamentalmente para el control de la fisuración en morteros y hormigones y para refuerzo del hormigón frente a impactos.



Fotografía 3.- Diferentes tipos de fibras.

### 3) Otras fibras inorgánicas

De este tipo de fibras, las que se incluyen en este Anejo son las fibras de vidrio, que en la actualidad tienen aplicación usual en el campo del hormigón. No se incorporan otras fibras que, aun existiendo, son usadas para otras aplicaciones fuera del campo del hormigón.

#### Fibras de vidrio

Este tipo de fibras podrán emplearse siempre que se garantice un comportamiento adecuado durante la vida útil del elemento estructural, en relación con los problemas potenciales de deterioro de este tipo de fibras como consecuencia de la alcalinidad del medio.

Dado que los HRF pueden experimentar importantes reducciones de resistencia y tenacidad debido a la exposición al medio ambiente, se deberán tomar las medidas adecuadas tanto sobre la fibra como sobre la matriz cementícea para su protección. En este sentido, las fibras pueden presentarse con una capa protectora superficial de un material epoxídico que reduce la afinidad de las mismas con el hidróxido de calcio, proceso responsable de la fragilización del compuesto.

#### 2.2.5.1- Ventajas de las fibras poliméricas frente a las fibras de acero.

Las primeras fibras que se emplearon y que más se están utilizando hoy en día son las de acero, pese a este dato, las fibras poliméricas presentan las siguientes ventajas:

- Menor dosificación en kilos de fibra/m<sup>3</sup> de hormigón.
- Muy inferior desgaste de bombas, mangueras, etc.
- Menores riesgos en su manipulación.
- Riesgo nulo de oxidación y degradación, garantía de recubrimiento mínimo.
- Menor coste por m<sup>3</sup> de hormigón.
- Más ligeras
- Mejora algunas de las propiedades del hormigón en estado fresco, debido a su bajo módulo de elasticidad y elevado grado de alargamiento.
- Aumento de la impermeabilidad

### 2.2.6.- Composición del hormigón reforzado con fibras

Los componentes del hormigón autocompactante son los mismos que los del hormigón estructural convencional, aunque las proporciones de los mismos pueden variar respecto a las habituales para estos últimos, caracterizándose el hormigón autocompactante por un menor contenido de árido grueso, un mayor contenido de finos minerales y, en general, un menor tamaño máximo de árido.

Uno de los principales materiales empleados en la fabricación del HAC es el aditivo superplastificante. En ocasiones, es conveniente la utilización de aditivos moduladores de la viscosidad, que minimizan los efectos de la variación de la humedad y del contenido de finos.

Por otra parte, el HRF está formado por los mismos componentes que el hormigón convencional al que le añadimos fibras. Debemos destacar que el contenido de cemento y de finos es mayor y el tamaño máximo del árido es menor. La incorporación de adiciones y las propias fibras provocan una mejora en la impermeabilidad del hormigón y como consecuencia de la durabilidad, aumenta la cohesión del mismo y por lo tanto la adherencia entre la fibra y la matriz cementante, disminuyendo el riesgo de segregación.

### 2.2.7.- Propiedades del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas.

#### 2.2.7.1.- Propiedades del hormigón en estado fresco

A continuación enumeramos y describimos las propiedades más relevantes del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas. Mientras que las propiedades en estado fresco del hormigón autocompactante difieren en gran medida de las del hormigón de compactación convencional, su comportamiento en términos de resistencias, durabilidad y demás prestaciones en estado endurecido puede considerarse similares a las de un hormigón convencional de igual relación a/c y elaborado con los mismos materiales componentes.

En relación con su comportamiento a edad temprana, podrían producirse algunas variaciones en propiedades como la retracción y/o alteraciones en el tiempo de fraguado, como consecuencia de que incorporan, en general, dosis mayores de finos y aditivos.

En general, las diferencias con el hormigón convencional son suficientemente pequeñas de forma que permiten utilizar para el hormigón autocompactante la formulación incluida en el Articulado de esta Instrucción. En particular, se pueden utilizar las mismas longitudes de anclaje de las armaduras activas y pasivas, iguales criterios para especificar la resistencia mínima del hormigón y el mismo tratamiento de las juntas de construcción.

En cuanto al hormigón reforzado con fibras la adición de estas influye en las propiedades mecánicas del hormigón, viéndose afectadas la resistencia a cortante, a tracción, a flexotracción, a impacto y a la fatiga; influyendo también en la tenacidad, modo de rotura y el control de la fisuración de la matriz. Desconociéndose por el momento la cuantía de la mejora de estas características.

La resistencia del hormigón a flexotracción, a los efectos de esta Instrucción, se refiere a la resistencia de la unidad de producto o amasada y se obtiene a partir de los resultados de ensayo de rotura a flexotracción, en número igual o superior a tres, realizados sobre probetas prismáticas de ancho igual a 150 mm, altura igual a 150 mm y largo igual a 600 mm, de 28 días de edad, fabricadas, conservadas y ensayadas de acuerdo con UNEEN 14651.

Al efecto de asegurar la homogeneidad de una misma unidad de producto, el recorrido relativo de un grupo de tres probetas (diferencia entre el mayor resultado y el menor, dividida por el valor medio de las tres), tomadas de la misma amasada, no podrá exceder el 35%.

En solicitaciones de compresión, el diagrama tensión-deformación del hormigón con fibras no se modifica respecto al del articulado de la EHE-08, ya que se puede considerar que la adición de las fibras no varía de forma significativa el comportamiento del hormigón en compresión.

Según el ACI Committee 544 asegura que la adición de fibras al hormigón puede provocar pequeños aumentos o descensos, poco significativos, en la resistencia a compresión del hormigón.

#### 2.2.7.1.1.- Retracción del hormigón

Debido a que el hormigón autocompactante tiene una mayor cantidad de finos en su composición y una alta resistencia frente a la segregación, el material

prácticamente no exuda agua durante la puesta en obra. Si bien teóricamente este aspecto resulta positivo, en la práctica el efecto puede resultar inverso, ya que muchas veces es el agua de exudación la que compensa el agua que se evapora en estado fresco y, consecuentemente, evita la fisuración por retracción plástica.

De esta manera, debido a las bajas relaciones agua/ligante que en general se consideran, cobra especial importancia el curado del hormigón autocompactante, especialmente en estructuras con altas relaciones superficie/volumen.

En el hormigón autocompactante, más fácilmente que en el hormigón de compactación convencional, puede darse una combinación de factores que podrían conducir a una significativa retracción endógena; un contenido de cemento superior y el uso de un cemento más fino (conducentes a un mayor calor de hidratación), la mayor cantidad de material fino en general y las bajas relaciones agua/finos.

La utilización de cenizas volantes y/o filler calizo puede contribuir a la reducción de la retracción endógena.

En cuanto al hormigón reforzado con fibras, se ha demostrado que las deformaciones debidas a la retracción del hormigón de compactación convencional son del mismo orden de magnitud que las de este tipo de hormigones. La EHE-08 no contempla esta propiedad del hormigón reforzado con fibras, ya que como se ha demostrado son de la misma magnitud que el hormigón convencional aunque si se impide la deformación manteniendo las dimensiones de la pieza constantes (retracción restringida) se logra que las tensiones de tracción aumenten más lentamente.

#### 2.2.7.1.2.- Docilidad del hormigón

La caracterización de la autocompactabilidad se realiza a través de métodos de ensayo específicos que permiten evaluar las prestaciones del material en términos:

- de fluidez, mediante ensayos de escurrimiento según UNE 83.361 o de ensayos de escurrimiento en embudo en V, según UNE 83.364.
- de resistencia al bloqueo, mediante ensayos del escurrimiento con anillo J, según UNE 83.362 y mediante ensayos de la caja en L, según UNE 83.363.
- y de resistencia a la segregación.

Si bien no existen ensayos normalizados para evaluar la resistencia a la segregación, la misma se puede apreciar a partir del comportamiento del material en los ensayos de escurrimiento y embudo en V. En el ensayo de escurrimiento debe observarse una distribución uniforme del árido grueso y ningún tipo de segregación o exudación en el perímetro de la “torta” final del ensayo.

En cuanto a la docilidad del hormigón en lo HRF, esta se puede ver afectada con el empleo de fibras en el mismo. La pérdida de docilidad del hormigón está relacionada con el tipo y la longitud de la fibra, así como por la cantidad empleada en el hormigón.

En el caso de hormigones con fibras, se recomienda que la consistencia del hormigón no sea inferior a 9 cm de asiento en el cono de Abrams (si bien depende del tipo de aplicación y sistema de puesta en obra). En este caso, el ensayo del cono de Abrams es poco adecuado y se recomienda ensayar la consistencia de acuerdo con los ensayos propuestos en UNE EN 12350-3 o UNE 83503.

#### 2.2.7.2.- Propiedades mecánicas del hormigón en estado endurecido

En el hormigón autocompactante el valor de la resistencia a compresión es una referencia imprescindible.

La evolución de la resistencia a compresión con el tiempo puede considerarse equivalente a la de un hormigón de compactación convencional. Sin embargo, como se ha mencionado, se deberá tener en cuenta, en algunos casos, la posibilidad de un retraso en la ganancia de resistencia inicial debido a las dosis mayores de aditivos utilizados.

Para la resistencia a tracción pueden hacerse las mismas consideraciones que para la resistencia a compresión.

La resistencia del hormigón a flexotracción, a los efectos de la EHE-08, se refiere a la resistencia de la unidad de producto o amasada y se obtiene a partir de los resultados de ensayo de rotura a flexotracción, en número igual o superior a tres, realizados sobre probetas prismáticas de ancho igual a 150 mm, altura igual a 150 mm y largo igual a 600 mm, de 28 días de edad, fabricadas, conservadas y ensayadas de acuerdo con UNE-EN 14651.

En sollicitaciones de compresión, el diagrama tensión-deformación del hormigón con fibras puede pasar que no se modifique respecto al del hormigón

convencional, ya que se puede considerar que la adición de las fibras no varía de forma significativa el comportamiento del hormigón en compresión.

Del ensayo propuesto en UNE-EN 14651 se obtiene el diagrama carga-abertura de fisura del hormigón. A partir de los valores de carga correspondiente al límite de proporcionalidad ( $F_L$ ) y a las aberturas de fisura 0,5 mm y 2,5 mm ( $F_1$  y  $F_3$  respectivamente), se obtiene el valor de resistencia a flexotracción ( $f_{ct}$ ,  $f_t$ ) y los valores de resistencia residual a flexotracción correspondientes:  $f_{R,1}$  y  $f_{R,3}$

El cálculo de los valores de resistencia a flexotracción y de resistencia residual a flexotracción según la citada norma UNE-EN 14651 se realiza asumiendo una distribución elástico lineal de tensiones en la sección de rotura.

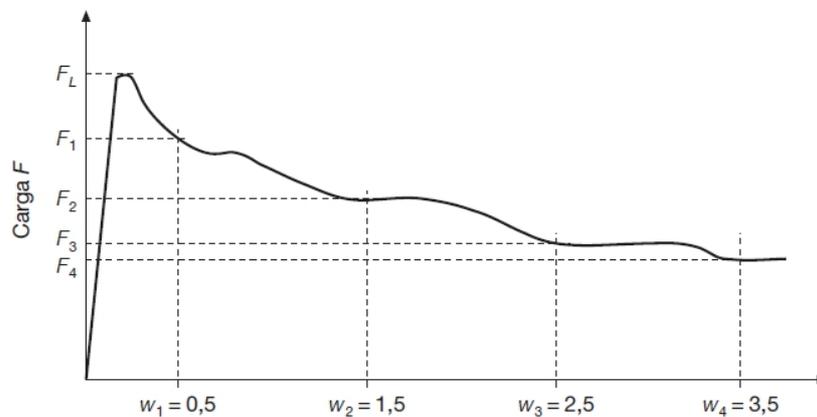


Figura 1.- Abertura de fisura  $W$  (mm)

#### 2.2.7.2.1.- Módulo de deformación

Debido a que los hormigones autocompactantes contienen un mayor volumen de pasta que el hormigón de compactación convencional, y teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad de la pasta es menor que el de los áridos, se podría prever un módulo de deformación ligeramente menor (entre un 7% y un 15%) para el caso del hormigón autocompactante.

A falta de datos experimentales, puede calcularse el módulo de deformación utilizando la formulación del articulado de la EHE-08 para el hormigón de compactación convencional. Cuando se requiera un conocimiento detallado del valor del módulo de deformación longitudinal, como por ejemplo en algunas estructuras con un proceso de construcción evolutivo en que el control de las deformaciones resulte crítico, se pueden hacer determinaciones experimentales de dicho valor, al igual que se hace cuando se utiliza hormigón de compactación convencional.

En cuanto al hormigón reforzado con fibras (HRF) la instrucción EHE-08 no contempla ninguna recomendación sobre dicho módulo.

#### 2.2.7.2.2.- Resistencia a compresión

La adición de fibras sintéticas al hormigón no provoca aumentos significativos en la resistencia a compresión.

Morgan et al. (1999) presentó unos valores de resistencia a compresión del hormigón proyectado por vía húmeda con fibras sintéticas.

Morga et al. (1999) justificó los valores de resistencia de los ensayos a causa de las diferentes temperaturas ambientales del momento de proyección, aspecto que modifica parcialmente las velocidades de reacción. También se ve afectada la resistencia a compresión como consecuencia de un menor grado de compactación que puede presentar el hormigón proyectado a causa de la presencia de fibras.

Un estudio realizado por Banthia et al. (1999b) sobre las resistencias al impacto de hormigón con fibras sintéticas presentó valores de resistencias alrededor de los 50MPa, muy similares a los obtenidos en el hormigón de control.

De ello se deduce que la adición de fibras sintéticas no tiene un efecto muy importante en los valores de la resistencia a compresión cuando los comparamos con valores obtenidos del hormigón de control.

Según la ACI las probetas cilíndricas de pequeño tamaño dan mayores valores de la resistencia a compresión, puesto que acentúan un alineamiento preferente de las fibras. Por ello, la fabricación de probetas de pequeño tamaño, unido al uso de fibras de gran longitud, puede dar lugar a resultados excesivamente optimistas.

#### 2.2.7.2.3.- Resistencia a tracción

En tracción directa el diagrama tensión-deformación del HRF es casi lineal hasta el inicio de la fisuración, a partir de esta, la carga que soporta disminuye de una manera muy brusca, dando lugar a un agotamiento frágil.

Con la adición de fibras el comportamiento antes de la rotura es muy similar, presentando una rotura a mayor carga y con un descenso menos frágil.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

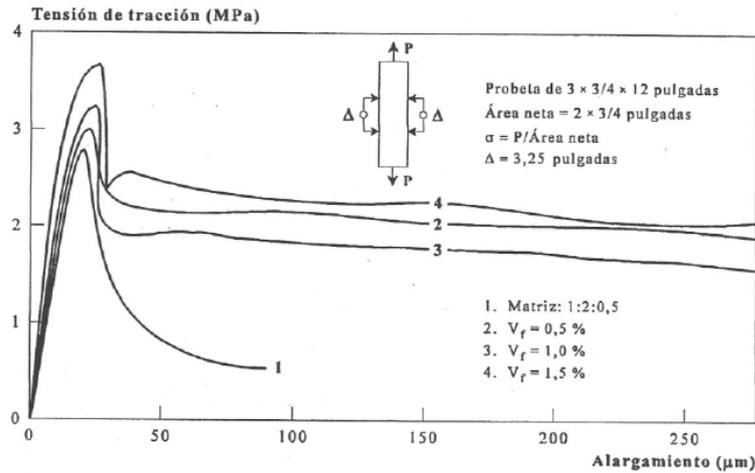


Figura 2.- Diagrama carga-deformación. ACHE

Este comportamiento está directamente relacionado con:

- Orientación de las fibras. La adición de fibras al hormigón evita la formación de grietas y fisuras y la propagación de las mismas.
- Relación de forma, la longitud y el diámetro de la fibra están muy relacionados con la resistencia a tracción, para mayores relaciones  $l_f/d_f$  mayor esbeltez y con ello mayor capacidad de refuerzo en la interacción (adherencia) con el conglomerante.
- Volumen de fibras: En cuanto al volumen, a mayor cantidad de fibras, mayor trabado del hormigón y por lo tanto mayores resistencias a tracción.

#### 2.2.7.2.4.- Resistencia a flexión

Para caracterizar el comportamiento a flexión de un material tendremos en cuenta la resistencia a primera fisura y la resistencia a rotura por flexotracción.

La resistencia a primera fisura, como en la resistencia a compresión, depende de la densidad de la matriz y por tanto del grado de compactación alcanzado. Desde el punto de vista de la resistencia a primera fisura para cantidades bajas de fibras es más rentable mejorar las características de la matriz con el uso de aditivos, superfluidificantes, humo de sílice, etc.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

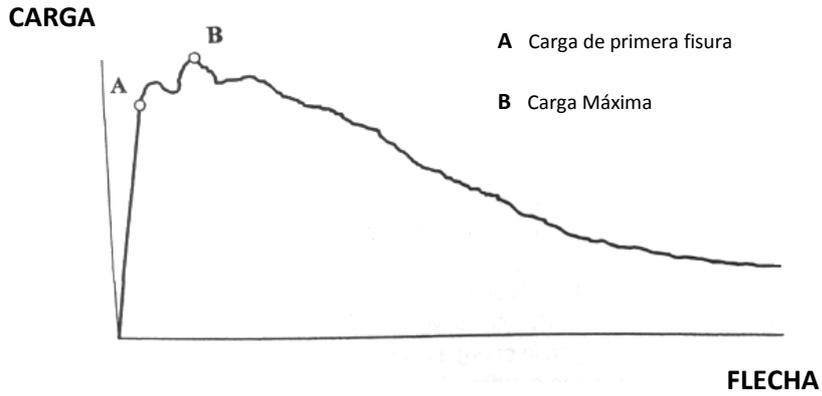


Figura 3.- Diagrama carga-flecha. ACHE

La inclusión de fibras en cantidad suficiente influye más sobre la resistencia a rotura por flexotracción que sobre las resistencias a primera fisura, a compresión simple o a tracción centrada, aunque es más fácil alcanzar incrementos de resistencia elevados en elementos fabricados con mortero que en los constituidos con hormigón.

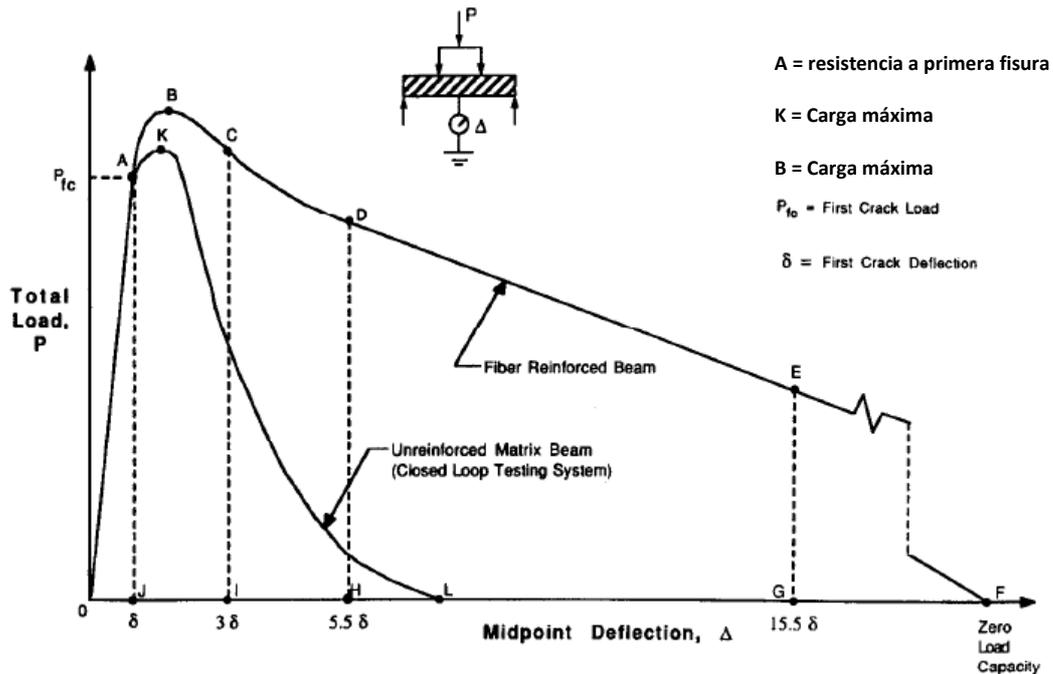


Figura 4.- Diagrama carga-deformación. ACI Committee 544

#### 2.2.7.2.5.- Tenacidad del hormigón

La tenacidad es la energía total que absorbe un material antes de alcanzar la rotura. Las fibras poliméricas dotan al hormigón proyectado de una mayor tenacidad que la del hormigón convencional.

Una vez se agota la capacidad resistente del hormigón y con su posterior rotura de la matriz, la fibra continúa su actividad, dotando al hormigón de una mayor energía hasta la rotura total de la sección del hormigón reforzado con fibras; pues éstas, “cosen” y el hormigón proyectado es capaz de resistir una mayor resistencia y una mayor deformación hasta su rotura total.

#### 2.2.7.2.6.- Durabilidad del hormigón

Como consecuencia de la ausencia de vibración y al uso habitual de adiciones y fillers en el hormigón autocompactante, se suele obtener una interfase pasta-árido más densa que en los hormigones convencionales. Como consecuencia de ello, junto con la mayor compacidad general de la estructura granular, suele obtenerse una reducción en la velocidad de ingreso de la mayoría de los agentes agresivos.

La ausencia de vibración redundará, a su vez, en una capa exterior del hormigón de recubrimiento de superior densidad y, por tanto, menos permeable.

No obstante, en cualquier caso deberán respetarse los requisitos de máxima relación a/c y mínimo contenido de cemento.

El comportamiento del hormigón autocompactante frente a ciclos de congelamiento y deshielo puede considerarse equivalente al del hormigón de compactación convencional.

Debido a la microestructura más densa del hormigón autocompactante, el riesgo de desconchamiento explosivo podría resultar mayor para este material comparado con el hormigón convencional.

El empleo de hormigón reforzado con fibras con función estructural hace innecesaria la utilización de la malla de reparto, dado que las fibras colaboran al reparto uniforme de las cargas aplicadas y a evitar las fisuras por dilataciones y retracciones del hormigón.

De forma general, se podrá emplear hormigón reforzado con fibras en todas las clases de exposición.

#### 2.2.7.2.7.- Fluencia del hormigón.

En general, puede utilizarse la formulación incluida en el Artículo 39.8 de la EHE-08. El comportamiento en fluencia del hormigón autocompactante puede considerarse equivalente al de un hormigón de compactación convencional de igual relación a/c. Aunque para el mismo nivel resistente podría producirse deformaciones ligeramente mayores, si el secado al aire es permitido esta diferencia puede desaparecer a causa del mayor refinamiento de la estructura de poros del hormigón autocompactante.

En cuanto al HRF el empleo de fibras sintéticas para uso estructural, el fabricante deberá aportar el coeficiente de fluencia del hormigón, mediante contrastación experimental de los resultados.

Las deformaciones en el HRF debidas a la fluencia del hormigón son de la misma magnitud que las de un hormigón convencional.

### 2.3.- Ensayos del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas

#### 2.3.1.- Ensayos del hormigón en estado fresco

Al Hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas se le pueden realizar los mismo ensayos que se realizan en el hormigón convencional, autocompactante y a los hormigones reforzados con fibras. Éstos son:

##### 2.3.1.1.- Ensayo de escurrimiento

Procedimiento para determinar el escurrimiento y el tiempo  $t_{50}$ , es decir, evaluar la fluidez y la velocidad de flujo del hormigón autocompactante en ausencia de obstrucciones. El ensayo no es aplicable cuando el tamaño máximo del árido es mayor de 40mm.

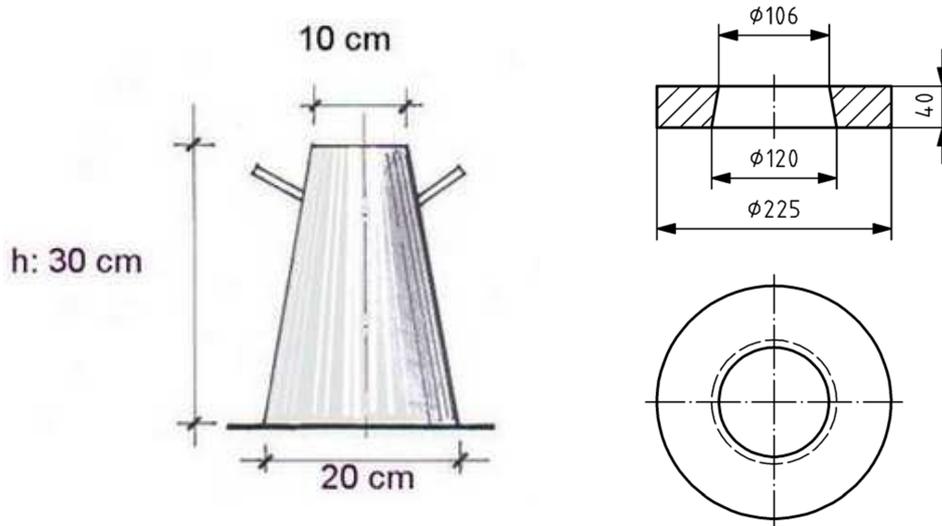


Figura 5.- Esquema cono

Para evaluar la capacidad de relleno del hormigón autocompactante nos basaremos en:

- T50: segundos que transcurren desde el momento en que se levanta el cono hasta que el hormigón alcanza un diámetro de 50cm.
- Diámetro máximo y perpendicular al mismo que alcanza la masa de hormigón al estabilizarse. En el caso de que entre estos diámetros exista una diferencia mayor a 5cm deberá repetirse el ensayo.

Finalmente se revisa el hormigón extendido para buscar signos de segregación.

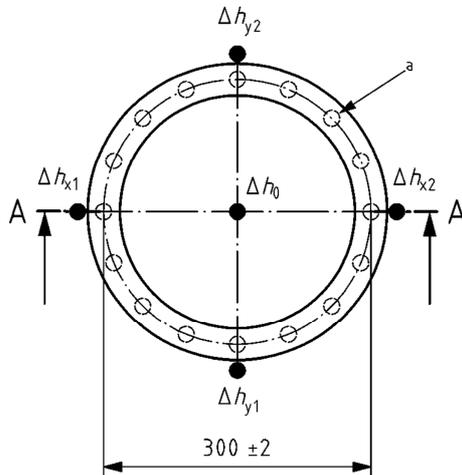
### 2.3.1.2.- Ensayo del anillo Japonés

El ensayo del anillo J determina: la capacidad de paso para fluir a través de aberturas estrechas (incluidos los espacios entre las armaduras y otras obstrucciones sin segregación ni bloqueo), el escurrimiento y el tiempo de flujo t50, del hormigón autocompactante al pasar por el anillo japonés.

El ensayo no es aplicable cuando el tamaño máximo del árido es mayor de 40mm.

### Anillo J de barras poco separadas

Barras lisas de acero, de  $(18 \pm 0,5)$  mm  $\emptyset$ , dispuestas en un anillo de  $(300 \pm 2)$  mm de diámetro (con un espaciado entre las barras de  $(41 \pm 1)$  mm) con las dimensiones que se muestran en las figuras 1 y 2.

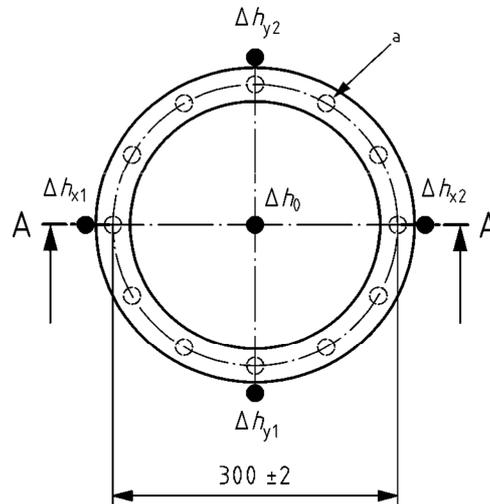


**a** 16 barras lisas de acero con separación constante ( $\pm 0,5$  mm)

**$\Delta h$**  Diferencia de altura entre la parte superior del anillo japonés y la altura máxima del hormigón en los puntos indicados

### Anillo J de barras muy separadas

Barras lisas de acero, de  $(18 \pm 0,5)$  mm  $\emptyset$ , dispuestas en un anillo de  $(300 \pm 2)$  mm de diámetro (con un espaciado entre las barras de  $(59 \pm 1)$  mm) con las siguientes dimensiones.



**a** 12 barras lisas de acero con separación constante ( $\pm 0,5$  mm)

**$\Delta h$**  Diferencia de altura entre la parte superior del anillo japonés y la altura máxima del hormigón en los puntos indicados

El empleo de los distintos tipos de anillo para la realización del ensayo vendrá determinado por la cantidad de armado que se vaya emplear en la puesta en obra. El ensayo con menor separación entre las barras simula un armado más denso.

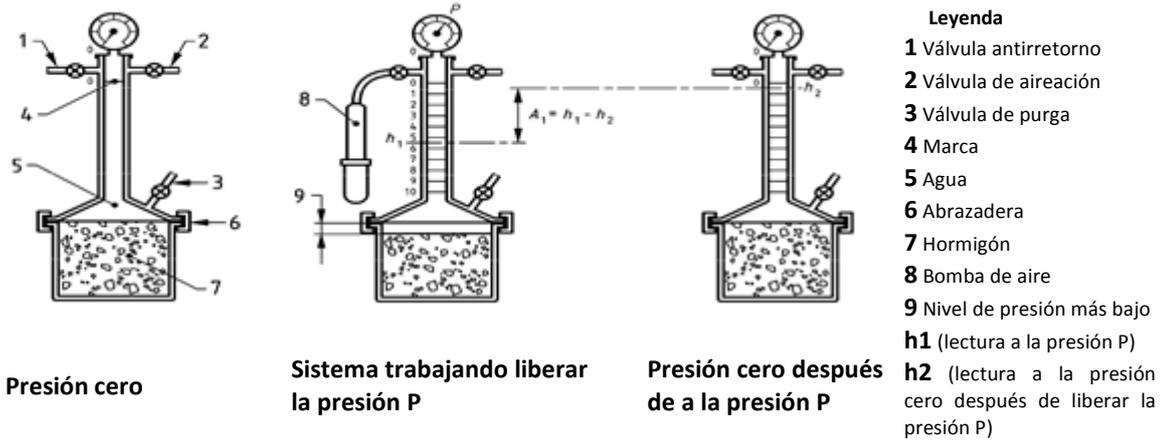
#### 2.3.1.3.- Ensayo de determinación de contenido de aire

Existen dos métodos para la determinación del contenido de aire en el hormigón.

- Método de la columna de agua

Este método consiste en introducir en un recipiente estanco agua hasta una altura predeterminada sobre una muestra de hormigón compactado de volumen conocido y aplicar una presión de aire predeterminada sobre el agua. La reducción en volumen del aire en la muestra del hormigón se mide observando la cantidad que disminuye el nivel del agua, habiendo calibrado la columna de agua en función del porcentaje de aire en la muestra de hormigón.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



- Método del manómetro

Este método consiste en introducir una muestra de hormigón cuyo volumen de aire es desconocido en una cámara de aire sellada, a la que se aplica un volumen de aire conocido a una presión también conocida. El dial del manómetro se calibra en términos de porcentaje de aire para la presión resultante.

Estos métodos no son aplicables a hormigones fabricados con áridos ligeros, escorias de alto horno o áridos de alta porosidad, debido al alto factor de corrección del árido, comparado con el contenido de aire ocluido del hormigón.

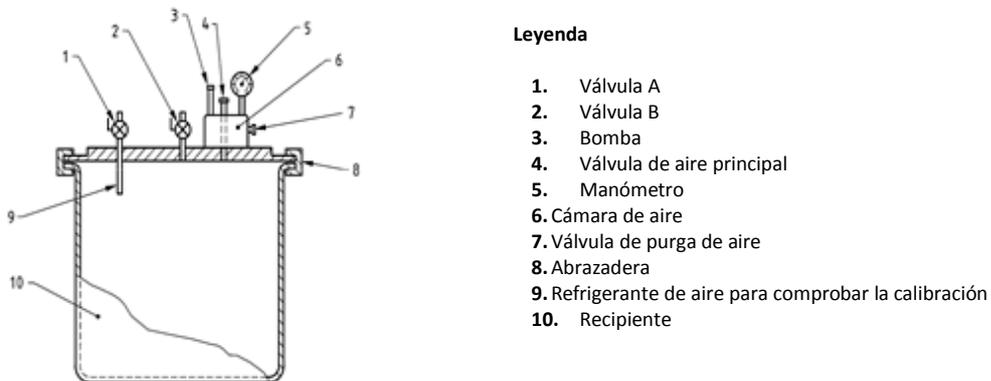


Figura 6.- Aire ocluido

2.3.1.4.- Ensayo del embudo en V

Este ensayo sirve para determinar la viscosidad y la capacidad de llenado del hormigón autocompactante mediante el tiempo de flujo. Este ensayo solo es aplicable cuando el tamaño máximo del árido inferior a 22,4mm.

Para la realización de este ensayo utilizaremos el denominado embudo en V

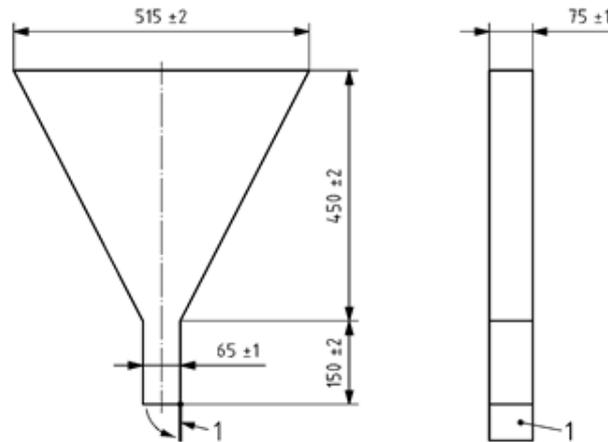


Figura 7.- Embudo en "V"

Este posee en la parte inferior una compuerta hermética de apertura rápida. El material de composición del embudo debe ser de metal, con superficies completamente lisas, difícilmente atacable por el cemento y no propensas a la oxidación.

### 2.3.1.5.- Ensayo de la caja en L

Este ensayo nos determina la capacidad de paso y fluidez del hormigón autocompactante a través de aberturas estrechas sin presencia de segregación ni bloqueo. Existen dos variantes una con dos barras y otra con tres; esta última simula un armado más denso.

El ensayo de la caja en L debe realizarse con una estructura rígida con superficies lisas, planas y no debe ser fácilmente atacada por la pasta de cemento ni ser propensa a oxidarse.

Las barras de acero deben ser lisas de  $\varnothing 12 \pm 0,2$  mm y con una separación entre ellas de  $59 \pm 1$  mm para el ensayo de dos barras y para el de tres barras de  $\varnothing 12 \pm 0,2$  mm con una separación de  $41 \pm 1$  mm. Las barras deben estar verticales y equidistantes entre ellas.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

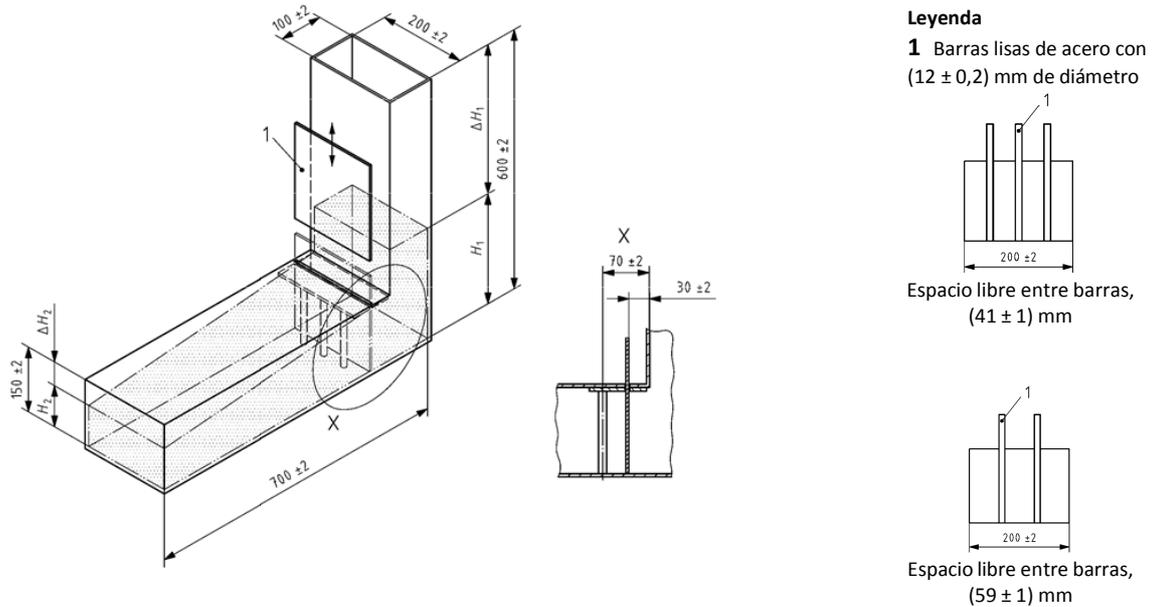


Figura 8.- Caja en "L"

Previamente a la realización del ensayo se humedecerá la caja en L, pero evitando el exceso de agua.

2.3.1.6.- Ensayo del índice visual de estabilidad

Este ensayo consiste en establecer un juicio de valor calificando los aspectos relativos a la exudación de la lechada y al bloqueo del árido grueso. Esta apreciación es recomendable realizar a la vez que el ensayo de extensión de flujo.

IEV	
≤ 0	No hay segregación ni lechada bordeando el hormigón en el resultado final del ensayo de extensión de flujo
0,5	No hay mortero desprendido de la pasta, pero hay algo de segregación o burbujas de aire en la superficie
1	No hay segregación en la masa de hormigón, pero existen evidencias de pequeño asentamiento o burbujas de aire
1,5	Empieza a aparecer una pequeña banda de mortero alrededor de la masa de hormigón
2	Dicha banda de mortero puede llegar a estar en el orden de 10 mm
3	Indica evidencia de segregación. La banda de mortero alrededor de la masa total puede superar los 10 mm

Tabla 11.- IEV

Normalmente un hormigón que tuviese un índice superior a 3 no sería considerado autocompactante, estando entre 2 y 3 requeriría ajustes en la dosificación. Por lo que para que el resultado sea admisible debe ser  $IEV \leq 1,5$ .

### 2.3.1.7.- Ensayo por segregación por tamiz

La finalidad de este ensayo es la determinación de la resistencia a la segregación del hormigón.

Este ensayo no es aplicable en caso de que el hormigón contenga fibras o árido ligero.

Para la realización de este ensayo se coge una muestra de unos 10 litros de hormigón y se meten en el recipiente, este se cubre para evitar la evaporación del agua contenida en el hormigón. Se deja reposar durante 15 minutos en una superficie horizontal y tras este periodo se observa si existe exudación en la muestra. A continuación se vierte en el tamiz la parte superior de la muestra. Tras 2 minutos se pesa el material que ha pasado a través de este, obteniendo el nivel de segregación como porcentaje de la muestra total tamizada.

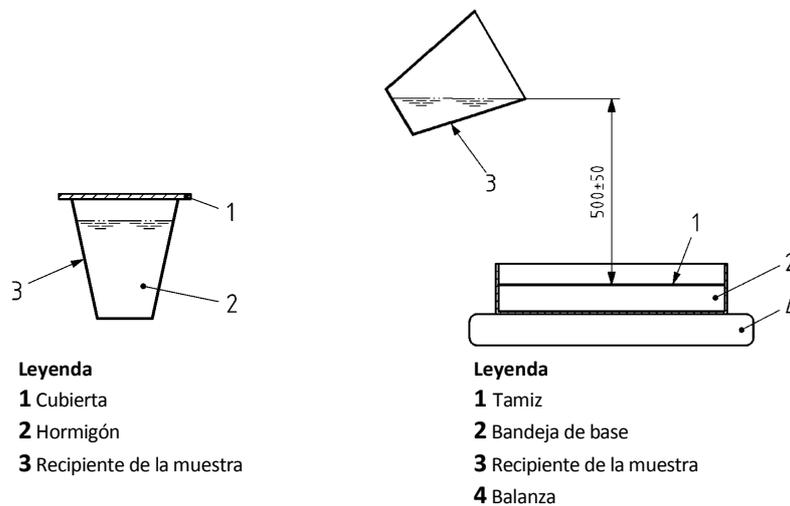


Figura 12.- Ensayo segregación por tamiz

### 2.3.2.- Ensayos del hormigón en estado endurecido

Al Hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas se le pueden realizar los mismo ensayos que se realizan en el hormigón convencional, autocompactante y a los hormigones reforzados con fibras. Éstos son:

### 2.3.2.1.- Ensayo por compresión simple de probetas cilíndricas

Para la realización de este ensayo nos regiremos por las normas UNE-83507 y UNE 12390-3.

Este ensayo sirve para la determinación de la resistencia a compresión de probetas de hormigón reforzado con fibras en estado endurecido.

El proceso para obtener un resultado puntual de resistencia a compresión del HRF pasa por la fabricación de la amasada, toma de muestra, fabricación de la probeta, conservación de la misma, pulido y procedimiento de rotura propiamente dicho. Según las normas citadas en los apartados anteriores.

La máquina que se utilizará será la misma que la utilizada en compresión simple. Además se le colocarán unos anillos, con una separación entre ellos de 15 cm, con dispositivos de medición de deformaciones LVDT.

### 2.3.2.2.- Ensayo de determinación del módulo de elasticidad a compresión

Para la realización de este ensayo nos regiremos por la UNE-83316, sirve para determinar el módulo de elasticidad estático del hormigón endurecido mediante las deformaciones provocadas en la probeta sometida a una carga de compresión simple, durante varios ciclos de carga y descarga.

### 2.3.2.3.- Determinación del índice de tenacidad a compresión

Para la realización de este ensayo nos regiremos por la UNE-83508, sirve para determinar la tenacidad a compresión del hormigón reforzado con fibras.

La máquina utilizada para realizar este ensayo será la misma que la empleada en el ensayo anterior.

El equipo de medida de la deformación consiste en dos transductores electrónicos que miden la deformación en la dirección de la carga con una precisión de 1 micra.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

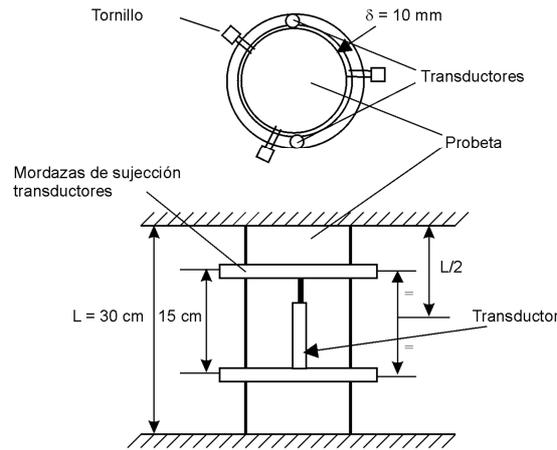


Figura 13.- Equipo de medida de deformación

2.3.2.4.- Rotura de probetas por flexotracción con carga a 4 puntos

Para la realización de este ensayo nos regiremos por la UNE-83509, que determina la carga máxima de rotura por flexotracción en hormigones con fibras, empleando probetas prismáticas con cargas a un tercio de la luz.

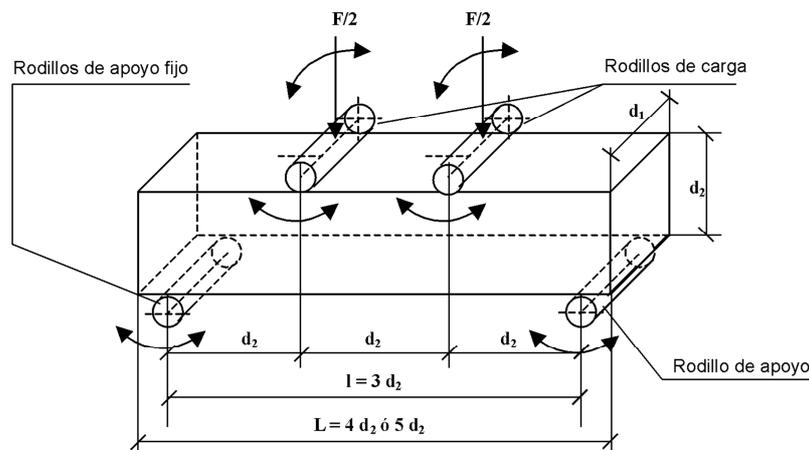


Figura 14.- Esquema aplicación carga a 4 puntos

Las probetas deben ser prismáticas, con una longitud total mínima de 150 mm y mayor que el triple del canto de la probeta a ensayar. Se recomienda que su sección sea de 100 X 100 o de 150 X 150mm. La dimensión más pequeña nunca será inferior a tres veces el tamaño máximo del árido grueso, ni a dos veces la dimensión máxima de la fibra.

2.3.2.5.- Determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura

Para la realización de este ensayo nos regiremos por la UNE-83510. Este ensayo determina la resistencia a primera fisura, tenacidad e índice de tenacidad a flexotracción del hormigón reforzado con fibras mediante el análisis de la curva carga-

flecha obtenida en un ensayo de flexotracción con cargas a un tercio de la luz entre ejes de apoyos.

Las probetas deben de ser las definidas en la Norma UNE 83509 y se conservan de acuerdo con la Norma UNE 83504 y se colocan sobre la prensa, según lo indicado en la Norma UNE 83509.

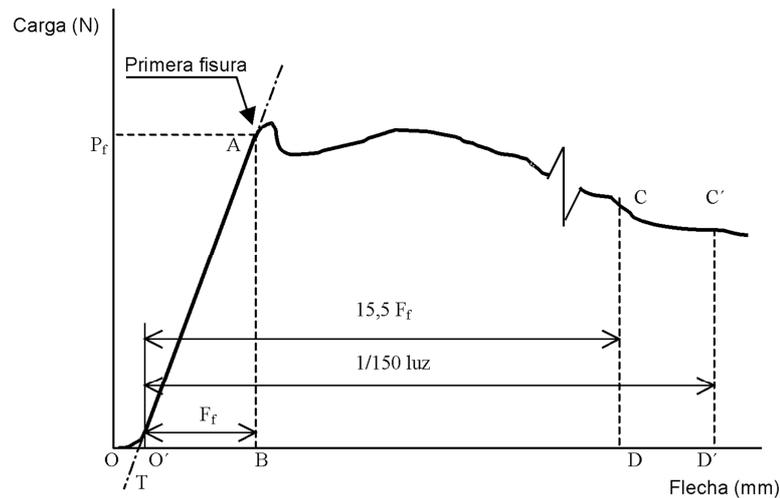


Figura 15.- Esquema primera fisura y tenacidad

### 2.3.2.6.- Determinación de la resistencia a cortante

Para la realización de este ensayo nos regiremos por la UNE-83511, que determina de la resistencia a cortante del hormigón con fibras mediante corte directo doble.

En la realización de este ensayo se empleará maquinaria que cumplirá las especificaciones recogidas en la Norma UNE 83507.

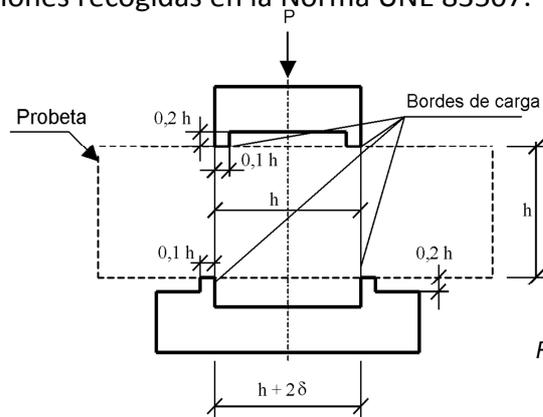


Figura 16.- Ensayo resistencia a cortante

Las probetas se fabricarán de acuerdo con la Norma UNE 83504. Sus condiciones en el momento del ensayo serán las correspondientes al fin del periodo de curado. El plazo transcurrido entre esta operación y el ensayo será lo más breve posible.

### 2.3.2.7 Determinación de la resistencia al impacto

Para la realización de este ensayo nos regiremos por la UNE-83514 para determinar la resistencia al impacto de hormigones con fibras.

Las muestras para ensayo de impacto se obtendrán a partir de probetas cilíndricas por corte perpendicular a la generatriz de las mismas serán de 15 x 30cm. Posteriormente durante el corte se eliminarán los 2cm superiores de las probetas. Para el corte y tallado de las probetas se empleará la sierra de corte descrita anteriormente.

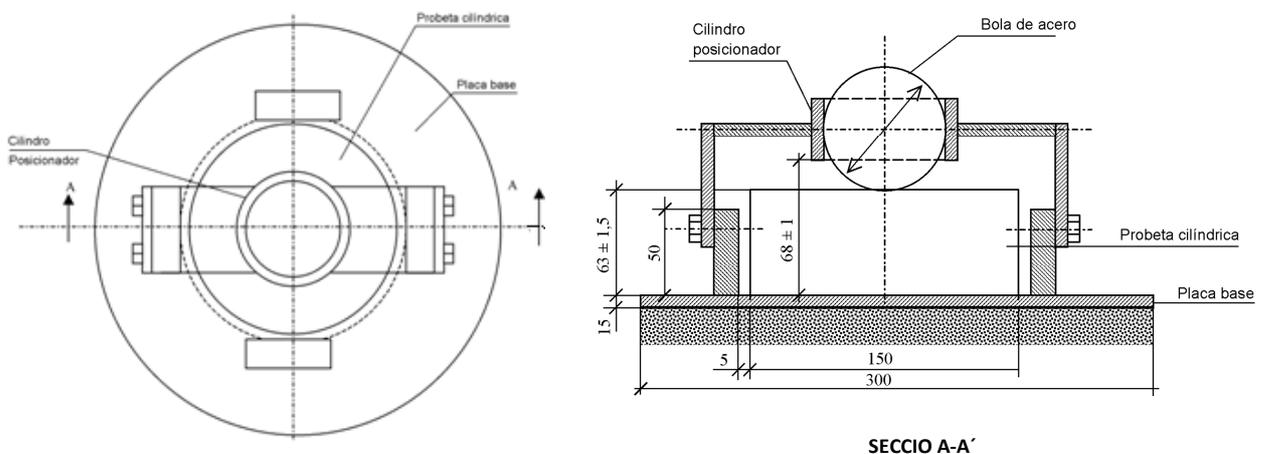


Figura 17.- Esquema ensayo resistencia al impacto

### 2.3.2.8.- Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción (Método Barcelona)

Para la realización de este ensayo nos regiremos por la UNE-83515 para determinar la resistencia a la fisuración, la tenacidad y la resistencia residual a tracción del hormigón reforzado con fibras mediante un ensayo de doble punzonamiento sobre una probeta cilíndrica

La máquina para el ensayo consiste en una prensa universal o de ensayo a compresión según la Norma UNE 83507:2004. Se utilizará un sistema de adquisición de datos que pueda registrar, de forma simultánea, la carga aplicada y la deformación circunferencial total de la probeta.

La probeta debe ser cilíndrica, de altura aproximadamente igual a su diámetro. La dimensión normal del diámetro de la probeta debe ser de 150mm.

### 2.3.2.9 Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)

Para la realización de este ensayo nos regiremos por la UNE-14651:2005+A1. Este ensayo sirve para determinar la resistencia a la tracción por flexión del hormigón con fibras metálicas sobre probetas moldeadas. El método permite determinar el límite de proporcionalidad (LOP) y un conjunto de valores de la resistencia residual a la tracción por flexión.

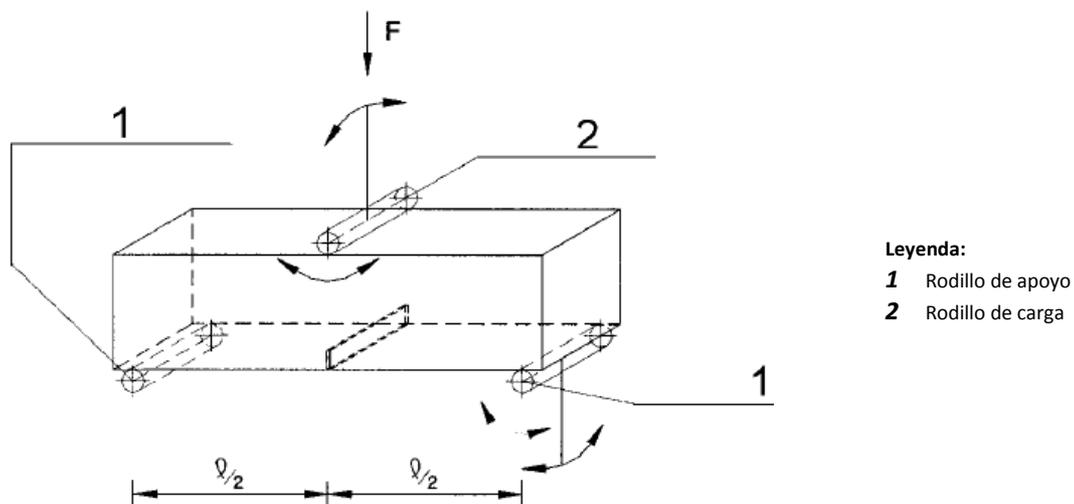


Figura 18.- Esquema ensayo determinación resistencia a tracción por flexión

La distancia entre los centros de dos rodillos de apoyo (es decir, la luz de vano) debe ser igual a 500mm.

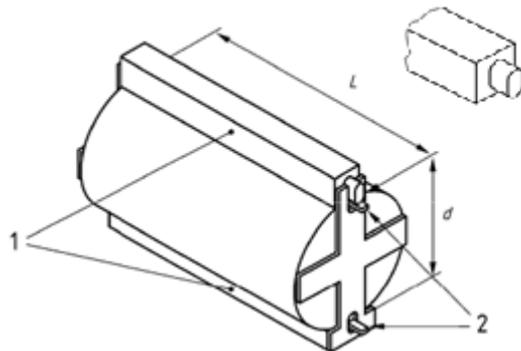
Las probetas deben ser prismas conformes a la Norma con un tamaño nominal (altura y anchura) de 150 mm y una longitud  $L$  tal que  $550 \text{ mm} \leq L \leq 700 \text{ mm}$ .

Para la entalla de las probetas debe utilizarse un método de aserrado por vía húmeda.

### 2.3.2.10 Resistencia a tracción indirecta de probetas

Para la realización de este ensayo nos regiremos por la UNE-12390-6. Este ensayo sirve para determinar la resistencia a tracción indirecta sobre probetas cilíndricas de hormigón endurecido. Para ello se somete una probeta cilíndrica a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha en toda su longitud. El resultado de la fuerza de tracción ortogonal resultante provoca que la probeta rompa a tracción.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



**Leyenda**

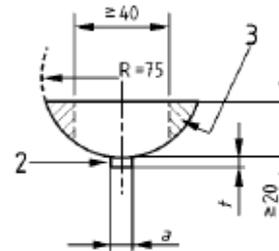
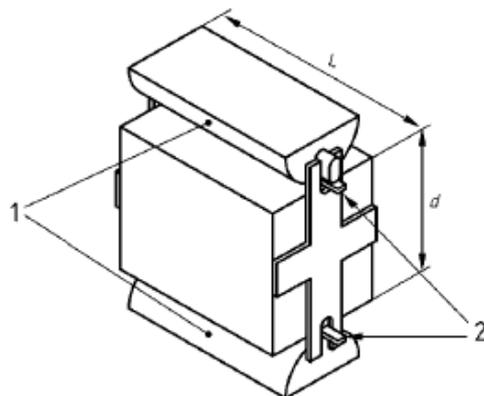
- 1** Pieza de acero de carga
- 2** Bandas de apoyo de fibras prensadas
- L** Longitud de la probeta
- d** Diámetro de la probeta

Figura 19.- Dispositivo de ensayo para probetas cilíndricas

Las probetas de ensayo deben ser cilíndricas, de acuerdo con las especificaciones de la Norma. Previamente al ensayo, se realizará el rectificado de probetas: las desigualdades superficiales se deben eliminar mediante pulido y las desviaciones angulares se deben corregir mediante corte y/o pulido. También se deberá secar y limpiar la superficie de las probetas antes de su colocación en la máquina de ensayo.

A no ser que se utilice un dispositivo de alineación, se deben marcar dos líneas, a lo largo de las cuales se aplica la carga. Estas líneas deben ser opuestas una a otra según un plano axial y los extremos de las dos líneas deben conectarse en cada cara de la probeta, para definir claramente el plano de carga.

Cuando la probeta esté preparada, se procederá a la colocación de la probeta



**Leyenda**

- |                                              |                                       |
|----------------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>1</b> Pieza de acero de carga             | <b>d</b> Altura de la probeta         |
| <b>2</b> Bandas de apoyo de fibras prensadas | <b>R</b> Radio de la pieza de carga   |
| <b>3</b> Segmento que puede cortarse         | <b>a</b> Anchura de la banda de apoyo |
| <b>L</b> Longitud de la probeta              | <b>t</b> Espesor de la banda de apoyo |

## 2.4.- Estudio de la resistencia a flexión del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas

Según Fernández Gómez (2008), Klug y Holschemacher se puede indicar que con los mismos materiales, y dosificando para una misma relación A/C un hormigón con convencional y un hormigón autocompactante, las propiedades mecánicas que se obtienen son semejantes en ambos casos, e incluso, ligeramente mejores en el hormigón autocompactante.

El incremento de la resistencia a flexotracción al adicionar fibras de acero al hormigón es considerablemente mayor que el de la resistencia a compresión y a tracción. Esto se debe al comportamiento dúctil del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas en la zona fisurada por tracción, desarrollando resistencias residuales.

Los ensayos de flexotracción en el HACRF-P se realizan principalmente sobre probetas prismáticas. Normalmente, se determina la resistencia a primera fisura, la resistencia a rotura y residual por flexotracción.

Acerca de la resistencia a flexión del hormigón reforzado con fibras se han realizado muchos estudios, destacando los de Johnston, Swamy, Lankard y Edgington, todos estos autores vienen a afirmar que los principales factores que afectan a la resistencia a la flexión son:

- el porcentaje de las fibras incorporadas.
- La esbeltez de la fibra.
- La orientación de las fibras.
- La adherencia de las fibras a la matriz

En estudios realizados por Zollo R (1984) sobre hormigón convencional reforzado con fibras de polipropileno, se observan pequeños incrementos de la resistencia (1-2%) cuando el contenido de fibras en volumen es del 0,1%, mientras que para contenidos del 0,2-0,3% en volumen existía una reducción de la resistencia a flexión a la primera fisura.

En los estudios realizados por Morgan et al. (1999) se muestra un pequeño aumento de la resistencia a flexión en los hormigones reforzados con fibras sintéticas proyectados por vía húmeda. Estos valores están alrededor de los 7 MPa en el

hormigón convencional y 8,5 en el hormigón con fibras de polipropileno, con dosificaciones entre 5-10 kg/m<sup>3</sup>. Según la ACHE sobre la resistencia a rotura por flexo tracción influyen también:

- La calidad del proceso de curado del hormigón
- La posición de la probeta durante el vertido del hormigón
- El sistema de compactación
- El uso de aditivos superfluidificantes



### 3.- Programa experimental

3.1.- Tipificación de los elementos estructurales

3.2.- Tipificación del material

3.3.- Tipificación de cada viga

3.4.- Tabla tipo de dosificación y ensayos del hormigón fresco

3.5.- Programación de ejecución y rotura de las probetas y vigas

3.6.- Proceso de ejecución

### 3.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1.- Tipificación de los elementos estructurales

A continuación se va a exponer el programa experimental de los distintos elementos estructurales que hemos realizado. El programa experimental se ha basado en la realización de una viga patrón y dos fases a partir de ella. La fase 1 consiste en realizar con el mismo patrón de armado longitudinal una inclusión de fibras poliméricas en la mezcla con distintas densidades para ver el aumento de tenacidad con respecto a la viga patrón. La fase 2 consiste en reducir a la mitad el armado longitudinal inferior para ver la variación en la resistencia de las vigas, conservando las mismas densidades de fibras que en la fase 1. De esta forma podemos comprobar si ahorrándonos acero y puesta en obra podemos conseguir una buena tenacidad en las vigas.

		FIBRAS KG/M3 + ARMADURA INFERIOR	ENSAYOS HORMIGÓN FRESCO					ENSAYOS HORMIGÓN ENDURECIDO			
			ESCURRIMIENTO		ANILLO JAPONÉS	EMBUDO EN "V"	AIRE OCLUIDO	PROB. PRISMÁTICAS	PROB. CILÍNDRICAS		VIGA
			CON FIBRAS	SIN FIBRAS				FLEXIÓN	MODULO DE YOUNG	ROTURA	FLEXIÓN
HACRF-P	PATRON	0 + 4Ø8	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	FASE 1	6,2 + 4Ø8	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI
		9 + 4Ø8	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI
		12,4 + 4Ø8	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	FASE 2	6,2 + 2Ø8	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
		9 + 2Ø8	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI
		12,4 + 2Ø8	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI

Tabla 11.- Programa experimental. Elementos estructurales

### 3.2.- Tipificación del material.

El hormigón que se ha proyectado para la ejecución del proyecto, tal y como se ha descrito anteriormente, está designado de la siguiente forma:

$$T - R / f - R1 - R3 / C / TM - TF / A$$

Dónde:

**T** Indicativo que será HMF en el caso de hormigón en masa, HAF en el caso de hormigón armado y HPF en el caso de hormigón pretensado.

**R** Resistencia característica a compresión especificada, en N/mm<sup>2</sup>.

**f** Indicativo del tipo de fibras, P en el caso de fibras poliméricas.

**R1, R3** Resistencia característica residual a flexotracción especificada  $f_{R,1,k}$  y  $f_{R,3,k}$ , en N/mm<sup>2</sup>.

**C** Letra inicial del tipo de consistencia, tal y como se define en el artículo 31.5 de la EHE-08.

**TM** Tamaño máximo del árido en milímetros.

**TF** Longitud máxima de la fibra, en mm.

**A** Designación del ambiente, de acuerdo con el artículo 8.2.1 de la EHE-08.

Así, el hormigón proyectado es el siguiente:

$$\text{HACRF-35/AC-E2+AC-V1+AC-RB2/P-5,64-6,01/12,5-60/I}$$

La dosificación final que se ha adoptado a la hora de elaborar las vigas es la siguiente:

Finos	a/c 0,6	Kg/m <sup>3</sup>	Densidad	Volumen
<b>325</b>	Cem	<b>325</b>	3	108,3
	Agua	<b>195</b>	1	195,0
<b>18,5</b>	Finos 1,5	<b>18,5</b>	2,65	7,0
<b>87,9</b>	A fina 0/2	<b>517,0</b>	2,65	195,1
<b>75,7</b>	A grue 0/4	<b>757,0</b>	2,65	285,6
	Grava 12,5	<b>553,9</b>	2,65	209,0
		<b>2.366</b>		<b>1000,0</b>
<b>507,0</b>	Finos total			
	aditivo 1,3 %	4,225	1,05	4,02

Tabla 15.- Dosificación

La cantidad de finos que se ha sumado corresponde a la cantidad de finos de cada material, tamizándolo y viendo la cantidad que pasa por el último tamiz (0,063mm).

## Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

La cantidad de fibras en la dosificación que se han empleado son en diferentes cantidades.

- Patrón. 0 Kg/m<sup>3</sup>
- Patrón + 6,20 Kg/m<sup>3</sup>
- Patrón + 9,00 Kg/m<sup>3</sup>
- Patrón + 12,40 Kg/m<sup>3</sup>

Los ensayos que se van a programar en los diferentes estados del hormigón, dependiendo de la cantidad de fibras que contenga el hormigón realizado, son los siguientes:

	ENSAYOS DE HORMIGÓN FRESCO	ENSAYOS DE HORMIGÓN ENDURECIDO
RACRF-P_0 Kg/m <sup>3</sup>	ESCURRIMIENTO ANILLO JAPONÉS EMBUDO EN "V" AIRE OCLUIDO	PRISMÁTICA - FLEXIÓN CILÍNDRICA - M. YOUNG CILÍNDRICA - ROTURA VIGA - FLEXIÓN
RACRF-P_6,2 Kg/m <sup>3</sup>	ESCURRIMIENTO ANILLO JAPONÉS EMBUDO EN "V" AIRE OCLUIDO	PRISMÁTICA - FLEXIÓN CILÍNDRICA - M. YOUNG CILÍNDRICA - ROTURA VIGA - FLEXIÓN
RACRF-P_9 Kg/m <sup>3</sup>	ESCURRIMIENTO ANILLO JAPONÉS EMBUDO EN "V" AIRE OCLUIDO	PRISMÁTICA - FLEXIÓN CILÍNDRICA - M. YOUNG CILÍNDRICA - ROTURA VIGA - FLEXIÓN
RACRF-P_12,4 Kg/m <sup>3</sup>	ESCURRIMIENTO ANILLO JAPONÉS EMBUDO EN "V" AIRE OCLUIDO	PRISMÁTICA - FLEXIÓN CILÍNDRICA - M. YOUNG CILÍNDRICA - ROTURA VIGA - FLEXIÓN

Tabla 12.- Material hormigón utilizado

También, se va a realizar el ensayo del acero empleado en las vigas y el ensayo que se va a realizar es el siguiente:

	ENSAYO
ACERO B-500-SD	TRACCIÓN

Tabla 13.- Material acero utilizado

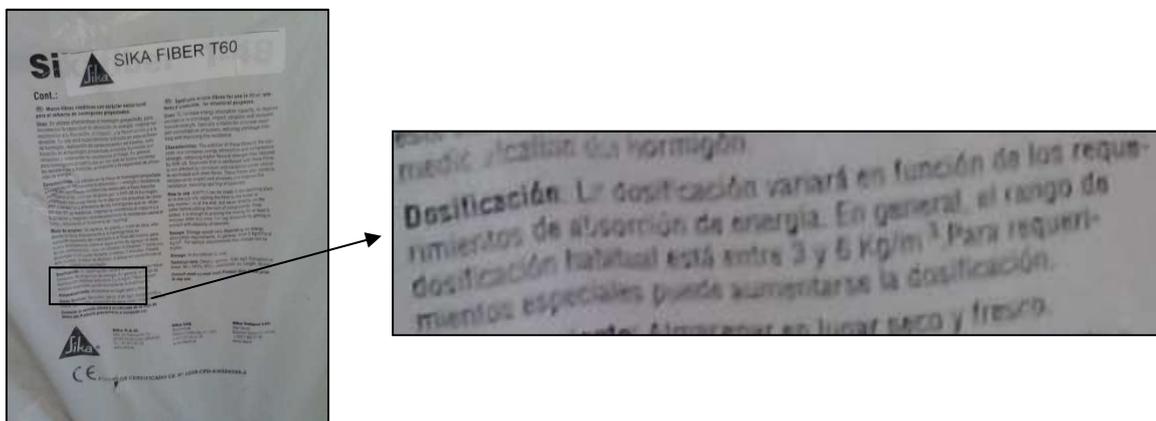
### 3.3.- Tipificación de cada viga

El objetivo de este estudio es comprobar la resistencia a flexión y a compresión de unas vigas realizadas con Hormigón Autocompactante Reforzado con Fibras Poliméricas (HACRF-P), para ello hemos realizado un programa experimental, donde hemos definido los días de hormigonado y las características de cada viga. De esta manera, fuimos nombrando cada viga, definiendo el armado y la cantidad de fibras por m<sup>3</sup>.

Se van a realizar 7 vigas las cuales vamos a definir detalladamente:

Todas las vigas tiene las mismas dimensiones: 192 cm de longitud, 17 cm de altura y 10 cm de canto.

Todas las vigas, exceptuando la viga patrón, llevan fibras poliméricas. Tanto el fabricante como la normativa recomiendan no sobrepasar los 6kg/m<sup>3</sup>. Nosotros hemos sobrepasado en todas las vigas esta cantidad para ver su comportamiento. Es importante resaltar que por tanto, en todas las vigas en mayor o menor medida nos hemos ayudado de varillas y una maza de goma a modo de pequeño vibrado.



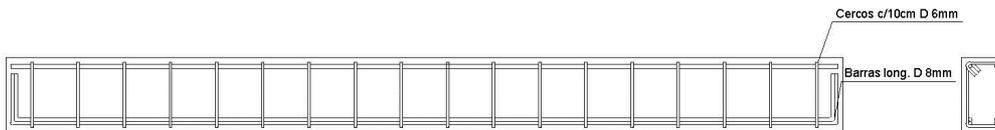
#### Viga: V.2.1



La viga V.2.1 es la que hemos definido como viga patrón y la densidad de fibras poliméricas es nula. El armado que presenta la viga está compuesto por 2Ø8 mm como

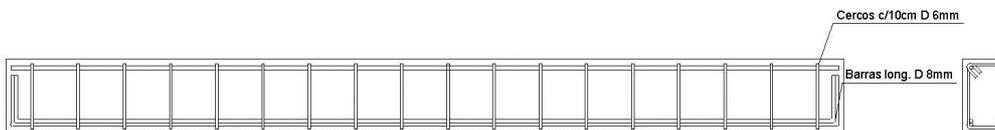
armadura longitudinal superior y 4Ø8 mm como armadura longitudinal inferior, cabe destacar que los 4 redondos inferiores para facilitar la operación de hormigonado se han dispuesto en dos capas como se puede observar en la sección de la viga. El armado transversal dispuesto es 18Ø6 cada 10 cm.

**Viga: V.2.2**



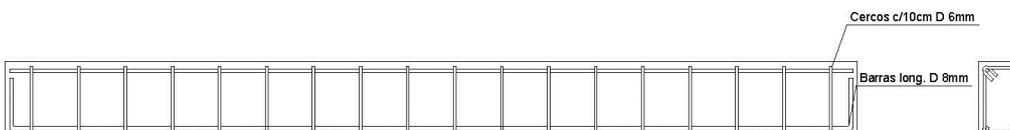
La viga V.2.2 tiene una densidad de 12,4 kg/m³, es la máxima cantidad que hemos utilizado. El armado que presenta la viga está compuesto por 2Ø8 mm como armadura longitudinal superior y 4Ø8 mm como armadura longitudinal inferior, cabe destacar que los 4 redondos inferiores para facilitar la operación de hormigonado se han dispuesto en dos capas como se puede observar en la sección de la viga. El armado transversal dispuesto es 18Ø6 cada 10 cm.

**Viga: V.2.3.**



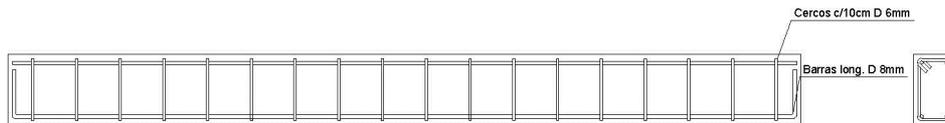
La viga V.2.3 tiene una densidad de 6,2 kg/m³, es la mínima cantidad que hemos dispuesto en las vigas. El armado que presenta la viga está compuesto por 2Ø8 mm como armadura longitudinal superior y 4Ø8 mm como armadura longitudinal inferior, cabe destacar que los 4 redondos inferiores para facilitar la operación de hormigonado se han dispuesto en dos capas como se puede observar en la sección de la viga. El armado transversal dispuesto es 18Ø6 cada 10 cm.

**Viga: V.2.4.**



La viga V.2.4 tiene una densidad de  $12,4 \text{ kg/m}^3$ , es la máxima cantidad que hemos utilizado. El armado que presenta la viga está compuesto por  $2\varnothing 8$  mm como armadura longitudinal superior y  $2\varnothing 8$  mm como armadura longitudinal inferior. El armado transversal dispuesto es  $18\varnothing 6$  cada 10 cm.

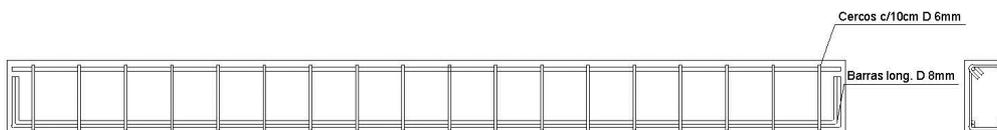
**Viga: V.2.5.**



La viga V.2.5 tiene una densidad de  $6,2 \text{ kg/m}^3$ . El armado que presenta la viga está compuesto por  $2\varnothing 8$  mm como armadura longitudinal superior y  $2\varnothing 8$  mm como armadura longitudinal inferior. El armado transversal dispuesto es  $18\varnothing 6$  cada 10 cm.

Es importante tener en cuenta que la organización de las vigas es la siguiente, porque a priori, se pretendía realizar las vigas las siguientes densidades de fibras:  $6,2$ ,  $12,4$  y  $24,8 \text{ kg/m}^3$ . Durante el proceso de amasado de las amasadas de  $12,4 \text{ kg/m}^3$ , variamos el programa experimental debido a que la amasadora se bloqueaba por falta de potencia. De esta forma llegamos a la conclusión de efectuar una amasada que tuviera  $9 \text{ kg/m}^3$  para poder observar como varían las propiedades mecánicas con una pequeña variación del aporte de fibras poliméricas.

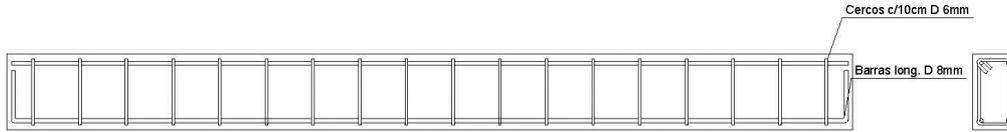
**Viga: V.2.6.**



La viga V.2.6 tiene una densidad de  $9 \text{ kg/m}^3$ . El armado que presenta la viga está compuesto por  $2\varnothing 8$  mm como armadura longitudinal superior y  $4\varnothing 8$  mm como armadura longitudinal inferior, cabe destacar que los 4 redondos inferiores para facilitar la operación de hormigonado se han dispuesto en dos capas como se puede observar en la sección de la viga. El armado transversal dispuesto es  $18\varnothing 6$  cada 10 cm.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

**Viga: V.2.7.**



La viga V.2.7 tiene una densidad de 9 kg/m<sup>3</sup>. El armado que presenta la viga está compuesto por 2Ø8 mm como armadura longitudinal superior y 2Ø8 mm como armadura longitudinal inferior. El armado transversal dispuesto es 18Ø6 cada 10 cm.

<b>PFG_VIGAS V.2.1</b>	<b>PFG_VIGAS V.2.2</b>	<b>PFG_VIGAS V.2.3</b>
FLEXION	FLEXION	FLEXION
patrón	patrón+12,4	patrón+6,2
2Ø8 + 4Ø8	2Ø8 + 4Ø8	2Ø8 + 4Ø8
18Ø6 c/10cm.	18Ø6 c/10cm.	18Ø6 c/10cm.
polimérica	polimérica	polimérica
<b>PFG_VIGAS V.2.4</b>	<b>PFG_VIGAS V.2.5</b>	<b>PFG_VIGAS V.2.6</b>
FLEXION	FLEXION	FLEXION
1/2 patrón+12,4	1/2 patrón+6,2	patrón+9
2Ø8 + 2Ø8	2Ø8 + 2Ø8	2Ø8 + 4Ø8
18Ø6 c/10cm.	18Ø6 c/10cm.	18Ø6 c/10cm.
polimérica	polimérica	polimérica
	<b>PFG_VIGAS V.2.7</b>	
	FLEXION	
	1/2 patrón+9	
	2Ø8 + 2Ø8	
	sin armado	
	polimérica	



### 3.5.- Programación de ejecución y rotura de las probetas y vigas

NOMBRE	CANTIDAD DE PROBETAS/VIGAS	DIA HORMIGONADO	DIA DE DESENCOFRADO	DIA DE CURADO	DIA DE ROTURA
<b>E.P_1</b>	2 Probetas cilíndricas	26/04/2013	27/04/2013	27/04/2013	<b>24/05/2013</b>
<b>E.P_2</b>	2 Probetas cilíndricas	29/04/2013	30/04/2013	30/04/2013	<b>27/05/2013</b>
<b>E.P_3</b>	3 Probetas cilíndricas	29/04/2013	30/04/2013	30/04/2013	<b>27/05/2013</b>
<b>V.2.2</b>	1 Viga+2 Cilíndricas+ 2 Rectangulares	02/05/2013	03/05/2013	03/05/2013	<b>30/05/2013</b>
<b>V.2.3</b>	1 Viga+2 Cilíndricas+ 2 Rectangulares	02/05/2013	03/05/2013	03/05/2013	<b>30/05/2013</b>
<b>V.2.4</b>	1 Viga+2 Cilíndricas+ 2 Rectangulares	06/05/2013	07/05/2013	07/05/2013	<b>03/06/2013</b>
<b>V.2.1</b>	1 Viga+2 Cilíndricas+ 2 Rectangulares	06/05/2013	07/05/2013	07/05/2013	<b>03/06/2013</b>
<b>V.2.5</b>	1 Viga+2 Cilíndricas+ 2 Rectangulares	09/05/2013	10/05/2013	10/05/2013	<b>06/06/2013</b>
<b>V.2.6</b>	1 Viga+2 Cilíndricas+ 2 Rectangulares	09/05/2013	10/05/2013	10/05/2013	<b>06/06/2013</b>
<b>V.2.7</b>	1 Viga+2 Cilíndricas+ 2 Rectangulares	09/05/2013	10/05/2013	10/05/2013	<b>06/06/2013</b>

E.P= Ensayos previos

Tabla 14.- Programación probetas y vigas

### 3.6.- Proceso de ejecución

El proceso de ejecución que se va a seguir en cada viga es el siguiente:

1. Cálculo de la humedad total y libre de los áridos que se van a emplear
2. Pesada de los materiales a verter en la amasadora
3. Verter los materiales en la amasadora, teniendo en cuenta que el último es agua y el aditivo
4. Amasar los materiales de acuerdo a la norma correspondiente
5. Realizar los ensayos del hormigón tanto con como sin fibras
6. Reamasar el hormigón
7. Hormigonar la viga
8. Obtener probetas cilíndricas y prismáticas del hormigón realizado, se tapan con un plástico y se acopian 24 horas en el laboratorio
9. Transcurrido este tiempo, se desmoldan las probetas y las vigas, y se codifican
10. Se guardan en la cámara húmeda hasta el día de la rotura; se conservan 27 días dentro de la cámara.
11. Se extraen las probetas y se ensayan de acuerdo a las normas correspondientes
12. Se extraen las vigas, se instrumentan y se ensayan, en este caso sometidas a flexión de la viga a cuatro puntos.
13. Se extraen resultados y conclusiones

---

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

## 4.- Metodología

### 4.1.- Materiales

4.1.1.- Cemento

4.1.2.- Agua

4.1.3.- Áridos

4.1.4.- Aditivo

4.1.5.- Fibras

### 4.2.- Dosificación

### 4.3.- Tipificación del hormigón

### 4.4.- Fabricación de las vigas

4.4.1.- Ejecución del encofrado

4.4.2.- Armado. Doblado, corte y montaje de las armaduras.

4.4.3.- Realización de la amasada

4.4.4.- Realización de los ensayos para verificar la idoneidad de la amasada.

4.4.4.1- Ensayo de escurrimiento

4.4.4.2.- Ensayo del anillo japonés

4.4.4.3.- Ensayo de embudo en “V”

4.4.4.4.- Ensayo de verificación del aire ocluido

4.4.5.- Hormigonado de la viga

4.4.6.- Hormigonado de las probetas

### 4.5.-Curado

4.5.1.- Desmolde

4.5.2.- Cámara húmeda

4.5.3.- Humectación



## 4.6.- Ensayo de las probetas

### 4.6.1.- Ensayo a flexión

### 4.6.2.- Ensayo a compresión

## 4.7.- Ensayo de las armaduras

## 4.8.- Ensayo de las vigas realizadas

## 4.- METODOLOGÍA

### 4.1.- Materiales

A continuación vamos a profundizar en cada uno de los materiales utilizados en nuestro hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas, para de esta forma conocer cuál es la función de cada uno y así poder entender de mejor manera la totalidad de la mezcla.

#### 4.1.1.- Cemento

Los cementos a emplear en estos hormigones pueden ser cualquiera de los recogidos en la Instrucción de Recepción de Cementos. Se recomienda comprobar la idoneidad entre el cemento y el aditivo a utilizar ya que cada cemento reacciona de distinta forma a según qué aditivos.

La dosificación de cemento suele oscilar entre 350 y 500 kg/m<sup>3</sup>, siendo preciso para dosificaciones inferiores a los 350 kg/m<sup>3</sup> incluir adiciones activas o inertes, para aportar finos, y en cantidades crecientes cuanto menor vaya siendo el tamaño máximo del árido utilizado. Con dosificaciones de cementos superiores a 500 kg/m<sup>3</sup> hay que tomar precauciones frente a la retracción por la elevada temperatura de fraguado que va a darse. Los cementos más habituales son los de tipo I, pero se pueden emplear cualquier tipo de cementos.

El cemento empleado es de la casa CEMENTVAL MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN S.L.



Fotografía 4.- Cemento utilizado

Se trata de un CEMII/B-M (S-L) 42,5R

Dónde:

CEMII es un cemento Portland compuesto

B es menor o igual que el 3,5% de contenido en sulfatos ( $\text{SO}_3$ )

M indica que las adiciones son mixtas

S escoria de alto horno. 2/3 en masa de la suma de CaO, MgO y  $\text{SiO}_2$

L indica que contiene calizas con un contenido de carbono inferior al 0,50% en masa

42,5 Resistencia a compresión mínima a los 28 días. Expresada en  $\text{N/mm}^2$

R indica que el cemento confiere una resistencia elevada inicial.

#### 4.1.2.- Agua

En general, podrán emplearse todas las aguas sancionadas como aceptable con la práctica. Es importante destacar que el contenido de agua suele oscilar entre 150 y 200 l/m<sup>3</sup> y la relación agua/finos entre 0,9 y 1,05, a fin de no tener hormigones excesivamente cohesivos ni fácilmente exudables.

La corrección del agua por la aportada por la humedad de los áridos es esencial, así como también del agua que aportan los aditivos utilizados. Así que para cada amasada habrá que recalcular la humedad libre de los áridos a fin de ajustar el agua necesaria para ésta.

El agua que hemos empleado para fabricar nuestro hormigón la hemos obtenido de la red de abastecimiento general, tal y como lo marca, y permite, la EHE-08.

#### 4.1.3.- Áridos

En este apartado se debe tener en cuenta que dividimos los áridos que confeccionan el hormigón en 3 tipos según su tamaño, de mayor a menor diámetro denominándolos: árido grueso, arena y finos, respectivamente.

El árido grueso tiene limitado su tamaño máximo a 25 mm según el Anejo 17 de la EHE-08. Aunque la experiencia nos dice que superar un diámetro de 20 mm no es aconsejable, los tamaños más habituales de empleo comprenden entre 12 y 16 mm.

El árido rodado facilita el desplazamiento del hormigón mientras que el procedente de machaqueo mejora su resistencia a flexión. El árido no debe tener lascas y sí un buen coeficiente de forma.

En el caso que se empleen áridos de tamaño máximo de 20 mm, hay que tener en cuenta que pueden existir gránulos en cuantía de hasta un 10% de tamaño comprendidos entre 20 y 40 mm. Parte de estos gránulos pueden dificultar algunos ensayos del hormigón fresco al bloquear el paso del flujo del hormigón, cosa a tener muy en cuenta a la hora de la puesta en obra ya que podrían producir coqueas al quedar atascados estos entre las armaduras. El tamaño máximo del árido grueso para confeccionar nuestro hormigón es de 12,5mm.

La arena puede ser rodada o machacada pero es aconsejable que tenga una granulometría continua, siendo muy adecuadas las de módulo granulométrico menor a 2,5. La granulometría empleada para confeccionar el hormigón varía desde 0 a 4mm.

El elevado contenido de finos que se utiliza para realizar los hormigones autocompactantes tiene su explicación en que consiguen dar cohesión y trabajabilidad al hormigón. En consecuencia se evita la exudación del agua y la segregación de los áridos gruesos.

Los finos se pueden considerar como un árido fino cuyo tamaño máximo es aproximadamente de 0,125 pudiendo pasar entre el 70 y el 100% por el tamiz de 0,063 mm.

Es recomendable que la suma de la cantidad de los finos que pasan por el tamiz de 0,063 mm y la adición de caliza del propio cemento, no sea mayor de 250 kg/m<sup>3</sup>.

Entre los distintos tipos de áridos finos existentes destacan: el calizo, el dolomítico y la puzolana natural, siendo el más común el primero. La puzolana natural a diferencia de las otras dos es una adición activa, es decir, que reacciona con la portlandita formada durante la hidratación del cemento y contribuye al desarrollo de resistencias a largo plazo.

La granulometría de finos empleada para confeccionar el hormigón proyectado varía desde 0 a 2mm.



Fotografía 5.- Zona de acopio del árido del laboratorio de materiales. De izda. a dcha. Grava, arena 0/2 y arena 0/4mm respectivamente.

#### 4.1.4.- Aditivo

El aditivo es un producto químico que se usa en la fabricación del hormigón para mejorar sus propiedades. Los aditivos son totalmente imprescindibles, empleándose en la fabricación de hormigones autocompactantes los superfluidificantes basados en policarboxilatos modificados de base acuosa con una eficacia superior a los 30 minutos gracias al “Mecanismo de eficacia sucesiva” y capaces de reducir el aporte de agua hasta en un 40%.

El fin de su utilización es lograr una gran trabajabilidad del hormigón para que adquiera su fin de autocompactabilidad, sin haber cambiado su baja relación agua cemento a fin de garantizar una buena resistencia y durabilidad del hormigón.

En el Artículo 29º de la Instrucción EHE-08 se limita el contenido de aditivo en un 5% del peso de cemento. Aunque habitualmente el rango suele estar entre el 1 y 1,5%.

Ocasionalmente se utilizan modificadores de viscosidad estando basados generalmente en biopolímeros o en polímeros sintéticos de alto peso molecular, que se utilizan para mejorar la cohesión interna de la mezcla evitando la segregación. En caso necesario pueden emplearse otros aditivos tales como aireantes, plastificantes, retardadores del fraguado,... Éstos los hemos enumerado a fin de saber que hay una gran número de aditivos posibles para el hormigón aunque como en nuestro caso no los hemos aplicado no entraremos en más detalle.

**Hoja de Datos de Producto**  
Edición 01/10/2012  
Identificación n.º 2.1.8  
Versión n.º 1  
Sika® ViscoCrete®-3425

## Sika® ViscoCrete®-3425



Superplastificante de alto rendimiento

2.1.8

<b>Descripción del Producto</b>	El Sika® ViscoCrete®-3425 es un superplastificante de altas prestaciones para hormigones.
<b>Usos</b>	El Sika® ViscoCrete®-3425 se utiliza para la confección de hormigones con gran necesidad de reducción de agua y de excelente fluidez El Sika® ViscoCrete®-3425 se utiliza principalmente para las siguientes aplicaciones: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Hormigón prefabricado.</li> <li>■ Hormigón autocompactante.</li> </ul>
<b>Características/Ventajas</b>	El Sika® ViscoCrete®-3425 es un poderoso superplastificante que combina diferentes mecanismos de actuación. Debido a la adsorción superficial y al efecto estérico, que separan las partículas de cemento, se consiguen las siguientes propiedades : <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reducción muy importante de agua de amasado dando hormigones de alta densidad, altas resistencias y gran impermeabilidad.</li> <li>■ Excelente plasticidad, mejorando la fluidez, la colocación y la compactación.</li> <li>■ Bajo coste de energía en elementos prefabricados curados al vapor.</li> <li>■ Especialmente indicado para la preparación de hormigón autocompactante.</li> <li>■ Disminuye la retracción</li> </ul> No contiene cloruros ni sustancias que puedan provocar o favorecer la corrosión del acero y por lo tanto pueden utilizarse sin restricciones en hormigones armados o pretensados.
<b>Ensayos</b>	
<b>Certificados/Normas</b>	Cumple las especificaciones de la norma UNE-EN 934-2. Tablas 3.1 y 3.2: superplastificante / reductor.
<b>Datos del Producto</b>	
<b>Forma</b>	
<b>Apariencia/Color</b>	Líquido incoloro
<b>Presentación</b>	Contenedores de m <sup>3</sup> y bajo pedido puede suministrarse a granel
<b>Almacenamiento</b>	
<b>Condiciones de Almacenamiento/Conservación</b>	12 meses desde su fecha de fabricación, en sus envases de origen bien cerrados y no deteriorados entre + 5 °C y +35°C. Proteger de la acción directa de la luz solar y de las heladas.
<b>Datos Técnicos</b>	
<b>Composición química</b>	Policarboxilato modificado en base acuosa
<b>Densidad</b>	1,05 kg/l ± 0,01



<b>Consumo/Dosificación</b>	Dosificación recomendada: Para media trabajabilidad: 0,2-0,8% del peso del cemento Para una alta trabajabilidad, con baja relación agua/cemento y para hormigón autocompactante: 1,0-1,7 % del peso del cemento.
-----------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Ficha técnica del aditivo empleado suministrado por SIKKA S.A.

#### 4.1.5.- Fibras

Según el Anejo 14 de la EHE-08, el empleo de fibras en el hormigón tiene finalidad estructural cuando se utiliza su contribución en los cálculos relativos a alguno de los estados límite últimos o de servicio y su empleo puede implicar la sustitución parcial o total de armadura. Se considerará que las fibras no tienen función estructural, cuando se incluyan con otros objetivos como la mejora de la resistencia al fuego o el control de la fisuración.

Las fibras plásticas están formadas por un material polimérico extrusionado y posteriormente cortado. Se rigen por la norma UNE 83500-2 y sus dimensiones pueden ser variables al igual que su diámetro y su formato.

El límite superior del contenido de fibras se fija en el 1,5% en volumen del hormigón. Para mayores dosificaciones consultar el fabricante y sus especificaciones. El vertido de las fibras en la amasadora será lento y constante para garantizar la distribución homogénea de las fibras en la masa de hormigón.



Fotografía 6.- Fibras utilizadas. Sika T60.

**Hoja de Datos de Producto**  
Edición 21/03/2013  
Identificación nº 2.15  
Versión nº  
Sikafiber® T-60

## Sikafiber® T-60

Macro - fibras sintéticas con carácter estructural para el refuerzo de hormigones.

### Descripción del Producto

Es una macro-fibra de poliolefinas diseñada para ser mezclada con hormigones proyectados con el fin de aumentar su durabilidad, evitar la fisuración y aportar las resistencias estructurales especificadas.

### Usos

Se utilizan añadiéndose al hormigón proyectado, para mejorar las características siguientes:

- Resistencia a la fisuración.
- Resistencia al impacto.
- Resistencia a flexotracción.
- Resistencia a la abrasión.
- Resistencia frente ataques químicos.
- Incrementan la capacidad de absorción de energía.

Su uso está especialmente indicado en:

- Reparaciones parciales con hormigón proyectado.
- Realización de sostenimiento en túneles.
- Colaboración en el hormigón proyectado evitando la fisuración por retracción y mejorando su resistencia pasiva frente al fuego.
- En general, para hormigones proyectados en los que se busca aumentar las resistencias a tracción, al impacto y la capacidad de absorción de energía.

Sustituye a la armadura destinada a absorber las tensiones que se producen durante el fraguado y endurecimiento del hormigón proyectado

### Características/Ventajas

La adición en la masa de hormigón o mortero de estas fibras aporta las ventajas siguientes:

- Incrementan la absorción de energía y la resistencia a tracción, aportando resistencias residuales a flexo-tracción superiores a las mínimas exigidas por la EHE-08. Por ello se consideran fibras estructurales.
- No le afectan los procesos de corrosión y oxidación a diferencia de los hormigones que se refuerzan con fibras metálicas.
- Óptima adherencia fibra-hormigón debido a los tratamientos físico-químicos recibidos en su fabricación
- Asegura la distribución homogénea y uniforme de las tensiones en la masa de hormigón, evitando la formación de fisuras provocadas por la retracción durante el fraguado.
- Mejoran la resistencia al impacto y a la abrasión.
- Debido a la reducción de la fisuración que generan, aumenta la impermeabilidad.
- Reduce el riesgo de disgregación de la masa.
- Perfecta dispersión en la masa del hormigón.
- Mejoran considerablemente la resistencia pasiva al fuego, reduciendo el fenómeno de "spalling"



**Dosificación recomendada:**  
De 3 a 10 kg/ m<sup>3</sup>, pudiéndose aumentar la dosificación en función de los requerimientos especificados .

*Ficha técnica de las fibras empleadas suministradas por SIKA S.A.*

## 4.2.- Dosificación

Primeramente, recalcar que la dificultad para conseguir la dosificación correcta del hormigón autocompactante proyectado que deseábamos. La primera dificultad, que fue subsanada, fue controlar la humedad del árido, con ello obtenemos el volumen del agua que debemos restar al volumen que hay que aportar. La otra, que también fue subsanada, fue la cantidad de aditivo a verter, para ello debimos hacer varias amasadas de prueba corrigiendo el volumen de finos a aportar.

La dosificación final que se ha adoptado a la hora de elaborar las vigas es la siguiente:

Finos	a/c 0,6	Kg/m <sup>3</sup>	Densidad	Volumen
<b>325</b>	Cem	<b>325</b>	3	108,3
	Agua	<b>195</b>	1	195,0
<b>18,5</b>	Finos 1,5	<b>18,5</b>	2,65	7,0
<b>87,9</b>	A fina 0/2	<b>517,0</b>	2,65	195,1
<b>75,7</b>	A grue 0/4	<b>757,0</b>	2,65	285,6
	Grava 12,5	<b>553,9</b>	2,65	209,0
		<b>2.366</b>		<b>1000,0</b>
<b>507,0</b>	Finos total			
	aditivo 1,3 %	4,225	1,05	4,02

Tabla 15.- Dosificación

La cantidad de finos que se ha sumado corresponde a la cantidad de finos de cada material, tamizándolo y viendo la cantidad que pasa por el último tamiz (0,063mm).

La cantidad de fibras en la dosificación que se han empleado son en diferentes cantidades.

- Patrón. 0 Kg/m<sup>3</sup>
- Patrón + 6,20 Kg/m<sup>3</sup>
- Patrón + 9,00 Kg/m<sup>3</sup>
- Patrón + 12,40 Kg/m<sup>3</sup>

En este proyecto no se ha investigado con dosificaciones no aconsejadas por la EHE-08, ni con dosificaciones donde se investiga el hormigón como material, si no que se ha diseñado un hormigón con una dosificación bastante frecuente, para observar el contenido de fibras y cómo influyen ante el esfuerzo de flexión, asemejándose a situaciones reales. Todo esto se comprueba comprobando la relación a/c, el contenido de cemento y agua; aunque, se ha intentado ajustar al máximo de aditivo tal y como fija el fabricante.

### 4.3.- Tipificación del hormigón

Los hormigones reforzados con fibras se tipificarán de acuerdo con el siguiente formato (lo que deberá reflejarse en los planos de proyecto y en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto):

$$T - R / f - R1 - R3 / C / TM - TF / A$$

Dónde:

**T** Indicativo que será HMF en el caso de hormigón en masa, HAF en el caso de hormigón armado y HPF en el caso de hormigón pretensado.

**R** Resistencia característica a compresión especificada, en N/mm<sup>2</sup>.

**f** Indicativo del tipo de fibras, P en el caso de fibras poliméricas.

**R1, R3** Resistencia característica residual a flexotracción especificada  $fR_{1,k}$  y  $fR_{3,k}$ , en N/mm<sup>2</sup>.

**C** Letra inicial del tipo de consistencia, tal y como se define en el artículo 31.5 de la EHE-08.

**TM** Tamaño máximo del árido en milímetros.

**TF** Longitud máxima de la fibra, en mm.

**A** Designación del ambiente, de acuerdo con el artículo 8.2.1 de la EHE-08.

Así, el hormigón proyectado es el siguiente:

$$\text{HACRF-35/AC-E2+AC-V1+AC-RB2/P-5,64-6,01/12,5-60/I}$$

### 4.4.- Fabricación de las vigas

#### 4.4.1.- Ejecución del encofrado

Los encofrados de las vigas los hemos realizado a mano estudiando múltiples posibilidades de ejecución y materiales a utilizar. Debíamos tener en cuenta el peso que iba a tener que soportar la madera, el pandeo que podía sufrir, la posibilidad de reutilizar el encofrado para abaratar costes, etc.

La viga tiene una longitud de 192 cm, una altura de 17 cm y un canto de 10 cm. A priori nos planteamos ejecutar el encofrado de forma que hormigonáramos por la cara de 17 cm de ancho porque conseguíamos que las caras por donde se van a apoyar

para realizar los ensayos fueran perfectamente planas y a la vez nos evitábamos un posible pandeo. Pero desechamos esa opción porque no nos gustaba la idea de que las primeras 24 horas en las que el hormigón endurece su posición fuera perpendicular a la dirección de las cargas que cuando ensayemos se aplicarán.

Finalmente, decidimos que lo mejor sería realizar el encofrado de forma que quede la viga las primeras 24 horas tal y como se ensayará a posteriori, teniendo en cuenta que habrá que realizar unos refuerzos para que soporte el peso que el hormigón va a ejercer en las paredes del encofrado. También nos ayudaremos del empleo de unos gatos en la parte superior del encofrado para asegurarnos que el canto de la viga sea 10 cm y por último realizaremos con una paleta catalana un buen nivelado para que la parte superior de la viga sea lo más plana posible.

El encofrado lo hemos realizado con tablero aglomerado de partículas de madera, revestido de melamina. La elección de la utilización es esta madera es porque la superficie lisa que nos proporciona unida al líquido desencofrante nos asegurarán un desencofrado sencillo y un buen acabado de la superficie de la viga.

A continuación, mostraremos el encofrado tal y como lo hemos planteado con sus cotas más significativas.

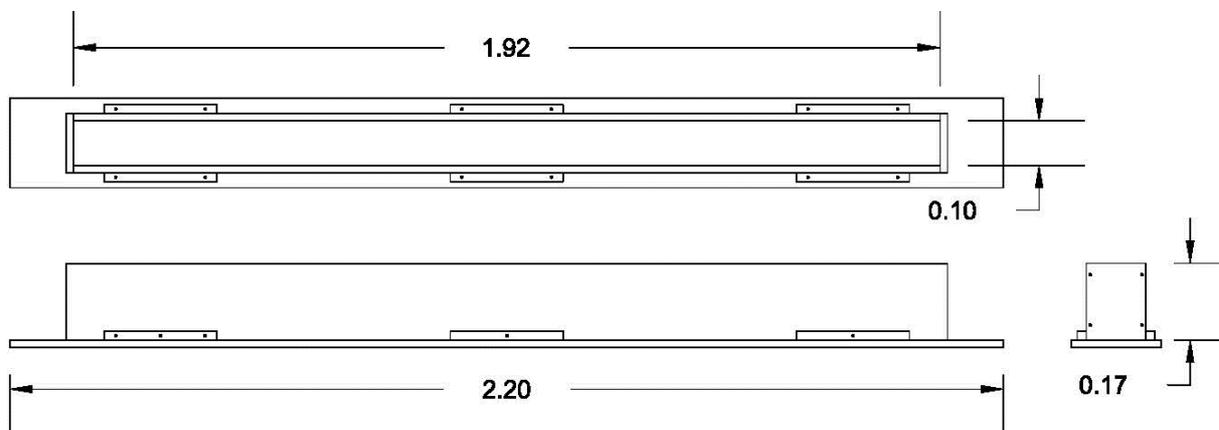


Figura 20.- Esquema encofrado

#### 4.4.2.- Armado. Doblado, corte y montaje de las armaduras.

Dado que el canto de la viga son 10 cm, la cantidad elevada de armadura inferior que la mayoría de vigas va a requerir y que el diámetro máximo de la grava que vamos a utilizar son 12,5 milímetros. Hemos dispuesto de una armadura transversal o estribos de  $\varnothing 6$  y una armadura longitudinal de  $\varnothing 8$ , a fin de intentar dejar

el mayor espacio entre armaduras para que los áridos de mayor diámetro no bloqueen el paso del hormigón y evitar la formación de coqueras.

El material lo conseguimos de dos sitios distintos, primeramente de la empresa de unos conocidos de nuestro tutor del proyecto, José Ramón Albiol y debido a variaciones del proyecto inicial tuvimos que comprar más armaduras.

Las armaduras de  $\varnothing 6$  las hemos pedido de 70 cm de longitud y las de  $\varnothing 8$  de 220 cm, para asegurarnos un posible margen de error. El resto de barra sobrante una vez doblada se corta y ya está lista para ser armada.

El proceso de corte y doblado lo hemos realizado obviamente con el acero en frío. Ha sido un proceso manual que hemos ido perfeccionando con el paso del tiempo debido al número importante de armaduras que hemos realizado. Para el doblado hemos utilizado un tubo cilíndrico de acero y un tornillo de banco. El proceso era simple, sujetábamos la barra con el tornillo y doblábamos con el cilindro teniendo en cuenta la ganancia de centímetros que nos suponía el doblado.



*Fotografías 7 y 8.- Proceso de doblado de las armaduras longitudinales para la realización de las patillas*

Una vez realizado todo el doblado de las armaduras, y habiéndole dado la medida correcta a la patilla en el caso de las armaduras longitudinales y el doblado necesario en el caso de los cercos. Procedíamos a cortar la armadura restante mediante una sierra circular.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



Fotografía 9.- Corte de las armaduras transversales



Fotografía 10.- Rectificación de las barras



Fotografía 11.- Medición de las arm.transversales



Fotografía 12.- Medición de las arm. longitudinales

El montaje de la ferralla lo hemos realizado mediante el atado con alambre galvanizado de 16 mm de espesor, ayudándonos de unos alicates.



Fotografías 13 y 14.- Montaje de la ferralla

#### 4.4.3.- Realización de la amasada

Primeramente, y antes de realizar ningún proceso de hormigonado tratamos de conseguir una dosificación que se ajustara a la que un hormigón autocompactante debe de tener. Nos basamos en las especificaciones que el Anejo 17 de la EHE-08 dispone para tales hormigones. Nuestra dosificación como aspecto fundamental consta de  $325 \text{ kg/m}^3$  y un 0,6 de relación agua cemento.

El proceso de la realización de la amasada es el siguiente:

- Se calcula la humedad total y la humedad libre de la arena 0/2, arena 0/4 y de la grava. Para ello, se patea y remueve bien el árido a fin de crear una muestra lo más homogénea posible. Una vez homogeneizado, se extrae una muestra. Para calcular la humedad se hacen 3 pesadas: en la primera pesamos la sartén y la espátula, en la segunda anotamos el peso de la sartén, la espátula y le introducimos el árido con humedad y en la tercera pesada, una vez secado el árido, se vuelve a pesar. De esta forma sabemos cuál es el peso del árido mediante la diferencia de la segunda pesada con la primera y sabemos cuál es el porcentaje de humedad que tenía mediante la diferencia de la tercera pesada con la segunda.



Fotografía 15.- Pesaje sartén + espátula



Fotografía 16.- Pesaje sartén + espátula + H<sub>2</sub>O



Fotografía 17.- Secado de la arena



Fotografía 18.- Pesaje sartén + espátula + H<sub>2</sub>O

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

- Una vez hallada la humedad libre, se recalcula el peso de los áridos, cemento, agua, y aditivos que se van a utilizar para los litros de amasada que se vayan a realizar.

Dosificación con fines				10			
C2M18 B 42.5 R		densidad	Volumen	25/04/2013	Cor H	Humedad	
325 Ccm	325	3	108,3	3,25	3,25		
Agua	195	1	195,0	1,95	1,57		
64,6 Fines 3.5	64,6	2,65	696,7	0,65	0,85		0,053
78,5 A fina 25	461,5	2,65	696,7	4,62	4,86		0,020
66,5 A grues 36.5	664,6	2,65	696,7	5,65	6,78		
Grava 35	646,2	2,65	696,7	6,46	6,46	0,006	
			1000	23,57	23,57		
534,5 Fines total	2.357						

Fotografía 19.- Determinación de la dosificación

- Se procede a realizar el pesaje de todos los elementos que conforman el hormigón, teniendo muy en cuenta que hay que tarar la báscula con el capazo vacío encima de ella. En este tipo de hormigones la exactitud es clave, puesto que una mínima variación en alguna medida provoca que el hormigón no salga como debería.
- Una vez están todos los elementos sólidos en la amasadora se hace un pre amasado. Después se introduce la mitad del agua poco a poco y se mezcla el aditivo con la otra mitad del agua y se termina echando todo de forma lenta y constante. Se amasa según de acuerdo a la norma correspondiente y realizamos el ensayo del escurrimiento, si el valor que nos da la expansión del hormigón corresponde a un hormigón autocompactante y no exuda, lo daremos por correcto.



Fotografías 20 y 21.- Realización del ensayo de escurrimiento sin fibras

- Para finalizar, comprobaremos que para esta amasada no se tienen que realizar más ensayos, si es así, verteremos el hormigón utilizado para el ensayo de escurrimiento en la amasadora y le introduciremos el porcentaje de fibras

correspondiente. Una vez amasado, realizaremos el ensayo de escurrimiento para observar la diferencia de fluidez con respecto al hormigón autocompactante sin fibras y una vez comprobado que cumplen los ensayos realizados, se vierte el hormigón en la amasado y se reamaso la mezcla. Para concluir se procede a hormigonar la viga.



Fotografía 22.- Reamasado de la mezcla de hormigón con fibras

#### 4.4.4.- Realización de los ensayos para verificación de idoneidad de la amasada.

##### 4.4.4.1- Ensayo de escurrimiento.

La normativa a la que hay que recurrir para averiguar la ejecución de este ensayo es la UNE-EN 12350-8:2011, esta normativa deroga a la que la EHE-08 nos dirigía que era la UNE 83361:2007. Esto es así porque la normativa aplicable es mas reciente que la EHE-08.

Esta norma europea especifica el procedimiento para determinar el escurrimiento y el tiempo  $t_{500}$  para el hormigón autocompactante. El ensayo no es aplicable cuando el tamaño máximo del árido es mayor de 40 mm.

El principio de este ensayo es calcular el escurrimiento y el tiempo  $t_{500}$  que se usan para evaluar la fluidez y la velocidad de flujo del hormigón autocompactante en ausencia de obstrucciones. Se basa en el ensayo de asentamiento descrito en la Norma EN 12350-2. El resultado es un indicador de la capacidad de relleno del hormigón autocompactante. El tiempo  $t_{500}$  es una medida de la velocidad de flujo y un indicador de la viscosidad relativa del hormigón autocompactante.

Se deposita la placa base en una superficie plana y horizontal. Se limpian la mesa y el cono, y se humedecen inmediatamente antes del ensayo, pero evitando un exceso de agua.

Se coloca el cono centrado en el círculo de 210 mm de la placa base y se mantiene en esa posición apoyándose sobre las piezas fijas de pie (o se utiliza el collar), procurando que no escape nada de hormigón de la base del cono.

Se llena el cono de una vez sin ninguna agitación ni compactación mecánica, y se enrasa la parte superior del cono retirando el exceso de hormigón. El cono relleno se deja reposar no más de 30 s.

Se levanta el cono verticalmente en un movimiento que dure entre 1 s y 3 s, sin interferir con el flujo de hormigón. Si se ha requerido el tiempo  $t_{500}$  el cronómetro se pone en marcha cuando el cono deja de estar en contacto con la placa base y se registra el tiempo transcurrido hasta que el hormigón alcanza el círculo de 500 mm, redondeado al 0,1 s más próximo.

Después de que el flujo de hormigón se haya estabilizado, sin perturbar la placa base ni el hormigón, se mide el mayor diámetro del hormigón extendido y se anota como  $d_1$ . A continuación se mide el diámetro del flujo extendido perpendicular a  $d_1$  y se anota como  $d_2$ . Si la diferencia entre  $d_1$  y  $d_2$  es mayor de 50 mm debe tomarse otra muestra y se debe repetir el proceso.

Si dos ensayos consecutivos presentan una diferencia mayor de 50 mm entre  $d_1$  y  $d_2$ , el hormigón carece de la fluidez necesaria para que el ensayo de escurrimiento sea adecuado.

Se revisa el hormigón extendido para buscar signos de segregación.

Una vez concluido el ensayo se calcula el escurrimiento SF, que es la media de  $d_1$  y  $d_2$ , obtenida con la siguiente ecuación:

$$SF = \frac{(d_1 + d_2)}{2}$$

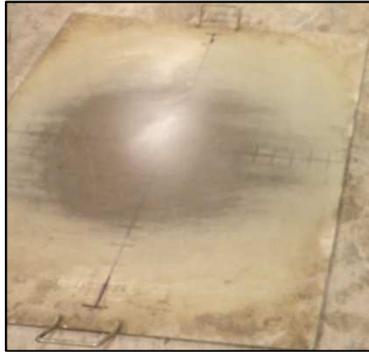
Dónde:

**SF** es el escurrimiento, en milímetros;

**d1** es el mayor diámetro de flujo extendido, en milímetros;

**d2** es el flujo extendido a 90° de  $d_1$ , en milímetros.

El tiempo  $t_{500}$  se expresa redondeado a los 0,5 s más próximos.



Fotografía 23.- Base del ensayo de escurrimiento



Fotografía 24.- Rellenado del cono



Fotografía 25.- Extensión del hormigón

Por ejemplo, en la amasada de la viga V.2.5. 1/2 Patrón + 6,2 Kg/m<sup>3</sup>.

**escurrimiento con fibras:**

T50 =	3,5
∅ máx =	60-60

**escurrimiento sin fibras:**

T50 =	2,5
∅ máx =	76,5-75,5

#### 4.4.4.2.- Ensayo del Anillo Japonés

La normativa a la que hay que recurrir para averiguar la ejecución de este ensayo es la UNE-EN 12350-12:2011, esta normativa deroga a la que la EHE-08 nos dirigía que era la UNE 83362:2007.

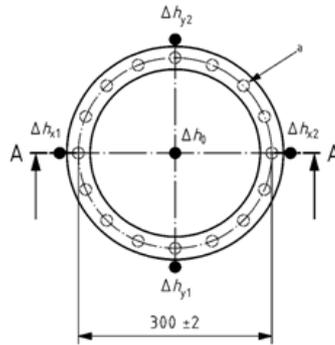
El ensayo del anillo japonés sirve para determinar la capacidad de paso del hormigón autocompactante para fluir a través de aberturas estrechas, incluidos los espacios entre las armaduras y otras obstrucciones sin segregación ni bloqueo.

Se describe un ensayo usando una mayor separación entre las barras y otro con una separación menor de las barras. El ensayo con menor separación entre las barras simula un armado más denso.

El ensayo del anillo japonés es una alternativa al ensayo de la caja en L de la Norma EN 12350-10, pero el resultado no se puede comparar directamente.

El método sigue el procedimiento detallado en la Norma UNE 12350-8, exceptuando que antes de llenar el cono con el hormigón, se coloca sobre éste el anillo japonés, que está formado por un anillo con una serie de barras lisas dispuestas verticalmente y con separación constante entre ellas.

También se debe medir y anotar el tiempo  $t_{500J}$  que tarda el hormigón en fluir hasta alcanzar un diámetro de 500 mm.



El anillo japonés que hemos utilizado es el de separación más pequeña, este consta de unas barras lisas de acero, de  $(18 \pm 0,5)$  mm  $\varnothing$ , dispuestas en un anillo de  $(300 \pm 2)$  mm de diámetro (con un espaciado entre las barras de  $(41 \pm 1)$  mm) con las dimensiones que se muestran en las figuras 1 y 2.

**Leyenda**

- 1 Cono
- 2 Anillo japonés
- 3 Placa base
- 4 Hormigón
- $\Delta h$  Diferencia de altura

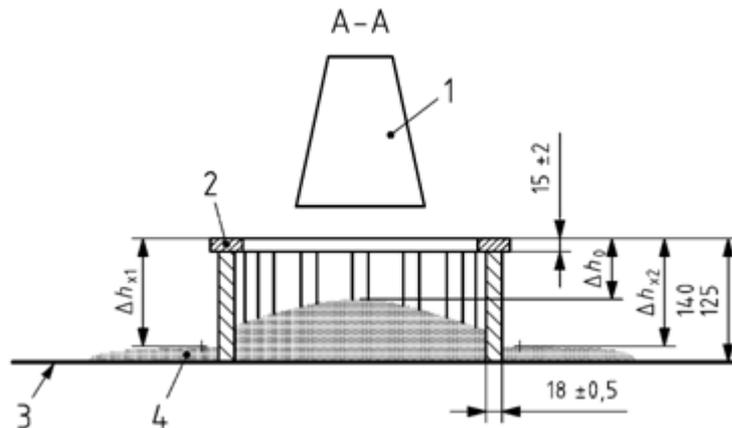


Figura 21.- Ensayo del Anillo Japonés

Se centra el cono en el círculo de 210 mm de la placa base y se sujeta en esa posición (o se usa el collar pesado), y se comprueba que el hormigón no se sale por la base del cono.

Se coloca el anillo japonés en la placa base, alrededor del cono concéntricamente.

Se llena el cono de una vez sin agitar ni compactarlo mecánicamente y se enrasa la parte superior para retirar el hormigón sobrante. Se deja reposar el cono hasta 30 s; durante este tiempo se retiran las salpicaduras de hormigón de la placa

base y se comprueba que toda la superficie de la placa base está húmeda pero sin exceso de agua.

Se levanta el cono verticalmente en un movimiento de entre 1 s y 3 s sin interferir con el flujo de hormigón. Si se ha solicitado el tiempo  $t_{500J}$ , se pone en marcha el cronómetro en cuanto el cono deja de estar en contacto con la placa base y se anota el tiempo en el momento en el que el hormigón alcanza cualquier punto del círculo de 500 mm.

Sin agitar la placa base ni el hormigón, se mide el mayor diámetro del flujo expandido y se anota como  $d_1$  redondeando a los 10 mm más próximos. A continuación se mide el diámetro del flujo en la dirección perpendicular a  $d_1$  y se anota como  $d_2$ .



Fotografía 26.- Rellenado del cono del anillo Japonés      Fotografía 27.- Extensión de la mezcla

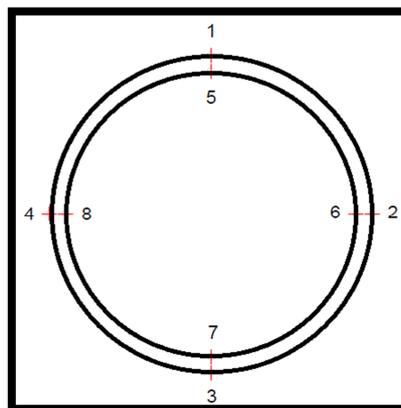
Por ejemplo, en la amasada de la viga V.2.5. 1/2 Patrón + 6,2 Kg/m<sup>3</sup>.

**Anillo Japonés:**

∅ máx =	49-45
---------	-------

**Alturas puntos (cm):**

1 = 11	5 = 7
2 = 11,5	6 = 7
3 = 11,5	7 = 6,5
4 = 12	8 = 7



#### 4.4.4.3.- Embudo en "V".

La normativa a la que hay que recurrir para averiguar la ejecución de este ensayo es la UNE-EN 12350-9:2011, esta normativa deroga a la que la EHE-08 nos dirigía que era la UNE 83361:2007.

El ensayo del embudo en V sirve para determinar la viscosidad y la capacidad de llenado del hormigón autocompactante.

Se llena de hormigón fresco un embudo con forma de V y se registra el tiempo que tarda el hormigón en fluir fuera del cono como tiempo de flujo en el embudo en V.

Se limpia el embudo y la compuerta de la base y se humedece toda la superficie interna, incluida la compuerta. Se cierra la compuerta y se vierte la muestra de hormigón dentro del embudo de una vez sin ninguna agitación ni compactación mecánica, y a continuación se enrasa el hormigón en la parte superior del embudo con la barra para nivelarlo con el borde del embudo. Se coloca el recipiente debajo del embudo para recoger el hormigón. Tras llenar el embudo se esperan  $(10 \pm 2)$  s, y después se abre rápidamente la compuerta y se mide el tiempo  $t_v$ , con una precisión de 0,1 s, desde que se abre la compuerta hasta el momento en que es posible ver verticalmente a través del embudo el recipiente situado debajo. El tiempo  $t_v$  es el tiempo de flujo del embudo en V.

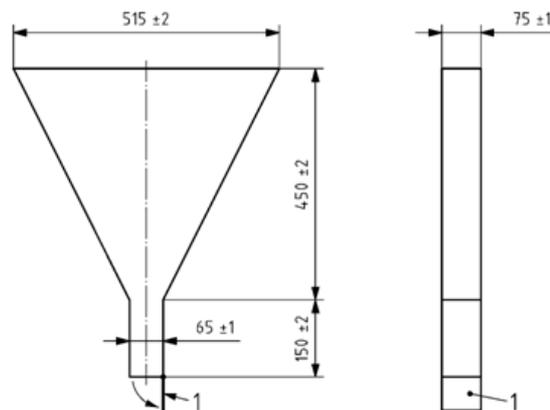


Figura 22.- Esquema del embudo en V

El flujo de hormigón del embudo debe ser continuo. Si se produce un bloqueo el ensayo debe repetirse. Si se produce un segundo bloqueo el hormigón carece de la viscosidad y la capacidad de llenado necesarias para ser hormigón autocompactante. Si se produce algún bloqueo debe indicarse en el informe.



Fotografías 28 y 29.- Realización del ensayo del embudo en “V”

Por continuar con el mismo ejemplo, la amasada fabricada para hormigonar la viga V.2.5 dio el resultado del ensayo nulo por excederse en el tiempo que marca la norma UNE-EN 12350-9.

Por ejemplo, en la amasada de la viga V.2. 1 (Viga patrón) el ensayo dio el resultado:

<b>Embudo en V:</b>	
Tiempo =	7,2 seg

#### 4.4.4.4.- Ensayo de verificación del aire ocluido.

Este método de medida consiste en equilibrar un volumen determinado de aire, a presión conocida, contenido en la cámara de aire, con el volumen desconocido de aire del hormigón contenido en el recipiente con la muestra; las dos cámaras están conectadas por una válvula de aireación. La disminución de la presión del aire en la cámara de aire refleja el contenido en aire de la muestra de mortero y se lee en el dial del manómetro calibrado (en tanto por ciento de aire), para la presión observada.

El recipiente se llena por completo con mortero, en cuatro capas, aproximadamente iguales; se compacta cada capa con 10 golpes cortos del pisón, regularmente distribuidos de manera que se obtenga una superficie del mortero plana.

Se elimina el exceso de mortero de manera que se obtenga una superficie del mortero plana y nivelada con el borde superior del recipiente.

Se limpia el exterior del recipiente de tal modo que esté, además de limpio, seco y se fija la tapa firmemente en el recipiente.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

Se cierra la válvula principal de aireación situada entre la cámara de aire y el recipiente para la muestra. Se llena el espacio de aire que se encuentra debajo de la cubierta y encima del mortero, con agua inyectada por la válvula A, manteniendo la válvula B abierta hasta que todo el aire que se encuentra encima de la superficie del mortero se haya eliminado.

Se inyecta aire en la cámara de aire hasta que se haya alcanzado una presión estable, igual a la presión determinada en el ensayo de calibración. Se cierran las válvulas A y B, se abre la válvula situada entre la cámara de aire y el recipiente para la muestra. Una vez alcanzado el equilibrio, se lee el porcentaje del contenido en aire en el manómetro calibrado. Por último, se anota este valor con una exactitud de aproximadamente 0,1%.

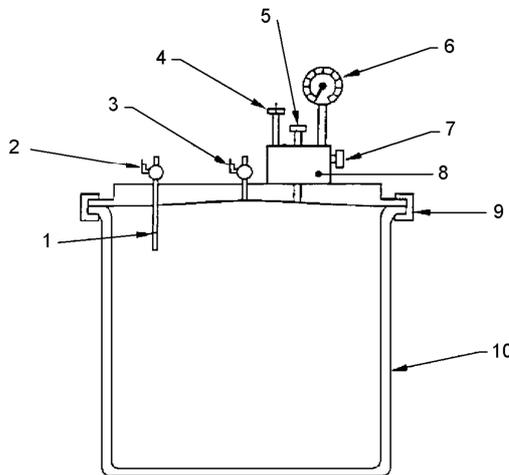


Figura 23.- Ensayo del aire ocluido

Leyenda	
1 Tubo añadido para control de calibración	6 Manómetro
2 Válvula A	7 Válvula para vaciado del aire
3 Válvula B	8 Cámara de aire
4 Bomba	9 Abrazadera
5 Válvula principal de aireación	10 Recipiente metálico



Fotografías 30 y 31.- Realización del ensayo del aire ocluido

Por ejemplo, en la amasada de la viga V.2. 1 (Viga patrón) el ensayo dio el resultado:

<b>Aire Ocluido</b>
---------------------

Resultado =	2,60%
-------------	-------



Fotografía 32.- Manómetro del aire ocluido

Con el hormigón que se ha empleado para realizar el ensayo del aire ocluido, lo desechamos. No se debe utilizar para hormigonar la viga ya que el hormigón está contaminado, sobre todo en las partes altas del vaso, ya que se ha introducido agua.

#### 4.4.5.- Hormigonado de la viga

El siguiente paso del proyecto, es el de hormigonado de la viga. Una vez realizado todos los ensayos del hormigón en estado fresco y comprobando que se acepta la amasada, siempre comprobando los parámetros fijados en la diferente normativa a cumplir, EHE-08 y normas UNE. Se reamasa unos minutos y se procede al hormigonado. Para una situación de obra el método de hormigonado del hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas podría ser tanto por bombeo como por cubilote, en cada caso debemos hacer las correcciones en la dosificación empleada para fabricar el hormigón. En nuestro proyecto, al realizar el hormigón en el laboratorio el método de hormigonado es el cubilote, empleado para ello un cubo de acero inoxidable.

Previo al hormigonado, siempre debemos verificar el recubrimiento nominal de las armaduras, para que éstas puedan trabajar correctamente. En nuestro proyecto al no tener problemas de durabilidad y no estar investigando sobre el tema, hemos considerado un recubrimiento nominal de 10mm. Somos conscientes que la normativa, por durabilidad debemos tener un recubrimiento mínimo de 30mm. entre la armadura y el encofrado; pero, repito que no estamos estudiando la durabilidad de las armaduras en el hormigón, sino la resistencia de unas vigas sometidas a flexión y la repercusión de la cantidad de armado y del contenido de fibras añadidas.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



Fotografías 33 y 34.- Hormigonado de la viga

Una vez se ha reamasado se procede a verter el hormigón en el molde de la viga.



Fotografía 35.- Recubrimiento con plástico de la viga una vez hormigonada

Una vez se ha hormigonado la viga, debemos cubrirla con algún plástico, para evitar que se evapore el agua en el proceso de fraguado y pierda el agua de amasado.

#### 4.4.6.- Hormigonado de las probetas



Previo al hormigonado las probetas deben estar limpias de restos de hormigón de ensayos anteriores. Para facilitar el proceso de desencofrado se debe aplicar por el interior, un producto desencofrante tanto en su base como en las paredes del recipiente. Para ello nosotros hemos utilizado como producto desencofrante aceite vegetal.

Fotografía 36.- Aplicación liquido desencofrante

Una vez hemos realizado el paso anterior disponemos de las probetas en un lugar donde no se muevan hasta que se desmoldan para introducir las probetas en la cámara de curado.

Una vez homogeneizada la muestra de hormigón, se vierte en los moldes con el cogedor, en capas, que después de compactadas, tengan un espesor aproximadamente igual a un tercio de la altura del molde.

Cada capa se debe compactar lo suficiente para eliminar las posibles coqueras, pero sin llegar a la segregación. El método de picado que hemos aplicado es el de picado con barra, aunque se trata de un hormigón autocompactante, para facilitar y con seguir una buena compactación.

Después de la compactación, se procede a retirar el hormigón sobrante, fratasando su superficie y manipulándose lo menos posible para dejar la cara lisa de tal forma que cumpla las tolerancias de acabado.

El conjunto de todas las operaciones desde la preparación de la muestra no debe exceder de un plazo de 15 minutos.



Fotografía 37.- Hormigonado de las probetas

Con el fin de evitar la desecación de la masa de hormigón, las probetas se han de mantener en sus moldes, protegidas de la intemperie de forma tal que la temperatura alrededor de las mismas este comprendida entre 15 y 30°C, hasta el momento de ser depositadas en la cámara de conservación. Para ello las hemos cubierto con un plástico hasta su desmolde y traslado a la cámara, todo ello transcurridas 24 horas desde el momento de su fabricación.



Fotografía 38.- Probetas hormigonadas

## 4.5.-Curado

### 4.5.1.- Desmolde

Transcurridas entre 24 y 48 horas, en nuestro caso desmoldamos las probetas a 24 horas, se procede a desmoldar las probetas o las vigas de hormigón, las codificamos y las transportamos e introducimos en la cámara húmeda.



Para desmoldar las probetas, se debe desenroscar las tuercas de apertura de las probetas y con una maza impactar por el exterior con una maza para facilitar que se desmolde bien la probeta. Una vez realizado este proceso abrimos el molde y se retira. Para despegar la base con darle con la maza en el borde del mismo contra el acero basta, a continuación codificamos las probetas y las insertamos en la camada de curado.

Fotografía 39.- Desencofrado de las probetas

Para desmoldar las vigas se realiza el mismo procedimiento solo que se desmonta el encofrado hasta que accedemos a la viga y a continuación se transportan hasta la cámara húmeda.



Fotografías 40 y 41.- Desencofrado de la viga

### 4.5.2.- Cámara húmeda

La cámara de conservación según la norma UNE 83504 establece que debe se debe mantener la humedad relativa igual o superior a 95%, con una temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . En esas condiciones son las que tanto las probetas como las vigas se han conservado.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



Fotografía 42.- Temperatura en la cámara húmeda

Dado el espacio de la cámara y que se estaban desarrollando varios PFG a la vez y dos de ellos también estudiaban vigas de las mismas dimensiones, por motivos de espacio y por el peso de todas las vigas y no sobrecargar el forjado sanitario en el que apoya la cámara se dispusieron una cantidad de vigas en el exterior de la cámara, dentro del laboratorio y se intentaron mantener las condiciones que marca la norma UNE antes citada. Estas vigas sí que han estado siete días en la cámara con un constante curado y a las condiciones antes descritas, una vez han pasado de plazo las sacamos y las acopiamos de forma que las cubrimos con unos plásticos para que no perdieran la humedad y constantemente humectábamos las vigas.

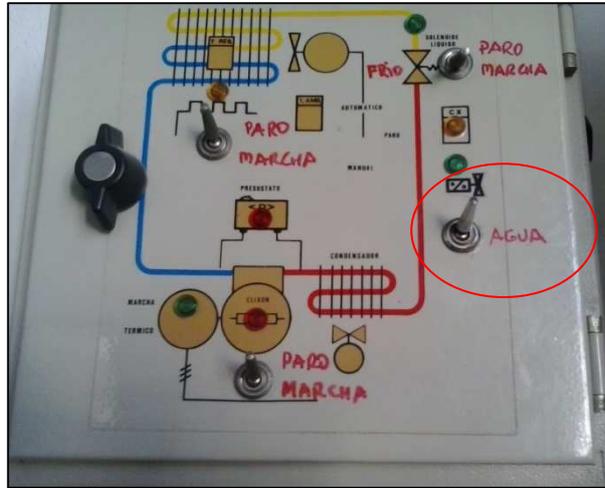


Fotografías 43 y 44.- Curado de las vigas

#### 4.5.3.- Humectación

El método de humectación tanto de las vigas y de las probetas dentro de la cámara de conservación es por aspersión y de las vigas que están en el exterior las humectamos mediante brocha sobre las vigas en todas sus caras menos la de apoyo. A continuación, como hemos explicado antes, las tapamos con plásticos para mantener la humedad de las vigas.

La frecuencia de la humectación de las vigas acopiadas en el exterior aproximadamente fue de tres veces al día y en los días que detectamos que había un día más caluroso humectamos las vigas hasta cuatro veces.



Fotografía 45.- Botón para humectar las vigas en la cámara húmeda

#### 4.6.- Ensayo de las probetas

Transcurrido el tiempo de 28 días de curado de las probetas, las sacamos de la cámara de conservación y las ensayamos para obtener diferentes datos.

##### 4.6.1.- Ensayo a flexión

Se somete una probeta prismática a un momento flector mediante la aplicación de una carga a través de rodillos superiores e inferiores. Se registra la carga máxima alcanzada y se calcula la resistencia a flexión.

La geometría de la probeta prismática viene definida con sus dimensiones nominales y tolerancias en la Norma EN 12390-1:2001.

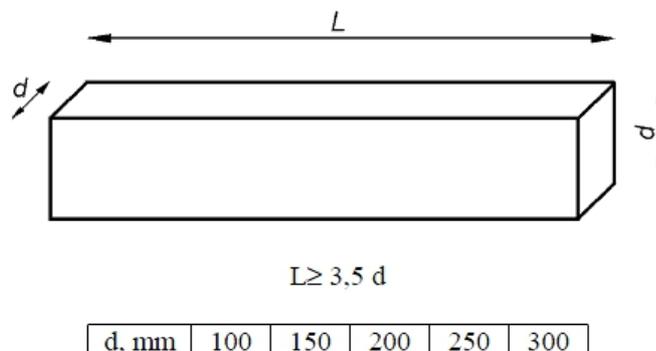


Figura 24.- Probeta prismática

El dispositivo para la aplicación de cargas debe consistir en:

- Dos rodillos inferiores cuya función es la de hacer de soporte de la probeta.
- Dos rodillos superiores soportados por una placa articulada, que reparte la carga aplicada por la prensa entre los dos rodillos por igual.

Todos los rodillos deben ser de acero y deben tener una sección circular con un diámetro de entre 20 mm a 40 mm, también cabe destacar que deben ser al menos 10 mm más largos que el ancho de la probeta.

Tres rodillos, incluyendo los dos superiores, deben ser capaces de girar libremente alrededor de sus ejes y de inclinarse en un plano normal al eje longitudinal de la probeta.

La distancia entre los rodillos exteriores (es decir, la luz) debe ser igual a  $3d$ , siendo  $d$  la anchura de la probeta. La distancia entre los rodillos interiores debe ser igual a  $d$ . Los rodillos interiores deben estar centrados entre los rodillos exteriores como se muestra en la figura. Todos los rodillos deben ajustarse a las distancias indicadas en la figura 1 con una precisión de  $\pm 2,0$  mm.

Se limpian todas las superficies de los soportes del dispositivo de ensayo, y se eliminan de las caras de la probeta que van a estar en contacto con los rodillos todo el polvo u otros materiales extraños.

En las probetas almacenadas en agua se elimina el exceso de humedad de las caras de las probetas antes de su colocación en la máquina de ensayo.

Se coloca la probeta en el dispositivo de ensayo, correctamente centrada con su eje longitudinal en ángulo recto con los ejes longitudinales de los rodillos superiores e inferiores.

Se comprueba que la dirección de referencia de la carga es perpendicular a la dirección de hormigonado de la probeta.

La carga no se comienza a aplicar hasta que los rodillos de carga y los de apoyo descansen firmemente sobre la probeta.

Se selecciona un incremento de tensión constante dentro del rango de 0,04 MPa/s ( $N/mm^2 \cdot s$ ) a 0,06 MPa/s ( $N/mm^2 \cdot s$ ). Tras aplicarse la carga inicial, que no debe exceder aproximadamente el 20% de la carga de rotura, se aplica la carga de forma continua y sin brusquedades con el incremento constante seleccionado  $\pm 10\%$ , hasta que la probeta no soporte una carga mayor.

La velocidad de carga requerida en la máquina de ensayo se calcula mediante la fórmula:

$$R = \frac{s \times d_1 \times d_2^2}{l}$$

Dónde:

**R** es el incremento de carga requerido, en N/s;

**S** es el incremento de tensión, en MPa/s (N/mm<sup>2</sup>·s);

**d1 y d2** son las dimensiones laterales de la probeta, en mm;

**l** es la distancia entre los rodillos inferiores, en mm.

Cuando se usen prensas con control manual, en el momento que se acerque a la rotura de la probeta, se corrige el incremento de carga si tiene que descender, mediante el oportuno ajuste de los controles.

Se debe anotar la carga máxima alcanzada.

Si la rotura se produce fuera de los rodillos de carga, se debe anotar la resistencia a flexión que viene dada por la fórmula:

$$f_{cf} = \frac{F \times l}{d_1 \times d_2^2}$$

Dónde:

**f<sub>cf</sub>** es la resistencia a flexión, en MPa (N/mm<sup>2</sup>);

**F** es la carga máxima, en N;

**L** es la distancia entre los rodillos soportes, en mm;

**d1 y d2** son las dimensiones laterales de la probeta, en mm. La resistencia a flexión se expresa con una aproximación de 0,1 MPa (N/mm<sup>2</sup>).

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



Fotografía 46.- Rotura probeta prismática de hormigón

Es importante tener en cuenta que se ha realizado con la radial de hormigón con diente de diamante una entalla de 10mm para forzar a la probeta que rompa por ese punto.

Para obtener los datos de apertura de fisura y resistencia a flexión instrumentamos las probetas con un captador de 10mm en la entalla. Para colocar el captador perforamos con el taladro el hormigón y le atornillamos un angular para sujetar el captador.

#### 4.6.2.- Ensayo a compresión

Este ensayo ha sido realizado según la norma UNE 12390-3.

Para las probetas cúbicas, el método que utilizamos, partiendo del resultado de la rotura a flexión de las probetas prismáticas cogimos una media probeta y por la cara más alejada de la sección por donde ha roto la probeta, la ensayamos a compresión. Este ensayo nos muestra la fuerza, la resistencia y la deformación a compresión de la rotura de la pieza.



Fotografías 47 y 48.- Colocación ½ probeta prismática

Previamente, antes de ensayar las probetas cilíndricas, se deben refrentar o pulir la cara más irregular de la probeta, para que en el ensayo a compresión de las mismas, al aplicarle la carga no haya datos erróneos debido a las irregularidades de las caras. En nuestro caso, ya que disponemos de la máquina específica para pulir las caras y eso nos va a llevar a un ahorro en tiempo hemos optado por pulir las caras en vez de ejecutar el refrentado con mortero de azufre.



Fotografía 49, 50 y 51.- Refrentado probetas cilíndricas

En las probetas cilíndricas hemos realizado un doble ensayo, primero el ensayo de determinación del módulo Young y a continuación el ensayo de rotura a compresión.

#### Ensayo del módulo de elasticidad o módulo de young

Centrar la probeta en la máquina de ensayo, con el instrumento de medida colocado en posición axial. Aplicar la tensión inicial,  $b$ , es decir  $0,5 \text{ N/mm}^2$  y registrar la deformación leída en cada línea de medición.

Incrementar uniformemente la tensión a una velocidad de  $0,5 \pm 0,2 \text{ N/mm}^2$  por segundo hasta que la tensión alcance el valor de un tercio de la resistencia a compresión del hormigón ( $a = f_c/3$ ). Mantener la carga durante 60 s y registrar la deformación medida, tomando lecturas de cada línea de medida con intervalos de 30 s. Si estas lecturas difieren en más del 20% del valor medio, volver a centrar la probeta

de ensayo y repetir el mismo. Si no es posible reducir estas diferencias por debajo del 20%, desechar el resultado del ensayo.

Cuando se ha comprobado que el centrado ha producido medidas correctas, reducir la carga, a la misma velocidad que durante el proceso de carga, hasta el nivel de la tensión inicial (0,5 N/mm<sup>2</sup>). Realizar al menos dos ciclos adicionales de carga-descarga, utilizando las mismas velocidades, y mantener las tensiones (a y b) constantes durante un período de 60 s. Después de terminar el último ciclo y de esperar un período de 60 s manteniendo la tensión  $b = 0,5 \text{ N/mm}^2$ , registrar las lecturas de las deformaciones,  $\epsilon_b$ , tomadas al cabo de 30 s.

Volver a cargar la probeta hasta la tensión  $a$ , a la velocidad especificada, y registrar las lecturas de las deformaciones relativas,  $\epsilon_a$ , tomadas a los 30 s.

Cuando todas las medidas han sido terminadas, incrementar la carga en la probeta de ensayo, a la velocidad especificada, hasta que se produzca la rotura. Si la resistencia a compresión de la probeta difiere de  $f_c$  en más del 20% se debe hacer constar en el informe del ensayo.

Expresión de los resultados:

Calcular las deformaciones medias,  $\epsilon_a$  y  $\epsilon_b$ , respectivamente, en cada una de las líneas de medida en el ciclo de carga (ciclo que sigue al menos a dos ciclos de carga-descarga, una vez centrada la probeta).

El módulo de elasticidad estático en compresión,  $E_c$ , en newton por milímetro cuadrado, está dado por la fórmula:

$$\frac{\Delta_a}{\Delta_\epsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\epsilon_a - \epsilon_b}$$

Dónde:

$\sigma_a$  es la tensión en el escalón correspondiente a  $\sigma_a = f_c/3$ , en Newton por milímetro cuadrado;

$\sigma_b$  es la tensión inicial (0,5 N/mm<sup>2</sup>);

$\epsilon_a$  es la deformación media, bajo el nivel de carga máxima;

$\epsilon_b$  es la deformación media, bajo el nivel de esfuerzo base de carga.

El ensayo lo hemos instrumentado con un captador de deformación colocado en una “camisa”, abrazando a la probeta del hormigón. Los transductores electrónicos (las abrazaderas rojas en la fotografía) están separados una distancia de 150mm.

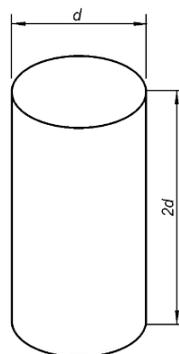


Fotografía 52.- Ensayo del módulo de Young

Ensayo de deformación total o rotura

Las probetas se comprimen hasta rotura en una máquina de ensayo de compresión conforme a la Norma EN 12390-4. Se registra la máxima carga alcanzada por la probeta y se calcula la resistencia a compresión del hormigón.

La geometría de la probeta cilíndrica viene definida con sus dimensiones nominales y tolerancias en la Norma EN 12390-1:2001.



<i>d, mm</i>	100	113 <sup>a</sup>	150	200	250	300
<sup>a</sup> Esta dimensión presenta una superficie de carga de 10 000 mm <sup>2</sup>						

Figura 25.- Probeta cilíndrica

La geometría de la probeta cilíndrica viene definida con sus dimensiones nominales y tolerancias en la Norma EN 12390-1:2001.

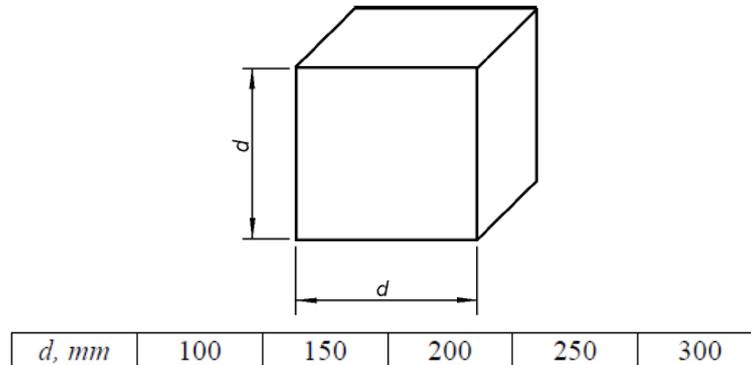


Figura 26.- Probeta cúbica

Se limpian los platos de carga de la máquina, debiendo eliminarse cualquier resto de gravilla u otro material extraño de las superficies de la probeta que han de estar en contacto con los platos.

Se seca el exceso de humedad de la superficie de la probeta antes de ponerla en la máquina de ensayos.

Las probetas cúbicas se colocan de tal forma que la carga se aplique perpendicularmente a la dirección de hormigonado. Las probetas deben centrarse respecto al plato inferior con una aproximación de  $\pm 1\%$  de la dimensión normalizada del lado de la probeta cúbica o del diámetro normalizado de la probeta cilíndrica.

Si se usan platos auxiliares, se alinean con las caras superior e inferior de las probetas.

En las prensas con dos columnas, las probetas cúbicas deberían situarse con la cara fratasada frente a una de ellas.

Se selecciona una velocidad de carga constante dentro del rango de  $0,6 \pm 0,2$  MPa/s ( $N/mm^2 \cdot s$ ). Se aplica la carga inicial, que no debe exceder de aproximadamente el 30% de la carga de rotura. Después de esto, se aplica la carga a la probeta sin brusquedades y se incrementa continuamente, a la velocidad seleccionada  $\pm 10\%$ , hasta que no se pueda soportar más carga.

Cuando se use una prensa de control manual, cualquier tendencia a disminuir la velocidad de carga cuando la probeta se aproxima al punto de rotura debe ser corregida mediante el ajuste adecuado de los controles. Se registra la carga máxima indicada en kN.

La resistencia a compresión viene dada por la ecuación:

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Dónde:

**F<sub>c</sub>** es la resistencia a compresión, en MPa (N/mm<sup>2</sup>);

**F** es la carga máxima de rotura, en N;

**A<sub>c</sub>** es el área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión, calculada a partir de las dimensiones normalizadas de la probeta (véase la Norma EN 12390-1) o de las medidas de la probeta si se ensaya de acuerdo con el anexo B de la Norma EN 12390-3.

PROBETAS CÚBICAS			PROBETAS CILÍNDRICAS			
<b>ROTURAS SATISFATORIAS</b>						
<b>ROTURAS NO SATISFATORIAS</b>						

Es importante recalcar que el ensayo se ha realizado con un captador que mide la deformación de la pieza. Para no dañar este captado hemos dispuesto un protector de PVC.



Fotografía 53.- Ensayo de Deformación Total o Rotura

#### 4.7.- Ensayo de las armaduras.

El ensayo a tracción de las armaduras se realizará conforme a la norma ISO 15630-1:2002. Las propiedades fundamentales que definen un acero para la construcción son la resistencia y ductilidad que dependen de: la composición química, fabricación y tratamientos térmicos. No existe una forma única de cuantificar la ductilidad, sino una serie de parámetros, que de forma aislada o combinada entre sí caracterizan la ductilidad.

*Límite elástico  $R_e$   $f_y$* : Carga unitaria correspondiente a una deformación remanente del 0,2 por 100. En los aceros que presentan escalón de cedencia claramente definido, el límite elástico coincide con el valor aparente de la tensión correspondiente a dicho escalón.

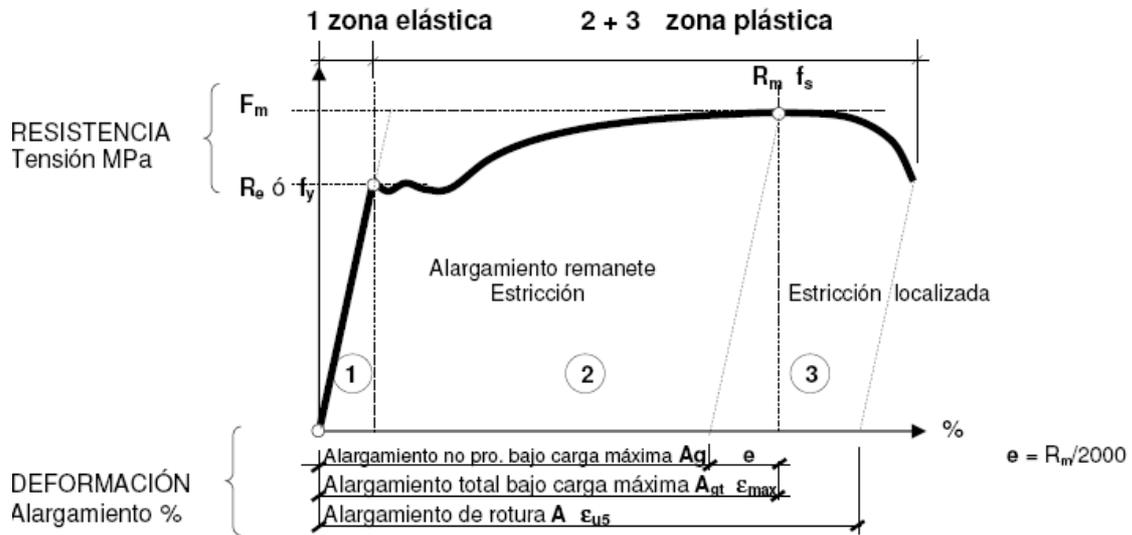
*Carga unitaria de rotura  $R_m$   $f_s$* : (tensión) cociente entre la carga máxima y el área de la sección inicial de la probeta. En barras corrugadas se tomará como sección inicial sección nominal.

*Relación  $f_s/f_y$* : Es la relación entre la carga unitaria de rotura y el límite elástico. Es un índice de la reserva de resistencia después del límite elástico.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

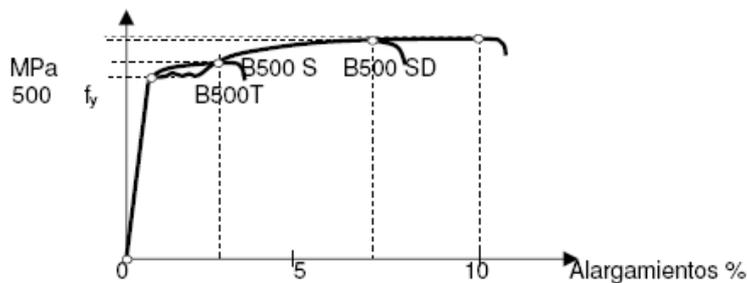
Alargamiento remanente en rotura  $A \epsilon_{U5}$   
 Relación  $f_s/f_y \rightarrow R_m/R_e$

Alargamiento bajo carga máxima  $\epsilon_{max}$  ó  $A_{gt}$   
 Factor de energía



Tipo	$R_e f_y$	$R_m f_s$	$f_s/f_y$ (en ensayo)	$f_y, real/f_y, nominal$	$\epsilon_{U5}$	Barra $\epsilon_{max}$	Rollo $\epsilon_{max}$
B 400 S	$\geq 400$	$\geq 440$	$\geq 1,05$	---	$\geq 14 \%$	$\geq 5 \%$	$\geq 7,5 \%$
B 500 S	$\geq 500$	$\geq 550$	$\geq 1,05$	---	$\geq 12 \%$	$\geq 5 \%$	$\geq 7,5 \%$
B 400 SD	$\geq 400$	$\geq 480$	1,20 a 1,35	1 a 1,20	$\geq 20 \%$	$\geq 7,5 \%$	$\geq 10 \%$
B 500 SD	$\geq 500$	$\geq 575$	1,15 a 1,35	1 a 1,25	$\geq 16 \%$	$\geq 7,5 \%$	$\geq 10 \%$

Figura 27.- Diferencia en el comportamiento elástico de distintos tipos de acero.



**Alargamiento de rotura A:** Parámetros para valorar la ductilidad del acero, a mayor valor A mayor ductilidad. Es el incremento de alargamiento unitario en % en la zona de rotura afectada por la estricción. Para la medida del alargamiento se tomará una base inicial de cinco veces el diámetro nominal.

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} \cdot 100$$

$$A_g = \frac{L_g - L_o}{L_o} \cdot 100$$

Barra rota

$L_o$  Distancia inicial de  $5 \varnothing$  marcados sobre la barra.  
 $L_u$  Distancia final entre puntos después de la rotura.  
 $L_g$  Distancia final entre puntos alejada de la rotura al meno 50 mm.

*Alargamiento total bajo carga máxima  $A_{gt}$* : Otro parámetro para valorar la ductilidad, cuanto mayor es el alargamiento  $A_{gt}$  más dúctil será el acero. Se puede medir  $A_g$ :

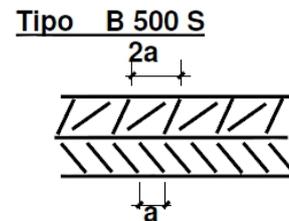
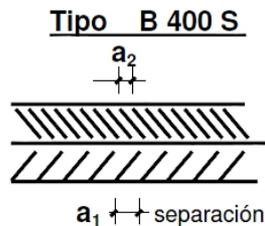
- Mediante extensómetro.
- Cálculo por el método manual tras la rotura.

$$A_{gt} = A_g + R_m / 2000$$

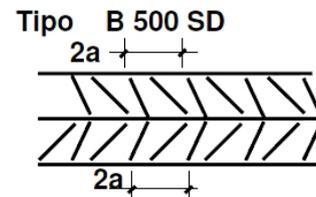
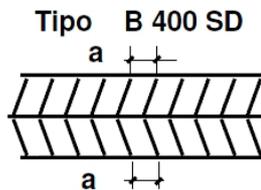
$A_g$  Alargamiento no proporcional bajo carga máxima %

$R_m$  Resistencia a la tracción en MPa.

**Acero soldable** UNE 36 068



**Acero soldable con características especiales de ductilidad** UNE 36 065



Las normativas UNE 36068 y UNE 36065 nos especifican como distinguir entre los aceros soldables y los que aceros con características especiales de ductilidad.

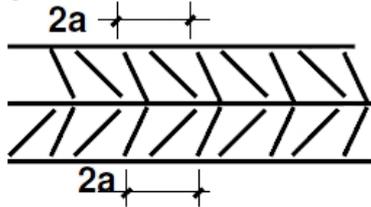
La norma UNE 36065 en su apartado 10.2.1 nos especifica que para realizar el ensayo a tracción de las armaduras debemos acudir a la normativa UNE EN ISO 15630-1. Y ésta en su apartado 5.3, nos dirige a la norma UNE-EN-ISO 6892-1.

En la norma UNE-EN-ISO nos viene especificado como realizar el ensayo así como el método para preparar las armaduras para que sean ensayadas, de tal forma que nos hemos regido por esta normal para realizar todo el proceso.

Una vez analizada la normativa y la forma de proceder, vamos a explicar paso por paso como hemos realizado nosotros la clasificación y ensayos de las armaduras.

Para realizar el ensayo de las armaduras B 500 SD primero comprobamos que se trataba de aceros con características especiales de ductilidad. Según la norma UNE 36065, los aceros tipo B 500 SD deben tener ese dibujo en las corrugas y comprobamos que en nuestro acero así era.

**Tipo B 500 SD**



Fotografía 54.- Barra de  $\varnothing$  8 mm

Una vez identificadas, las clasificamos según una nomenclatura:

**$\varnothing$  barra – Número de la barra\_Remesa**

Dónde:

$\varnothing$  barra = 6 o 8 ya que solo hemos trabajado con diámetros;

Numero de la barra = número asignado para ordenarlas;

Remesa = remesa nueva (N) o remesa vieja (V).



Fotografía 55.- Clasificación barras

Una vez clasificadas se marcan en las aletas unas marcas con un permanente cada 4 cm y por la corruga del otro lado se marcan también cada 4 cm pero empezando por 2 cm. De esta forma conseguimos asegurarnos que por donde rompa estará bien centrado en algún tramo de 4 cm, ya sea por un lado o por el otro.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



Fotografía 56 y 57.- Realización marcas para medir tras el ensayo de tracción

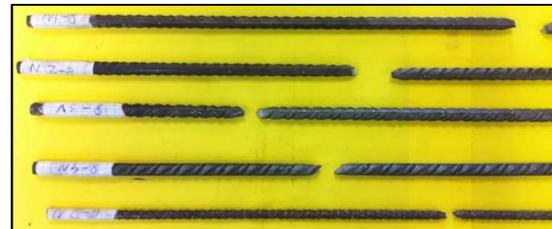
Una vez marcadas se procede a realizar el ensayo de tracción y después se realizan las correspondientes mediciones y se extraen los resultados.



Fotografía 58.- Realización de ensayo de tracción



Fotografía 59.- Medición de  $\Delta$  de alargamiento en rotura



Fotografía 60.- Roturas barras

#### 4.8.- Ensayo de las vigas realizadas.

El ensayo de las vigas a flexión que hemos realizado no está contemplado ni tipificado en ninguna normativa. Éste consiste en:

- Una viga biapoyada, con una luz entre apoyos de 170cm.
- Dos cargas aplicadas, a 17cm. del eje de simetría de la viga cada carga.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

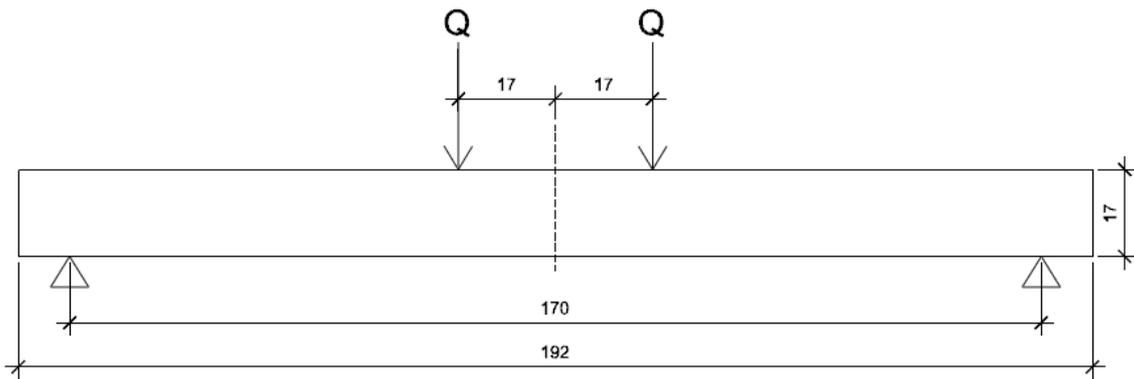


Figura 28.- Esquema aplicación cargas en la viga.

Cotas en cm.

Para realizar el ensayo hemos instrumentado a la viga de tres captadores. Uno situado en la parte inferior del eje de la viga, éste mide la apertura de la grieta, a la hora de colocarlo debe estar totalmente comprimido, este captador tiene un recorrido de 10mm.; el segundo captador, está situado en la parte superior del eje de la viga, a la hora de colocarlo debe estar totalmente extendido, este captador tiene un recorrido de 20mm.; y, el tercer captador está situado en la propia máquina, el cual medirá la flecha que adquiere la viga.



Fotografía 61.- Viga preparada para ensayar a flexión con captadores colocados

Dado que la máquina situada en el laboratorio está pensada para ensayar probetas con un punto superior de carga, para transformar ésta en dos puntuales situadas a la distancia indicada anteriormente disponemos de dos perfiles metálicos prismáticos macizos situados en el punto de la carga y una placa que reparta uniformemente la carga aplicada a los dos puntos de carga. Para evitar que ésta se deforme hemos dispuesto de otra para darle más canto al conjunto y que no deforme.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



Fotografía 62.- Colocación de la tabla para mejor reparto de cargas.

Por último se procede a ensayar la viga aplicando la carga. Una vez se han observado las primeras fisuras, aplicamos una fuerza constante y rotulamos el recorrido de las fisuras, anotando el valor de la resistencia y reanudamos el ensayo. Este proceso lo hemos repetido varias veces para estudiar el avance de la fisuración, hasta que cargamos la viga hasta su carga de rotura.

Una vez ensayada se obtienen, se estudian y se analizan los datos obtenidos del ensayo. Hemos transportado todas las vigas a la misma zona de acopio para estudiarlas y compararlas.



Fotografía 63.- Vigas ensayadas



## 5.- Resultados

### 5.1.- Introducción

### 5.2.- Ensayos de hormigón fresco

### 5.3.- Ensayos de hormigón endurecido

#### 5.3.1.- Ensayo de las probetas

##### 5.3.1.1.- Ensayos a flexión

##### 5.3.1.2.- Ensayos a compresión

#### 5.3.2.- Ensayo de las vigas

### 5.4.- Ensayo de las armaduras

### 5.5.- Análisis de la tenacidad

#### 5.5.1.- Tenacidad en las probetas

#### 5.5.2.- Tenacidad en las vigas

### 5.6.- Análisis de la tensión residual

## 5.- RESULTADOS

### 5.1.- Introducción

En el presente apartado vamos a describir los resultados obtenidos y una vez expuestos, trataremos de elaborar un análisis pormenorizado para comprender cuales son las ventajas o inconvenientes de las distintas densidades de fibras poliméricas con las que hemos trabajado para los dos distintos tipos de armado que hemos utilizado.

Los resultados, así como las gráficas están elaborados a partir de los datos que las máquinas de ensayo nos proporcionan. Éstas nos facilitan cientos de datos que nos indican según el avance del tiempo (s), la fuerza (kN) que se le está aplicando a la pieza que está siendo ensayada, las tensiones máximas (MPa) y las deformaciones (mm) que está sufriendo debido a los captadores que se colocan en las zonas donde se acumulan los mayores esfuerzos.

### 5.2.- Ensayos de hormigón fresco

A continuación vamos a exponer una tabla donde vamos a indicar la dosificación que hemos utilizado para cada amasada. Así como el cálculo de la humedad libre y total y los resultados realizados a cada amasada.

Una amasada estaba calculada para poder rellenar una viga y las dos probetas cilíndricas y prismáticas para realizar los ensayos y para la realización del aire ocluido.

**Volumen viga:**  $17 \times 10 \times 192 = 32640 \text{ cm}^3 = 32,64 \text{ dm}^3 = 32,64 \text{ litros}$ .

**Volumen 2 prob. prismáticas:**  $2 \times (10 \times 10 \times 30) = 6000 \text{ cm}^3 = 6 \text{ dm}^3 = 6 \text{ litros}$ .

**Volumen 2 prob. cilíndricas:**  $2 \times (\pi \times 7,5^2 \times 30) = 10602 \text{ cm}^3 = 10,602 \text{ dm}^3 = 10,602 \text{ litros}$ .

**Volumen utilizado para el aire ocluido:** 6 litros

$$\Sigma \text{ Viga} + 2 \text{ prob. Prismáticas} + 2 \text{ prob. Cilíndricas} + \text{aire ocluido} =$$

**55,242 litros  $\approx$  55 litros.**

La mayoría de las amasadas tienen alrededor de 60 litros, según el número de ensayos que le realizamos porque añadíamos sobre unos 5 litros más para asegurarnos que podríamos rellenar todos los moldes, pese a las pérdidas que podamos tener.

## Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

Dosificación:

**V.2.1**

FECHA: 06/05/2013

% HUMEDAD LIBRE:	
Arena 0/2 =	6,38
Arena 0/4 =	2,63
Grava =	0

DOSIFICACIÓN:	N = 64	L
	(kg)	
<b>Cem</b>	20,80	
<b>Agua</b>	9,10	
<b>Finos 1</b>	1,18	
<b>A fina 28</b>	35,20	
<b>A grue 41</b>	49,72	
<b>Grava 30</b>	35,45	

Fibras poliméricas:
SIN FIBRAS
<b>Aditivo: Sika viscoconcrete 3425</b>
1,3 % = 270,4 g

DATOS HUMEDAD ÁRIDOS	
ARENA 0/2	
Recipiente + Espatula	522,3 g
R+E+ arena 0/2 H	643 g
R+E+ arena 0/2 S	634,7 g
ARENA 0/4	
Recipiente + Espatula	522,9 g
R+E+ arena 0/4 H	680,31g
R+E+ arena 0/4 S	674,8 g
GRAVA	
Recipiente + Espatula	522,2 g
R+E+ grava	720,4 g
R+E+ grava	719,2 g

$\%H \text{ total} = \frac{Mh - Ms}{Ms - R}$
$\%H \text{ libre} = H \text{ total} - 1$

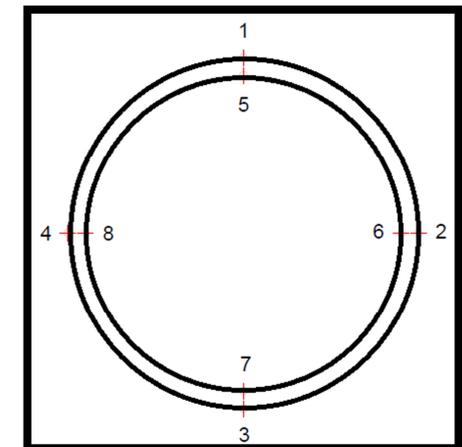
**ENSAYOS HORMIGÓN FRESCO:**

Ecurrimiento:	
T50 =	-
∅ máx =	-

Ecurrimiento sin fibras:	
T50 =	3
∅ máx =	75,5-73,5

Anillo Japonés:	
∅ máx =	68,5

Alturas puntos (cm):	
1 = 10,5	5 = 9,5
2 = 10,5	6 = 9,5
3 = 10,5	7 = 10
4 = 10,5	8 = 10



H total = 7,38

H libre = 6,38

H total = 3,63

H libre = 2,63

H total = 0,61

H libre = 0

Embudo en V:	
Tiempo =	7,2 seg

Aire Ocluido	
Resultado =	1,90%

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

**V.2.2**

FECHA: 02/05/2013

% HUMEDAD LIBRE:	
Arena 0/2 =	8,12
Arena 0/4 =	3,44
Grava =	0

DOSIFICACIÓN:	N = 60	L
	(kg)	
<b>Cem</b>	19,50	
<b>Agua</b>	7,61	
<b>Finos 1</b>	1,11	
<b>A fina 28</b>	33,54	
<b>A grue 41</b>	46,99	
<b>Grava 30</b>	33,23	

Fibras poliméricas: 12,4 kg/m3	
744	g
Aditivo: Sika viscocrete 3425	
1,3 % =	253,5

DATOS HUMEDAD ÁRIDOS	
ARENA 0/2	
Recipiente + Espatula	523,3
R+E+ arena 0/2 H	693,4
R+E+ arena 0/2 S	680,2
ARENA 0/2	
Recipiente + Espatula	523,8
R+E+ arena 0/2 H	680,2
R+E+ arena 0/2 S	666,2
ARENA 0/4	
Recipiente + Espatula	524
R+E+ arena 0/4 H	686,4
R+E+ arena 0/4 S	679,5
GRAVA	
Recipiente + Espatula	523,5
R+E+ grava	944,4
R+E+ grava	941

$$\%H \text{ total} = \frac{Mh - Ms}{Ms - R}$$

$$\%H \text{ libre} = H \text{ total} - 1$$

**ENSAYOS HORMIGÓN FRESCO:**

Escurrimiento:		Escurrimiento sin fibras:	
T50 =	16,4	T50 =	3,3
∅ máx =	53 - 55,5	∅ máx =	72 - 73

H total = 8,41  
H libre = 7,41

H total = 9,83  
H libre = 8,83

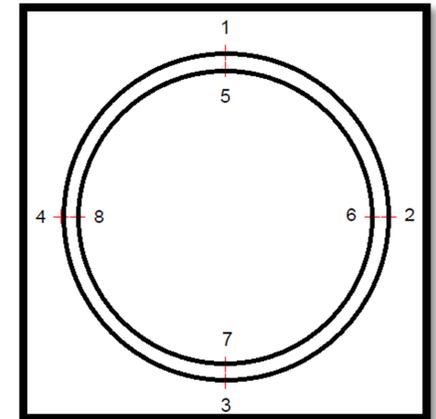
H total = 4,44  
H libre = 3,44

H total = 0,81  
H libre = 0,00

**Anillo Japonés:**

∅ máx = 43

Alturas puntos (cm):	
1 = 12	5 = 6,7
2 = 11,3	6 = 8
3 = 11	7 = 6
4 = 11	8 = 6,8



**Embudo en V:**

Tiempo = BLOQUEO

**Aire Ocluido**

Resultado = 2,4%

## Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

**V.2.3**

FECHA: 02/05/2013

% HUMEDAD LIBRE:	
Arena 0/2 =	7,34
Arena 0/4 =	2,69
Grava =	0,00

DOSIFICACIÓN:	N = 55 L
	(kg)
<b>Cem</b>	17,88
<b>Agua</b>	7,52
<b>Finos 1</b>	1,02
<b>A fina 28</b>	30,52
<b>A grue 41</b>	42,75
<b>Grava 30</b>	30,46

Fibras poliméricas: 6,2 kg/m3	
341	g
Aditivo: Sika viscocrete 3425	
1,3 % =	341

DATOS HUMEDAD ÁRIDOS	
ARENA 0/2	
Recipiente + Espatula	523,2
R+E+ arena 0/2 H	724,3
R+E+ arena 0/2 S	708,7
ARENA 0/4	
Recipiente + Espatula	523,7
R+E+ arena 0/4 H	647,4
R+E+ arena 0/4 S	643
GRAVA	
Recipiente + Espatula	523,2
R+E+ grava	691,2
R+E+ grava	689,9

$$\%H \text{ total} = \frac{Mh - Ms}{Ms - R}$$

$$\%H \text{ libre} = H \text{ total} - 1$$

H total = 8,41

H libre = 7,41

H total = 3,69

H libre = 2,69

H total = 0,78

H libre = 0,00

ARENA 0/2	
Recipiente + Espatula	523,1
R+E+ arena 0/2 H	700,8
R+E+ arena 0/2 S	687,2

H total = 8,29

H libre = 7,29

**ENSAYOS HORMIGÓN FRESCO:**

Ecurrimiento:	
T50 =	10,5
∅ máx =	55,5 - 54

Ecurrimiento sin fibras:	
T50 =	2,8
∅ máx =	68,5 - 71

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

**V.2.4**

FECHA: 06/05/2013

% HUMEDAD LIBRE:	
Arena 0/2 =	6,38
Arena 0/4 =	2,16
Grava =	0

DOSIFICACIÓN:	N = 62 L
	(kg)
<b>Cem</b>	20,15
<b>Agua</b>	9,03
<b>Finos 1</b>	1,14
<b>A fina 28</b>	34,10
<b>A grue 41</b>	47,95
<b>Grava 30</b>	34,34

<b>Fibras poliméricas: 12,4 kg/m3</b>
768,8 g
<b>Aditivo: Sika viscocrete 3425</b>
1,3 % = 261,95 g

DATOS HUMEDAD ÁRIDOS	
ARENA 0/2	
Recipiente + Espatula	522,3 g
R+E+ arena 0/2 H	643 g
R+E+ arena 0/2 S	634,7 g
ARENA 0/4	
Recipiente + Espatula	523,1 g
R+E+ arena 0/4 H	686,5 g
R+E+ arena 0/4 S	681,5 g
GRAVA	
Recipiente + Espatula	522,2 g
R+E+ grava	720,4 g
R+E+ grava	719,2 g

%H total = $\frac{Mh - Ms}{Ms - R}$
%H libre = H total - 1

H total = 7,38  
H libre = 6,38

H total = 3,16  
H libre = 2,16

H total = 0,61  
H libre = 0

**ENSAYOS HORMIGÓN FRESCO:**

**Escurrimiento:**

T50 =	-
∅ máx =	-

**Anillo Japones:**

∅ máx =	-
---------	---

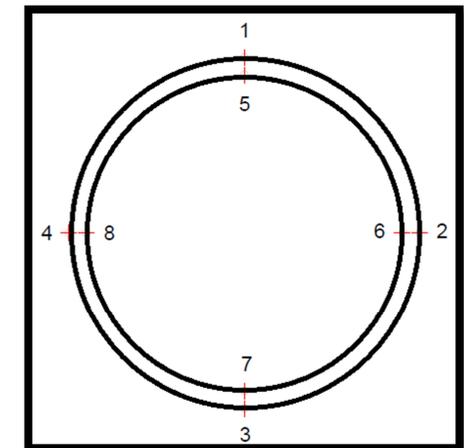
Alturas puntos (cm):	
1 = -	5 = -
2 = -	6 = -
3 = -	7 = -
4 = -	8 = -

**Embudo en V:**

Tiempo =	- seg
----------	-------

**Escurrimiento sin fibras:**

T50 =	2,5
∅ máx =	75,5-73,5



**Aire Ocluido**

Resultado =	2,50%
-------------	-------

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

**V.2.5**

FECHA: 09/05/2013

23°C

% HUMEDAD LIBRE:	
Arena 0/2 =	6,61
Arena 0/4 =	2,48
Grava =	0,23

DOSIFICACIÓN:	N = 64 L
	(kg)
<b>Cem</b>	20,80
<b>Agua</b>	8,75
<b>Finos 1</b>	1,18
<b>A fina 28</b>	35,51
<b>A grue 41</b>	49,75
<b>Grava 30</b>	35,45

<b>Fibras poliméricas: 6,2 kg/m3</b>
396,8 g
<b>Aditivo: Sika viscocrete 3425</b>
1,3 % = 270,4 g

DATOS HUMEDAD ÁRIDOS	
ARENA 0/2	
Recipiente + Espatula	522,6 g
R+E+ arena 0/2 H	727,9 g
R+E+ arena 0/2 S	713,5 g
ARENA 0/2	
Recipiente + Espatula	522,6
R+E+ arena 0/2 H	637,7
R+E+ arena 0/2 S	629,5
ARENA 0/4	
Recipiente + Espatula	523 g
R+E+ arena 0/4 H	665,6 g
R+E+ arena 0/4 S	660,8 g
GRAVA	
Recipiente + Espatula	522,5 g
R+E+ grava	859,3 g
R+E+ grava	855,2 g

%H total	$\frac{Mh - Ms}{Ms - R}$
%H libre	$H \text{ total} - 1$

**ENSAYOS HORMIGÓN FRESCO:**

**Escurrimiento:**

T50 =	3,5
∅ máx =	60-60

**Escurrimiento sin fibras:**

T50 =	2,5
∅ máx =	76,5-75,5

H total = 7,54

H libre = 6,54

H total = 7,67

H libre = 6,67

**Anillo Japonés:**

∅ máx =	49-45
---------	-------

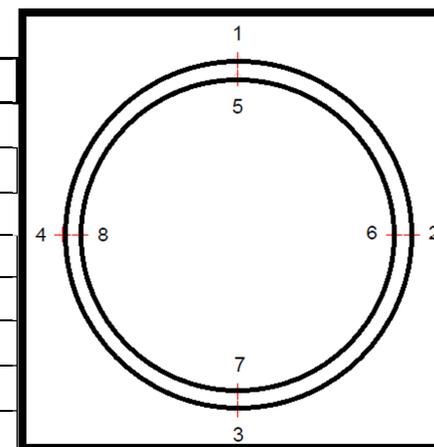
H total = 3,48

H libre = 2,48

Alturas puntos (cm):	
1 = 11	5 = 7
2 = 11,5	6 = 7
3 = 11,5	7 = 6,5
4 = 12	8 = 7

H total = 1,23

H libre = 0,23



**Embudo en V:**

Tiempo =	Nulo
----------	------

**Aire Ocluido**

Resultado =	2,60%
-------------	-------

## Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

**V.2.6**

FECHA: 09/05/2013

23°

% HUMEDAD LIBRE:	
Arena 0/2 =	6,74
Arena 0/4 =	2,88
Grava =	0

DOSIFICACIÓN:	N = 55	L
	(kg)	
<b>Cem</b>	17,88	
<b>Agua</b>	7,39	
<b>Finos 1</b>	1,02	
<b>A fina 28</b>	30,74	
<b>A grue 41</b>	42,66	
<b>Grava 30</b>	30,46	

<b>Fibras poliméricas: 9 kg/m3</b>
495 g
<b>Aditivo: Sika visocrete 3425</b>
1,3 % = 232,3 g

DATOS HUMEDAD ÁRIDOS	
ARENA 0/2	
Recipiente + Espatula	523,2 g
R+E+ arena 0/2 H	684,2 g
R+E+ arena 0/2 S	671,8 g
ARENA 0/2	
Recipiente + Espatula	522,8
R+E+ arena 0/2 H	808,3
R+E+ arena 0/2 S	789,3
ARENA 0/4	
Recipiente + Espatula	522,8 g
R+E+ arena 0/4 H	718,4 g
R+E+ arena 0/4 S	711,1 g
GRAVA	
Recipiente + Espatula	522,4 g
R+E+ grava	790,1 g
R+E+ grava	787,8 g

H total = 8,35

H libre = 7,35

H total = 7,13

H libre = 6,13

H total = 3,88

H libre = 2,88

H total = 0,86

H libre = 0

**ENSAYOS HORMIGÓN FRESCO:**
**Escurrimiento:**

T50 =	5
∅ máx =	48,5-47

**Escurrimiento sin fibras:**

T50 =	3
∅ máx =	67,5-63,5

$$\%H \text{ total} = \frac{Mh - Ms}{Ms - R}$$

$$=$$

$$\%H \text{ libre} = H \text{ total} - 1$$

## Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

**V.2.7**

FECHA: 09/05/2013

% HUMEDAD LIBRE:	
Arena 0/2 =	6,17
Arena 0/4 =	2,59
Grava =	0

DOSIFICACIÓN:	N = 55 L
	(kg)
<b>Cem</b>	17,88
<b>Agua</b>	7,39
<b>Finos 1</b>	1,02
<b>A fina 28</b>	30,74
<b>A grue 41</b>	42,66
<b>Grava 30</b>	30,46

<b>Fibras poliméricas: 9 kg/m3</b>
495 g
<b>Aditivo: Sika visocrete 3425</b>
1,3 % = 232,3 g

DATOS HUMEDAD ÁRIDOS	
ARENA 0/2	
Recipiente + Espatula	523,2 g
R+E+ arena 0/2 H	712,1 g
R+E+ arena 0/2 S	699,4 g
ARENA 0/4	
Recipiente + Espatula	522,6g
R+E+ arena 0/4 H	796,9 g
R+E+ arena 0/4 S	787,4 g
GRAVA	
Recipiente + Espatula	522,5 g
R+E+ grava	750,5 g
R+E+ grava	749 g

$\%H \text{ total} = \frac{Mh - Ms}{Ms - R}$
$\%H \text{ libre} = H \text{ total} - 1$

 H total = 7,21  
H libre = 6,18

 H total = 3,59  
H libre = 2,59

 H total = 0,6  
H libre = 0

ARENA 0/2	
Recipiente + Espatula	522,8
R+E+ arena 0/2 H	700,8
R+E+ arena 0/2 S	688,9

 H total = 7,16  
H libre = 6,16

**ENSAYOS HORMIGÓN FRESCO:**

Escurrimiento:	
T50 =	5
∅ máx =	55-57

Escurrimiento sin fibras:	
T50 =	2,8
∅ máx =	69-70

## 5.3.- Ensayos de hormigón endurecido

### 5.3.1.- Ensayo de las probetas

En este apartado vamos a exponer los resultados de las probetas. Hemos confeccionado 7 amasadas en total, de cada amasada hemos realizado dos probetas prismáticas que se han roto a flexión y dos probetas cilíndricas que se han ensayado a compresión.

Como observaremos aunque las probetas que pertenecen a la misma amasada tienen ambas la misma cantidad en  $\text{kg/m}^3$  de fibras poliméricas, las probetas dentro de unos valores lógicos rompen de forma distinta y eso es así porque las fibras en su interior se distribuyen aleatoriamente de forma que éstas colaboran con la matriz cementicia de distinta manera en cada una de las probetas. Como ya sabemos el hormigón utilizado en todas las amasadas es el mismo para de esta forma no tener más variables que las distintas densidades de fibras y poder atribuirle los distintos comportamientos de cada amasada a la influencia de las fibras.

#### 5.3.1.1.- Ensayos a flexión

Los ensayos a flexión tanto en probetas como en las vigas se han realizado con la máquina *PEF-150-MDA de Ibertest*. Los datos los recoge un programa instalado en el ordenador denominado *wintest*, los cuales se vuelcan en Excel para poder realizar las gráficas. Los datos que nos proporciona la *PEF-150-MDA* son: fuerza (kN) y deformación (mm).

Sabiendo la fuerza (kN) podemos hallar la tensión (MPa) mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Tensión (MPa)} = \frac{3 \times F \times d}{2 \times b \times (h - e)^2}$$

Dónde:

- $F$  = es la Fuerza en kN
- $d$  = es la distancia en mm entre apoyos
- $b$  = es la medida de la base en mm
- $h$  = es la altura en mm
- $e$  = es la medida de la entalla realizada en mm



Fotografía 64.- Rotura probeta

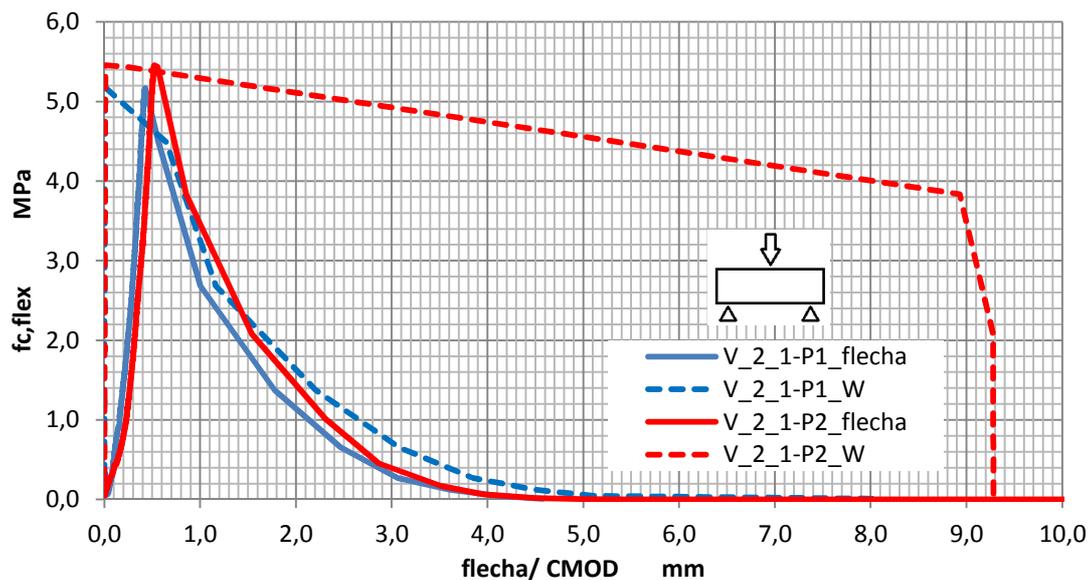
Una vez hallada la tensión y sabiendo la deformación que ha sufrido el captador podemos realizar la gráfica de tensión-deformación. Los captadores para recoger la

máxima información posible se han colocado en la parte inferior justo donde se ha realizado la entalla.

A continuación vamos a proceder a mostrar los resultados obtenidos en todas las probetas prismáticas:

### 1) V\_2\_1. Hormigón patrón.

Las probetas V\_2\_1 son las probetas patrón, son las únicas probetas que va sin fibras, así de esta manera podemos analizar la resistencia del hormigón.



Probetas prismáticas V\_2\_1-P1 y V\_2\_1-P2 ensayadas a flexión a 28 días. 0 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_1-P1**

Fuerza máxima: 9,3 kN

Tensión máxima: 5,16 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 0,42 mm



- **V\_2\_1-P2**

Fuerza máxima: 9,82 kN

Tensión máxima: 5,45 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 0,52 mm

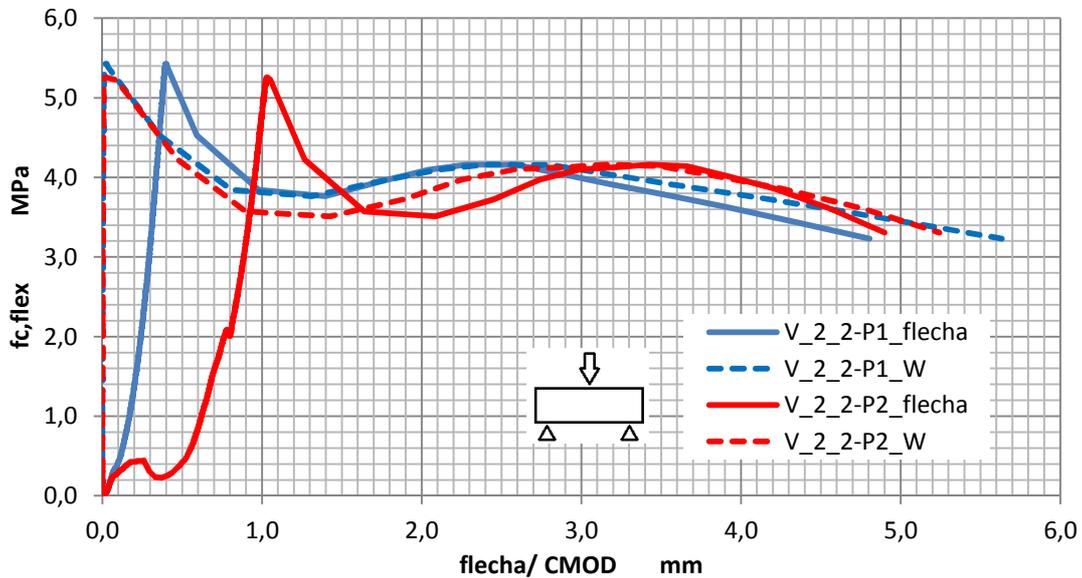


Fotografía 65 y 66.-

Rotura probetas prismáticas V\_2\_1

## 2) V\_2\_2. Hormigón patrón + 12,4 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_2 contienen 12,4 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la máxima cantidad de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 4Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas prismáticas V\_2\_2-P1 y V\_2\_2-P2 ensayadas a flexión a 28 días. 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_2-P1**

Fuerza máxima: 9,77 kN

Tensión máxima: 5,427 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 0,402 mm

- **V\_2\_2-P2**

Fuerza máxima: 9,46 kN

Tensión máxima: 5,25 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 1.0346 mm

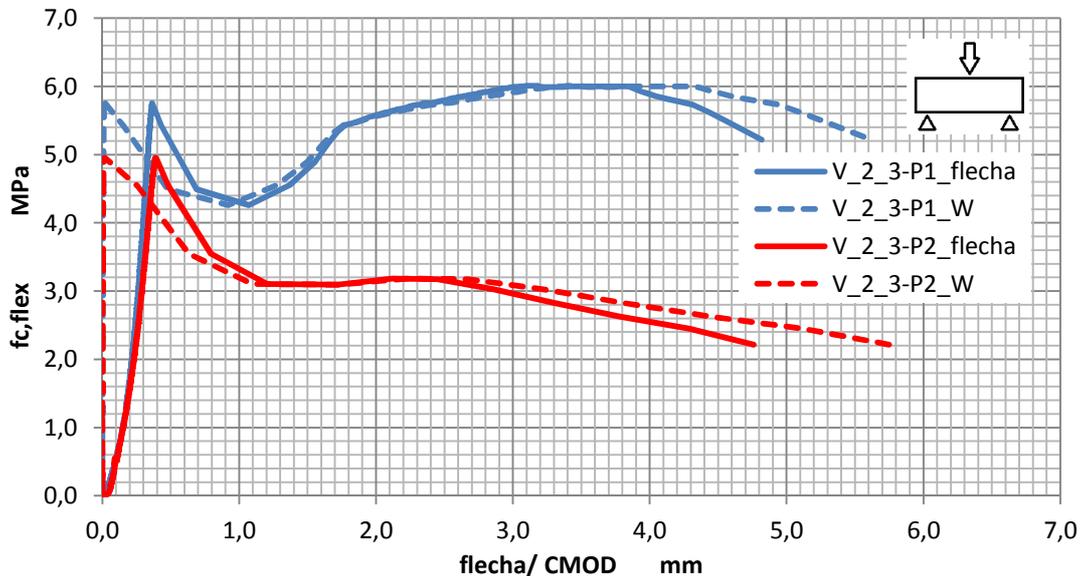


Fotografía 67y 68.-

Rotura probetas prismáticas V\_2\_2

### 3) V\_2\_3. Hormigón patrón + 6,2 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_3 contienen 6,2 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la mínima cantidad de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 4Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas prismáticas V\_2\_3-P1 y V\_2\_3-P2 ensayadas a flexión a 28 días. 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_3-P1**

Matriz cementante

Fuerza máxima: 10,35 kN

Tensión máxima: 5,75 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 0,365 mm

Fibras

Fuerza máxima: 10,8 kN

Tensión máxima: 6 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 3,842 mm



Fotografía 69.- Rotura

probeta prismática V\_2\_3

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

La probeta V\_2\_3-P1 es muy interesante ya que como estamos viendo los valores que recogemos y analizamos son siempre de la rotura de la matriz cementicia, en cambio, en esta probeta las fibras una vez rota la matriz empiezan a actuar y consiguen atar la matriz dando una fuerza, tensión y deformación superior a la que habíamos conseguido únicamente con el hormigón.

- **V\_2\_3-P2**

Fuerza máxima: 8,91 kN

Tensión máxima: 4,95 MPa

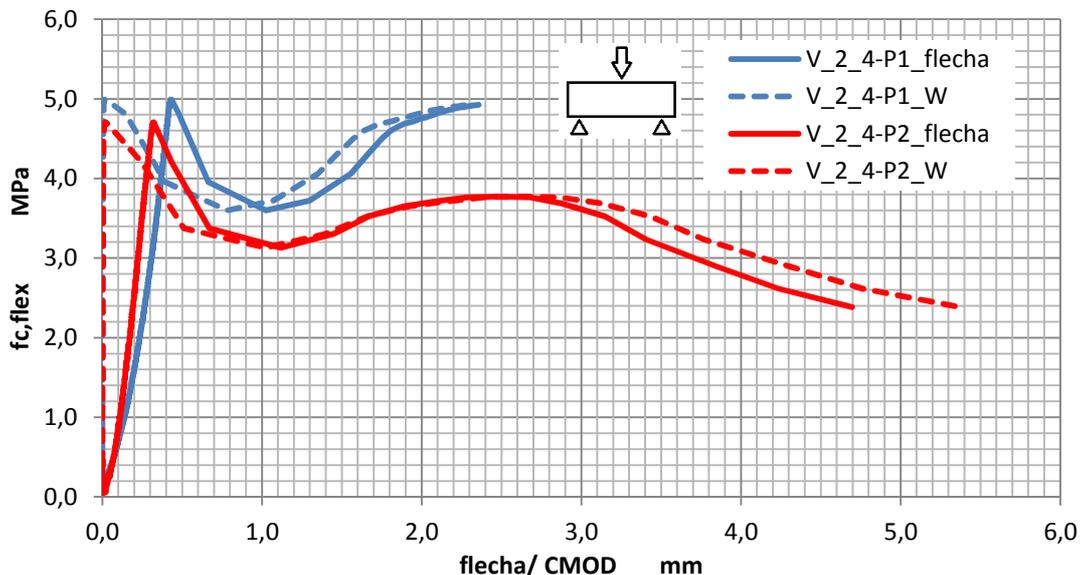
Deformación máxima antes de rotura: 0,393 mm



Fotografía 70.-probeta prismática V\_2\_3

#### 4) V\_2\_4. 1/2 Hormigón patrón + 12,4 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_4 contienen 12,4 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la máxima cantidad de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 2Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas prismáticas V\_2\_4-P1 y V\_2\_4-P2 ensayadas a flexión a 28 días. 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

• **V\_2\_4-P1**

Fuerza máxima: 8,98 kN

Tensión máxima: 4,988 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 0,434 mm



• **V\_2\_4-P2**

Fuerza máxima: 8,47 kN

Tensión máxima: 4,705 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 0,32 mm

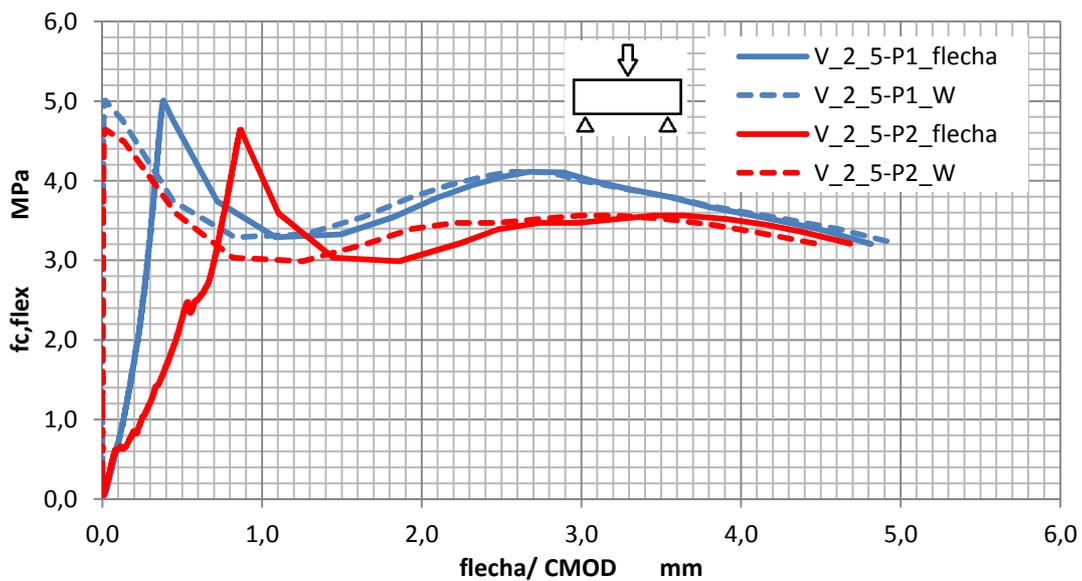


Fotografía 71 y 72.-

Rotura probetas prismáticas V\_2\_4

**5) V\_2\_5. Hormigón patrón + 6,2 kg/m<sup>3</sup>.**

Las probetas V\_2\_5 contienen 6,2 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la mínima cantidad de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 2Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas prismáticas V\_2\_5-P1 y V\_2\_5-P2 ensayadas a flexión a 28 días. 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_5-P1**

Fuerza máxima: 9,01 kN

Tensión máxima: 5,005 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 0,383 mm



- **V\_2\_5-P2**

Fuerza máxima: 8,35 kN

Tensión máxima: 4,638 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 0,868 mm

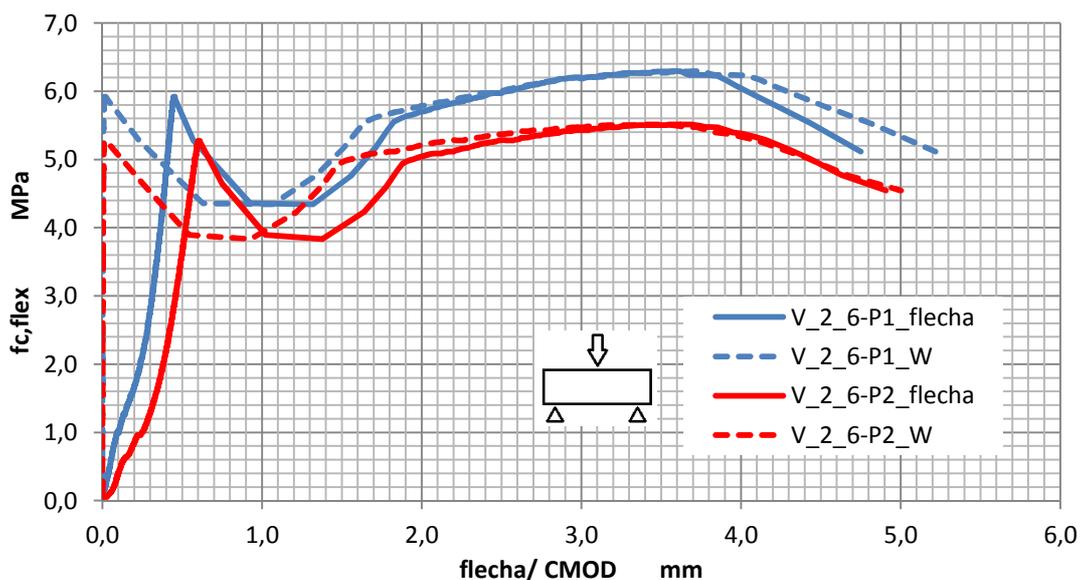


Fotografía 73y 74.-

Rotura probetas prismáticas V\_2\_5

### 6) V\_2\_6. Hormigón patrón + 9 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_6 contienen 9 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la cantidad media de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 4Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas prismáticas V\_2\_6-P1 y V\_2\_6-P2 ensayadas a flexión a 28 días. 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_6-P1**

Matriz cementante

Fuerza máxima: 10,66 kN

Tensión máxima: 5,922 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 0,453 mm

Fibras

Fuerza máxima: 11,33 kN

Tensión máxima: 6,294 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 3,605 mm



Fotografía 75.-Probeta prismática V\_2\_6

La probeta V\_2\_6-P1 es muy interesante, tiene el mismo comportamiento que presentaba la probeta V\_2\_3-P1 ya que las fibras una vez rota la matriz empieza a actuar y consiguen atar la matriz dando una fuerza, tensión y deformación superior.

- **V\_2\_6-P2**

Matriz cementante

Fuerza máxima: 9,49 kN

Tensión máxima: 5,272 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 0,608 mm

Fibras

Fuerza máxima: 9,92 kN

Tensión máxima: 5,511 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 3,689 mm

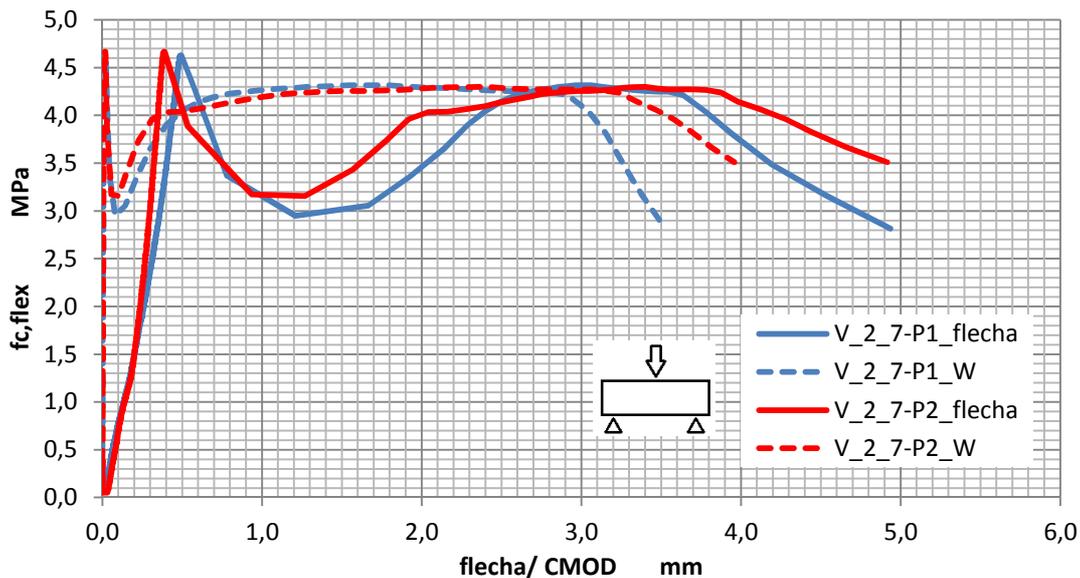


Fotografía 76.-Probeta prismática V\_2\_6

Como podemos observar la probeta V\_2\_6-P2 también tiene el mismo comportamiento que su análoga.

### 7) V\_2\_7. 1/2 Hormigón patrón + 9 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_7 contienen 9 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la cantidad media de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 2Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas prismáticas V\_2\_7-P1 y V\_2\_7-P2 ensayadas a flexión a 28 días. 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_7-P1**

Fuerza máxima: 8,33 kN

Tensión máxima: 4,627 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 0,494 mm



- **V\_2\_7-P2**

Fuerza máxima: 8,4 kN

Tensión máxima: 4,666 MPa

Deformación máxima antes de rotura: 0,389 mm



Fotografía 77y 78.-

Rotura probetas prismáticas V\_2\_7

### 5.3.1.2.- Ensayos a compresión

Los ensayos a compresión de las probetas cilíndricas se han realizado con la máquina de ensayo del laboratorio. Los datos los recoge un programa instalado en el ordenador denominado wintest, los cuales se vuelcan en Excel para poder realizar las gráficas. Los datos que nos proporciona la son: fuerza (kN) y deformación (mm).

Sabiendo la fuerza (kN) podemos hallar la tensión (MPa) mediante la siguiente fórmula:

$$Tensión (MPa) = \frac{F}{\pi \times r_1 \times r_2}$$

Dónde:

- $F$  = es la Fuerza en kN
- $r_1$  = es la distancia en mm del radio 1
- $r_2$  = es la distancia en mm del radio 2

Una vez hallada la tensión y sabiendo la deformación que ha sufrido el captador podemos realizar la gráfica de tensión-deformación. Los captadores para recoger la máxima información posible se han colocado en distintas zonas según el ensayo realizado. Como ya sabemos a las probetas cilíndricas le vamos a realizar dos ensayos, el ensayo del módulo de Young (E) y el ensayo de deformación total (DT) o rotura.

Para el ensayo del modulo de Young el captador se coloca en una camisa de acero que se encaja mediante presión de unos tornillos a la probeta de hormigón, en el caso del ensayo de rotura el captador se coloca perpendicular a la superficie superior de la maquina lo más cerca posible de la probeta para medir de la manera más exacta posible la deformación.



Fotografía 79.- Ensayo del Modulo de Young

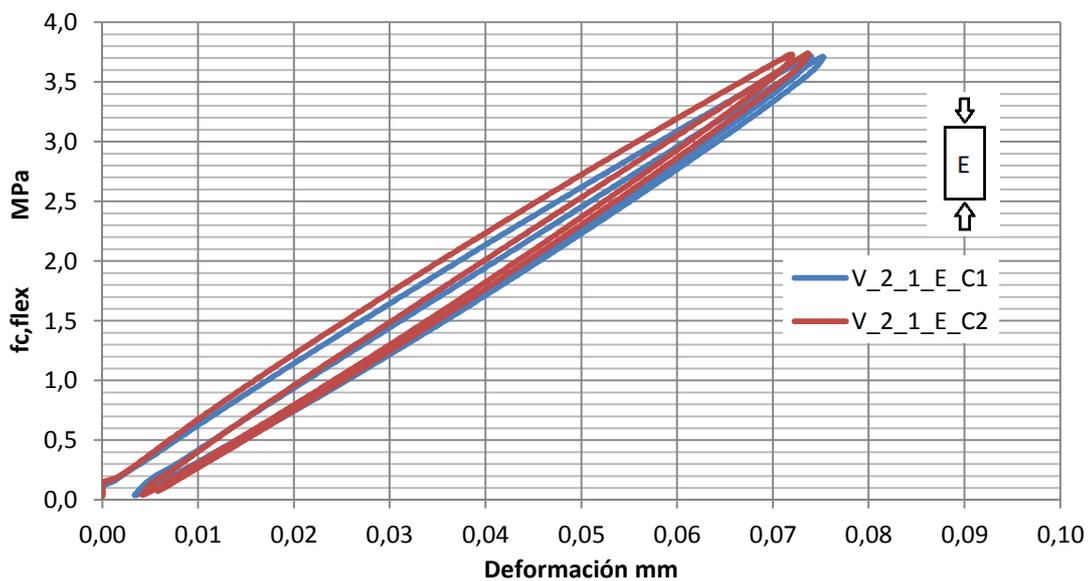


Fotografía 80.- Ensayo de rotura o deformación total

A continuación vamos a proceder a mostrar los resultados obtenidos en el ensayo del modulo de Young que nos proporcionara cual es el modulo de elasticidad de nuestro hormigón y luego expondremos los resultados del ensayo de rotura o deformación total en el cual se registra la máxima carga alcanzada por la probeta y se calcula la resistencia a compresión del hormigón.

### 1) V\_2\_1\_E. Hormigón patrón.

Las probetas V\_2\_1 son las probetas patrón, son las únicas probetas que va sin fibras, así de esta manera podemos analizar la elasticidad del hormigón.



Probetas cilíndricas V\_2\_1-C1 y V\_2\_1-C2: Modulo de Young a 28 días. 0 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_1\_C1\_E**

Modulo de Young: 30404,256 MPa

- **V\_2\_1\_C2\_E**

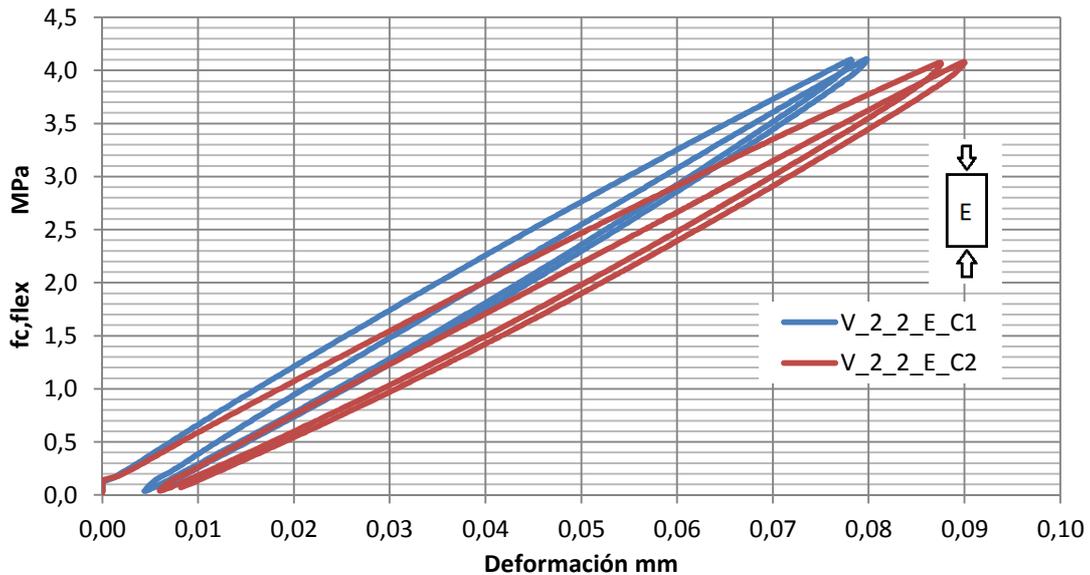
Modulo de Young: 31480,46 MPa

Antes de empezar a exponer los resultados de las probetas con fibras, recalcar que aunque las fibras poliméricas atan muy bien las roturas del hormigón por flexión, no es su función principal la de la resistencia a compresión. No obstante al distribuirse de forma aleatoria por la masa de hormigón, algunas de ellas estarán situadas perpendicularmente a la dirección de la aplicación de las cargas y de esta forma

consiguen que la probeta cilíndrica se deforme transversalmente en una menor medida.

## 2) V\_2\_2\_E. Hormigón patrón + 12,4 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_2 contienen 12,4 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la máxima cantidad de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 4Ø8 como armadura longitudinal inferior.



*Probetas cilíndricas V\_2\_2-C1 y V\_2\_2-C2: Modulo de Young a 28 días. 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.*

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_2\_C1\_E**

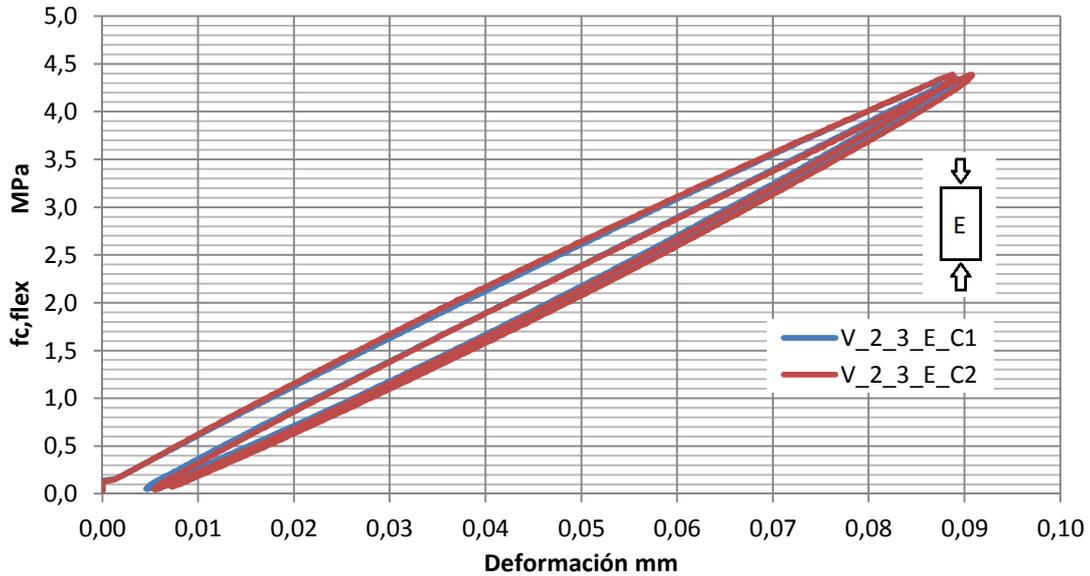
Modulo de Young: 32059,94 MPa

- **V\_2\_2\_C2\_E**

Modulo de Young: 28737,83 MPa

### 3) V\_2\_3\_E. Hormigón patrón + 6,2 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_3 contienen 6,2 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la mínima cantidad de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 4Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas cilíndricas V\_2\_3-C1 y V\_2\_3-C2: Modulo de Young a 28 días. 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_3\_C1\_E**

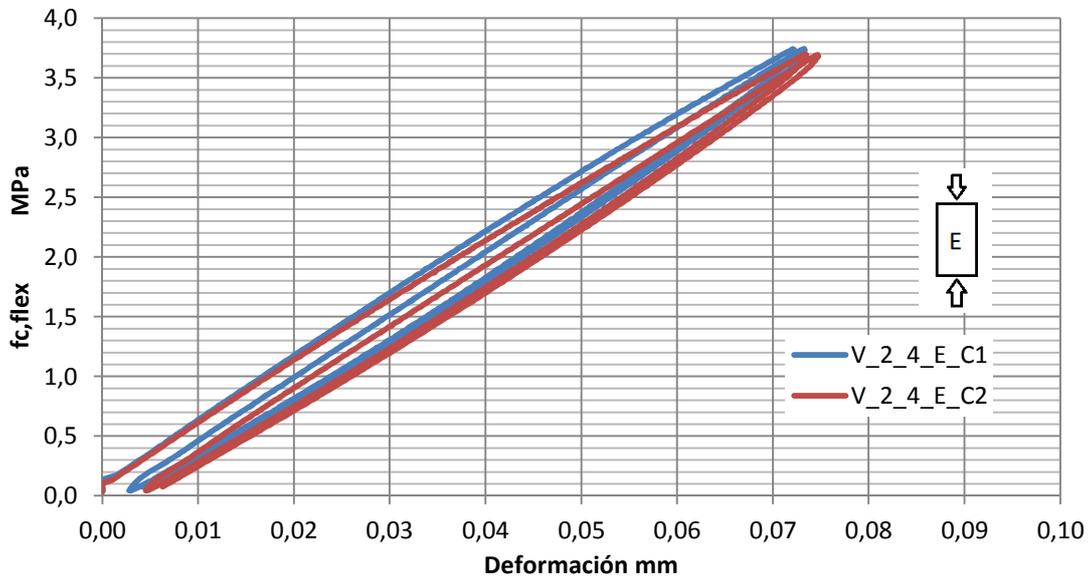
Modulo de Young: 30308,67 MPa

- **V\_2\_3\_C2\_E**

Modulo de Young: 30140,96 MPa

#### 4) V\_2\_4\_E. 1/2 Hormigón patrón + 12,4 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_4 contienen 12,4 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la máxima cantidad de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 2Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas cilíndricas V\_2\_4-C1 y V\_2\_4-C2: Modulo de Young a 28 días. 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_4\_C1\_E**

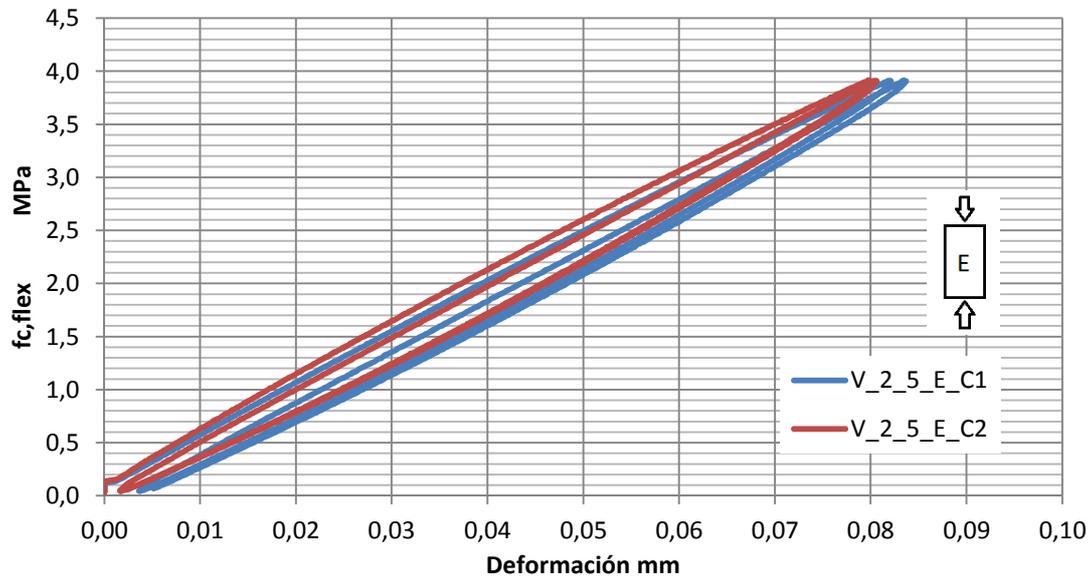
Modulo de Young: 31133,72 MPa

- **V\_2\_4\_C2\_E**

Modulo de Young: 31175,20 MPa

### 5) V\_2\_5\_E. Hormigón patrón + 6,2 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_5 contienen 6,2 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la mínima cantidad de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 2Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas cilíndricas V\_2\_5-C1 y V\_2\_5-C2: Modulo de Young a 28 días. 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_5\_C1\_E**

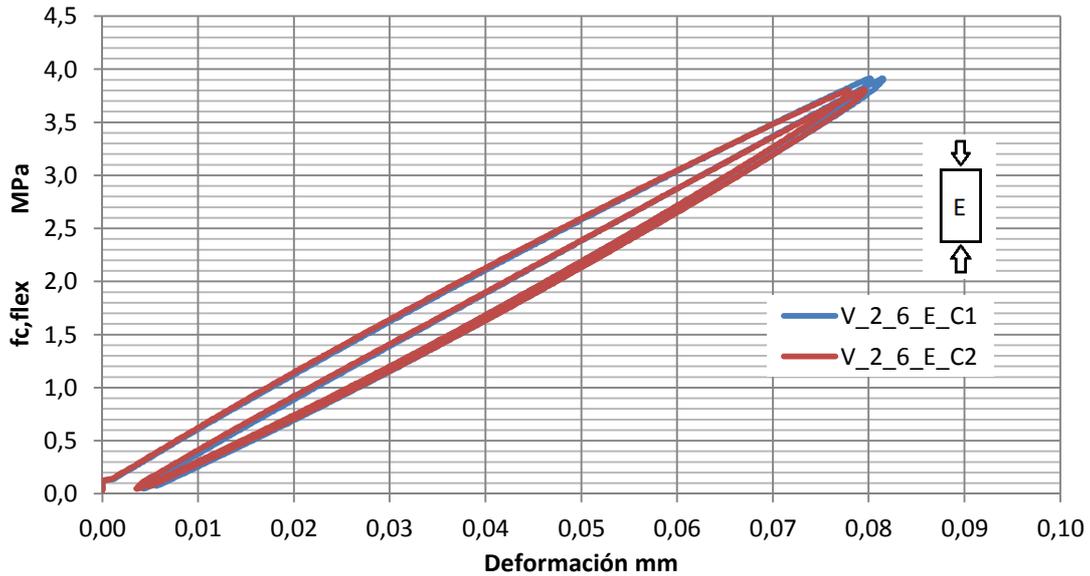
Modulo de Young: 28942,67 MPa

- **V\_2\_5\_C2\_E**

Modulo de Young: 29124,96 MPa

## 6) V\_2\_6\_E. Hormigón patrón + 9 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_6 contienen 9 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la cantidad media de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 4Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas cilíndricas V\_2\_6-C1 y V\_2\_6-C2: Modulo de Young a 28 días. 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_6\_C1\_E**

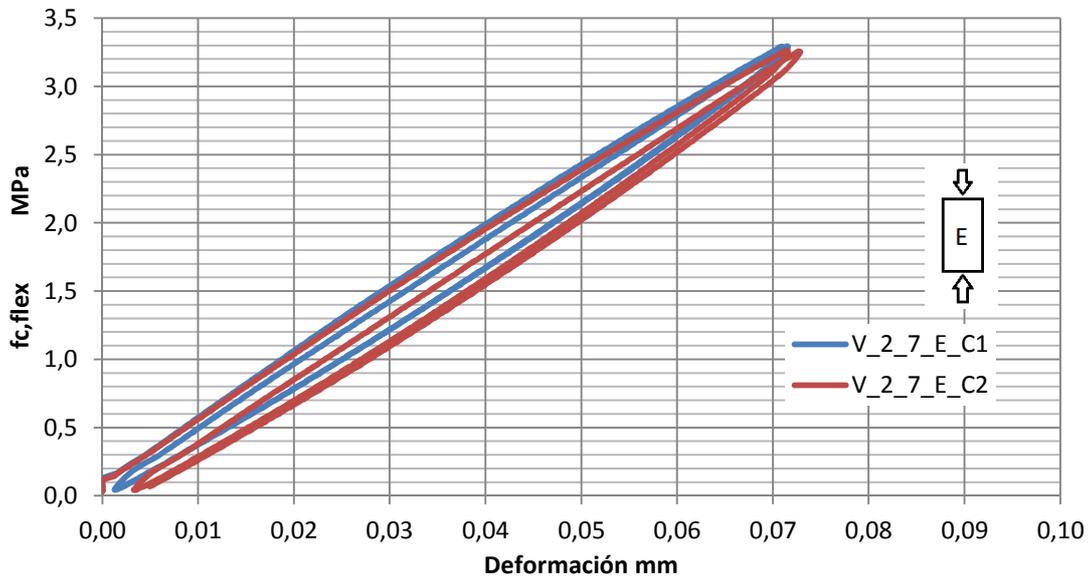
Modulo de Young: 29898,72 MPa

- **V\_2\_6\_C2\_E**

Modulo de Young: 29316,77 MPa

## 7) V\_2\_7\_E. 1/2 Hormigón patrón + 12,4 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_7 contienen 9 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la cantidad media de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 2Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas cilíndricas V\_2\_7-C1 y V\_2\_7-C2: Modulo de Young a 28 días. 9kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_7\_C1\_E**

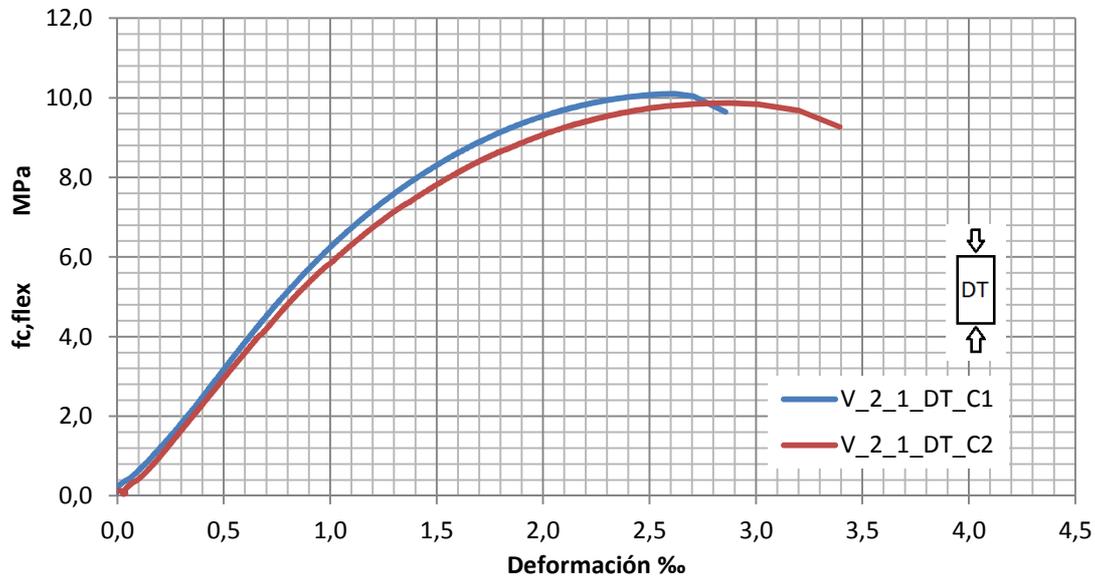
Modulo de Young: 27379,32 MPa

- **V\_2\_7\_C2\_E**

Modulo de Young: 27713,55 MPa

## 1) V\_2\_1\_DT. Hormigón patrón.

Las probetas V\_2\_1 son las probetas patrón, son las únicas probetas que va sin fibras, así de esta manera podemos analizar cuál es la tensión máxima de rotura del hormigón.



*Probetas cilíndricas V\_2\_1-C1 y V\_2\_1-C2: Rotura a 28 días. 0kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.*

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_1\_C1\_DT**

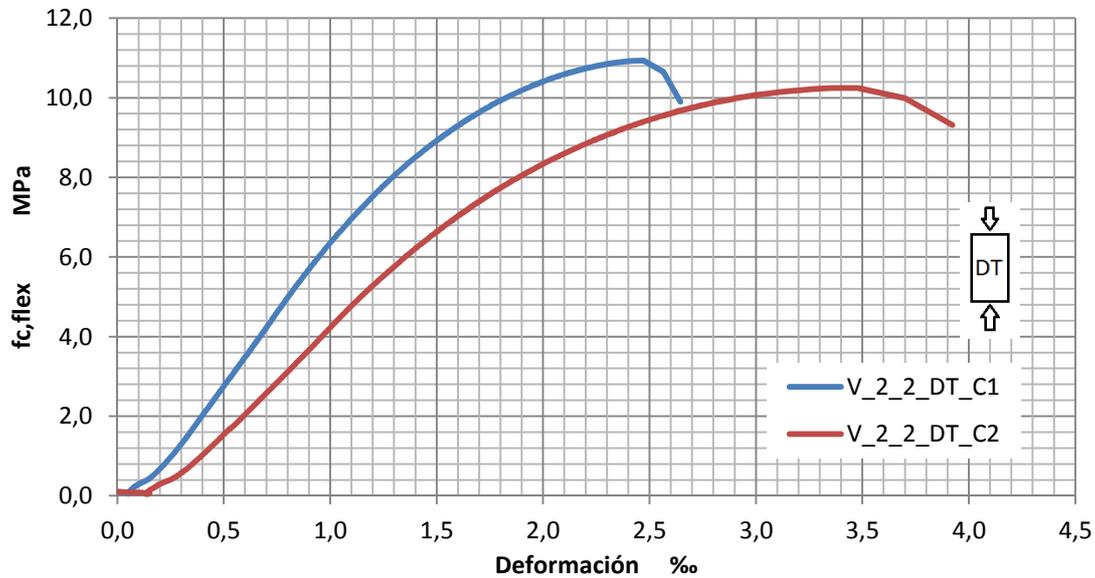
Tensión máxima: 10,09 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 0,785 mm

- **V\_2\_1\_C2\_DT**

Tensión máxima: 9,86 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 0,863 mm

## 2) V\_2\_2\_DT. Hormigón patrón + 12,4 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_2 contienen 12,4 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la máxima cantidad de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 4Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas cilíndricas V\_2\_2-C1 y V\_2\_2-C2: Rotura a 28 días. 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_2\_C1\_DT**

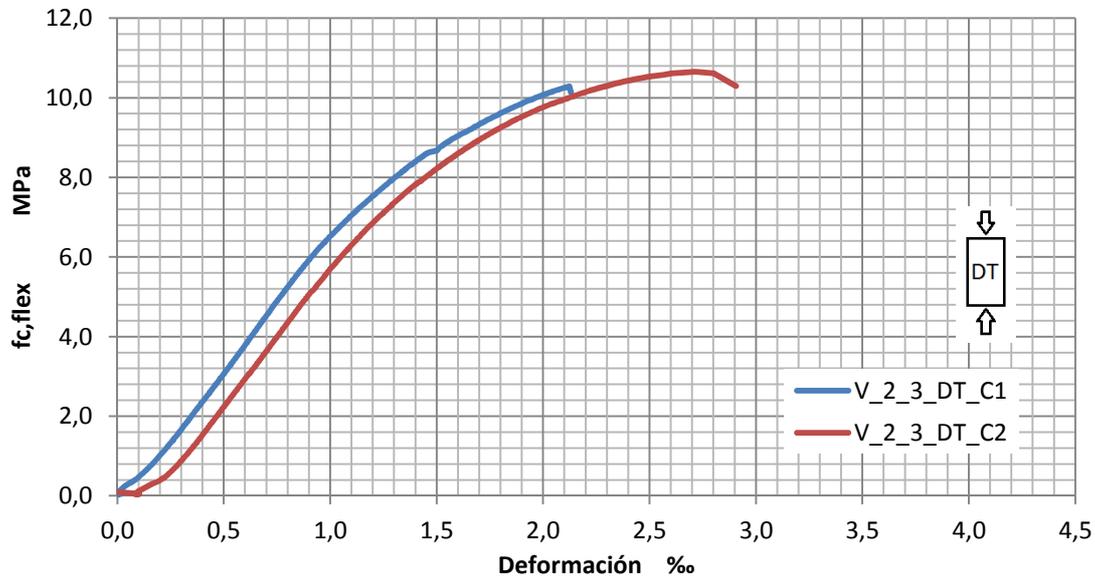
Tensión máxima: 10,93 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 0,742 mm

- **V\_2\_2\_C2\_DT**

Tensión máxima: 10,24 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 1,043 mm

### 3) V\_2\_3\_DT. Hormigón patrón + 6,2 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_3 contienen 6,2 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la mínima cantidad de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 4Ø8 como armadura longitudinal inferior.



*Probetas cilíndricas V\_2\_3-C1 y V\_2\_3-C2: Rotura a 28 días. 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.*

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_3\_C1\_DT**

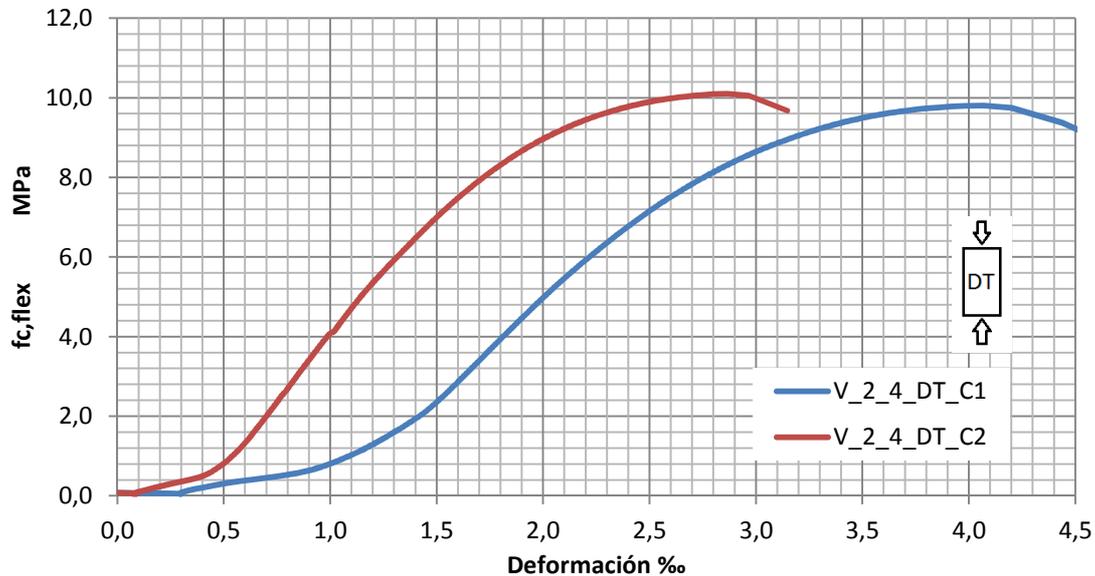
Tensión máxima: 10,28 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 0,636 mm

- **V\_2\_3\_C2\_DT**

Tensión máxima: 10,65 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 0,814 mm

#### 4) V\_2\_4\_DT. 1/2 Hormigón patrón + 12,4 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_4 contienen 12,4 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la máxima cantidad de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 2Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas cilíndricas V\_2\_4-C1 y V\_2\_4-C2: Rotura a 28 días. 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_4\_C1\_DT**

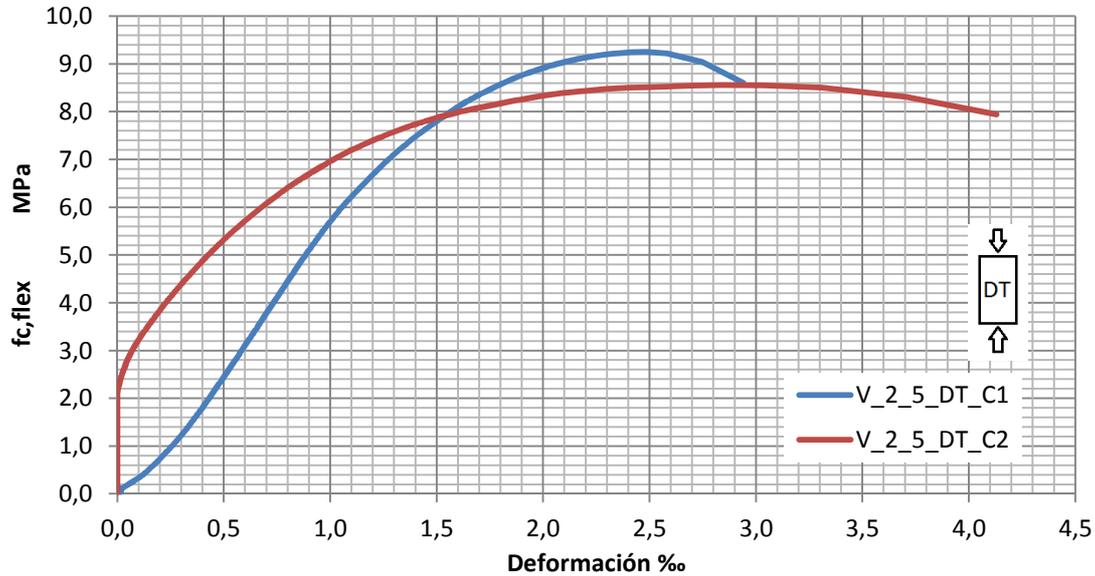
Tensión máxima: 9,802 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 1,220 mm

- **V\_2\_4\_C2\_DT**

Tensión máxima: 10,10 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 0,859 mm

### 5) V\_2\_5\_DT. 1/2 Hormigón patrón + 6,2 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_5 contienen 6,2 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la mínima cantidad de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 2Ø8 como armadura longitudinal inferior.



*Probetas cilíndricas V\_2\_5-C1 y V\_2\_5-C2: Rotura a 28 días. 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.*

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_5\_C1\_DT**

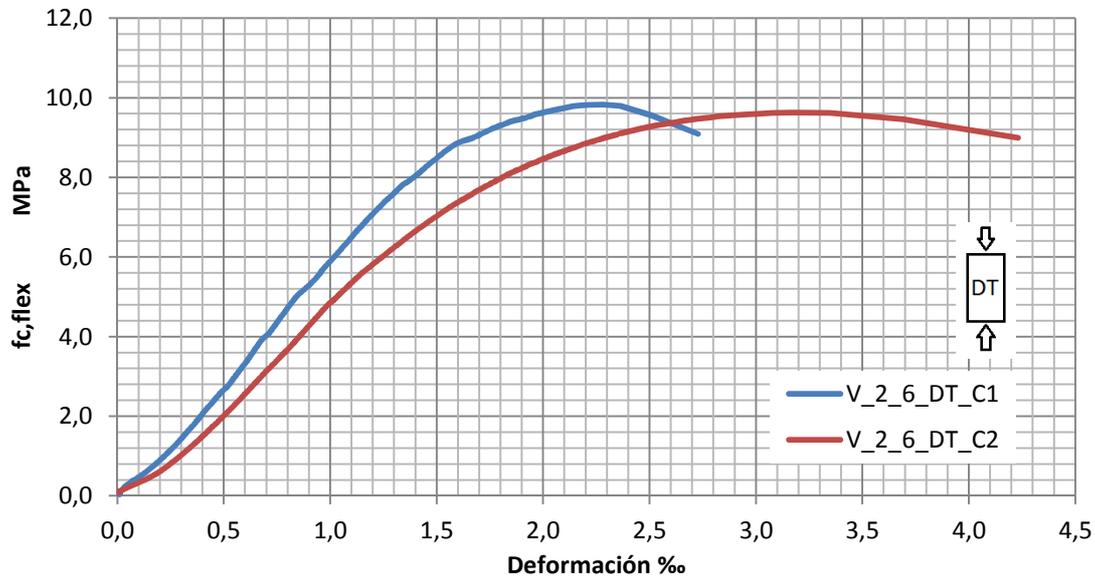
Tensión máxima: 9,251 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 0,744 mm

- **V\_2\_5\_C2\_DT**

Tensión máxima: 8,553 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 0,910 mm

## 6) V\_2\_6\_DT. Hormigón patrón + 9 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_6 contienen 9 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la cantidad media de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 4Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas cilíndricas V\_2\_6-C1 y V\_2\_6-C2: Rotura a 28 días. 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_6\_C1\_DT**

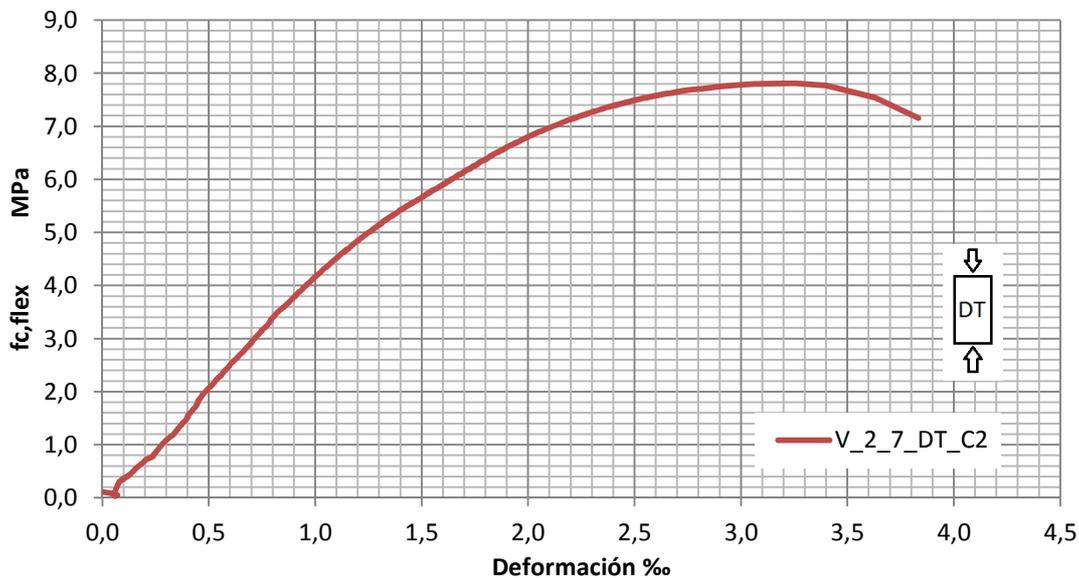
Tensión máxima: 9,829 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 0,684 mm

- **V\_2\_6\_C2\_DT**

Tensión máxima: 9,624 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 0,953 mm

## 7) V\_2\_7\_DT. 1/2 Hormigón patrón + 9 kg/m<sup>3</sup>.

Las probetas V\_2\_7 contienen 9 kg/m<sup>3</sup>. Esta es la cantidad media de fibras a la que hemos optado y pertenecen a la viga que lleva 2Ø8 como armadura longitudinal inferior.



Probetas cilíndricas V\_2\_7-C1 y V\_2\_7-C2: Rotura a 28 días. 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

- **V\_2\_7\_C1\_DT**

Tensión máxima: 8,415 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 0,654 mm

Aunque he especificado los valores, no los debemos tener muy en cuenta porque el ensayo ha sido erróneo ya que la gráfica tensión-deformación no pertenece a una gráfica lógica del hormigón.

- **V\_2\_7\_C2\_DT**

Tensión máxima: 7,808 MPa    Deformación máxima antes de rotura: 0,976 mm

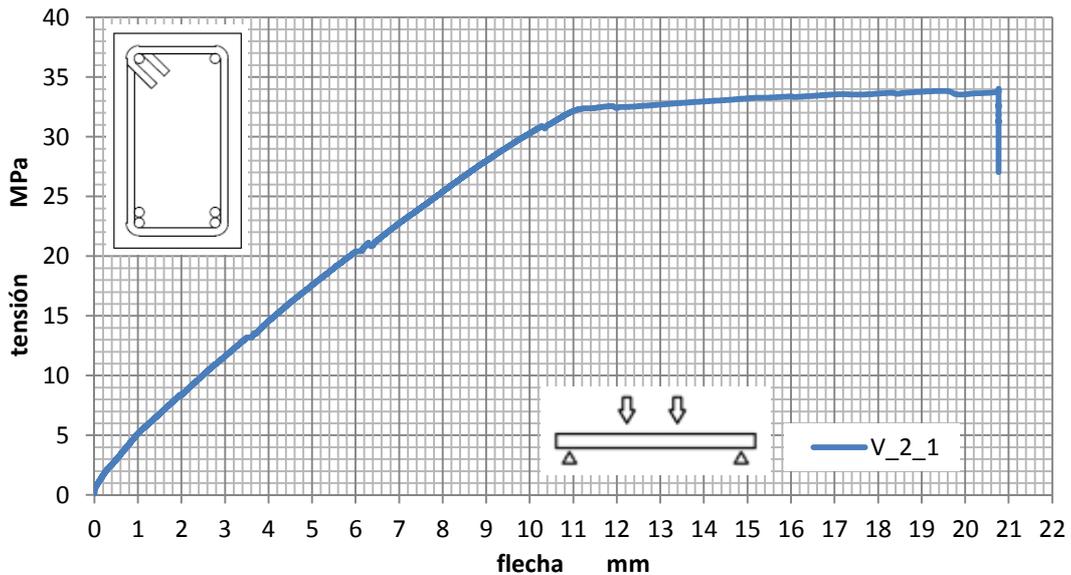
### 5.3.2.- Ensayo de las vigas

En este apartado vamos a exponer los resultados de los ensayos de las vigas. Hemos confeccionado 7 vigas en total como ya vimos en el programa experimental. Ahora nos centraremos en presentar los datos analíticos y más tarde haremos un análisis comparativo de las vigas para observar las variaciones en sus propiedades

mecánicas las distintas densidades de fibras poliméricas y los distintos tipos de armado.

### 1) V\_2\_1. Viga patrón.

La viga V\_2\_1 es la viga patrón, es la única viga que carece por completo de fibras, así de esta manera podemos analizar cuál es la repercusión de las fibras con las vigas que tienen el mismo armado.



Viga V\_2\_1 Ensayo a flexión a 28 días. 0 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Arm sup: 2Ø8; Arm inf: 4Ø8.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

Fuerza máxima: 48,18 kN

Tensión máxima: 34,009 MPa

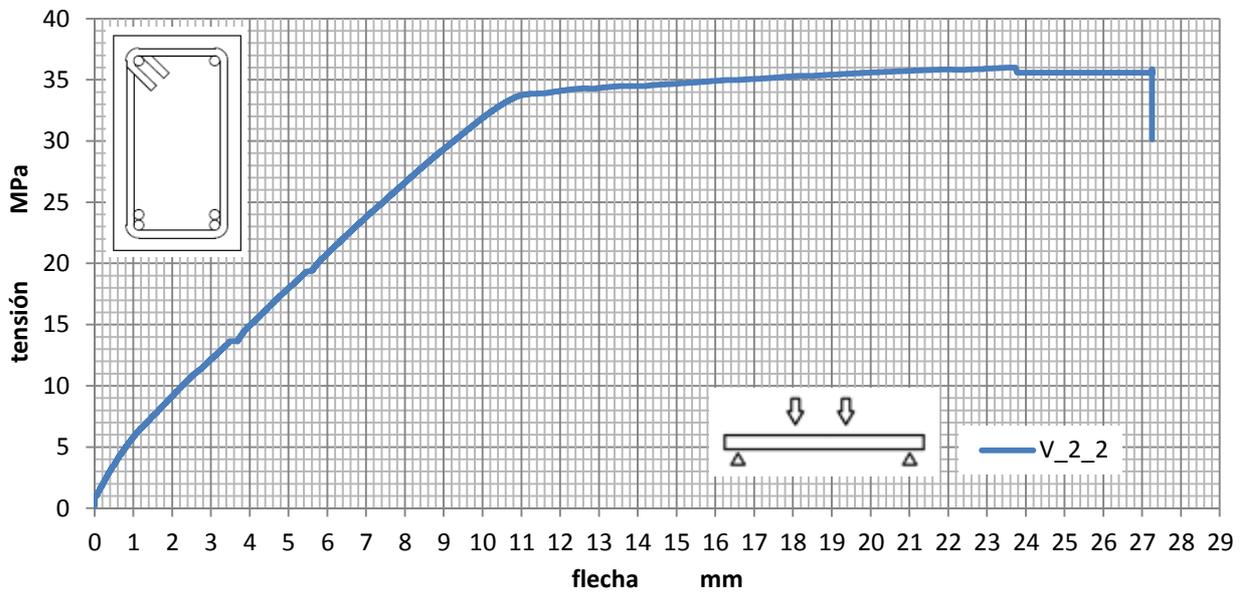
Flecha en Tensión máxima: 20,769 mm



Fotografía 81.- Rotura viga

## 2) V\_2\_2. Viga patrón + 12,4 kg/m<sup>3</sup>.

La viga V\_2\_2 es la viga que contiene 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras, tiene el mismo armado que la viga patrón por lo tanto veremos muy bien el efecto que las fibras le confieren al hormigón.



Viga V\_2\_2 Ensayo a flexión a 28 días. 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Arm sup: 2Ø8; Arm inf: 4Ø8.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

Fuerza máxima: 50,99 kN

Tensión máxima: 35,992 MPa

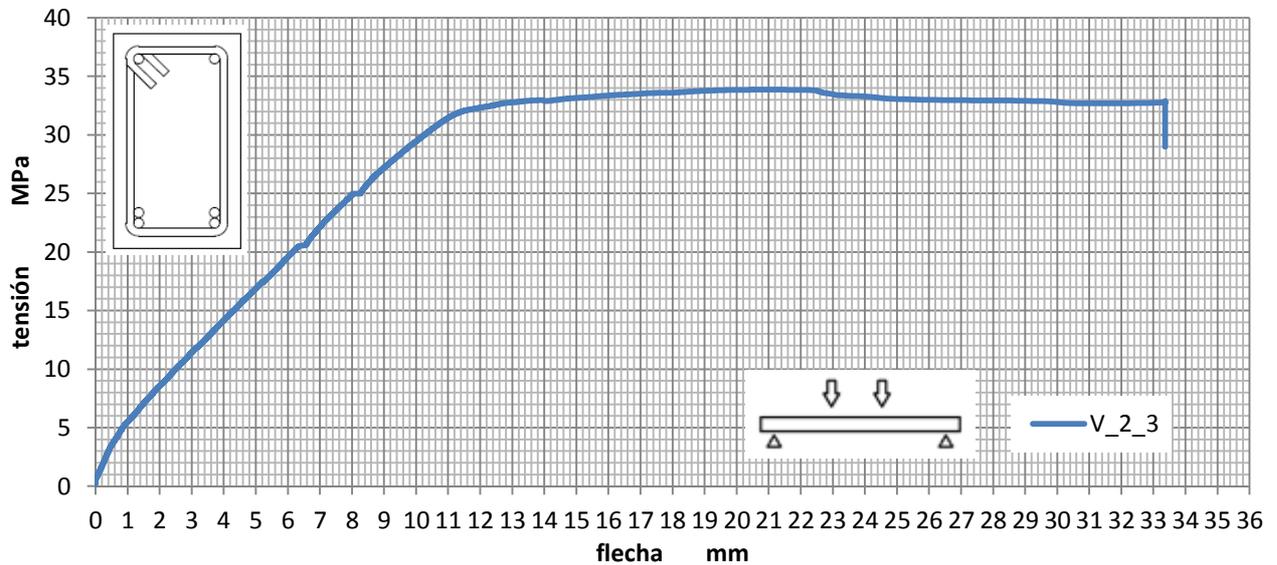
Flecha en Tensión máxima: 23,73 mm



Fotografías 82 y 83.- Rotura viga

### 3) V\_2\_3. Viga patrón + 6,2kg/m<sup>3</sup>.

La viga V\_2\_3 es la viga que contiene 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras, tiene el mismo armado que la viga patrón por lo tanto veremos muy bien el efecto que las fibras le confieren al hormigón, y la compararemos con la viga V\_2\_2.



Viga V\_2\_3 Ensayo a flexión a 28 días. 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Arm sup: 2Ø8; Arm inf: 4Ø8.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

Fuerza máxima: 47,97 kN

Tensión máxima: 33,86 MPa

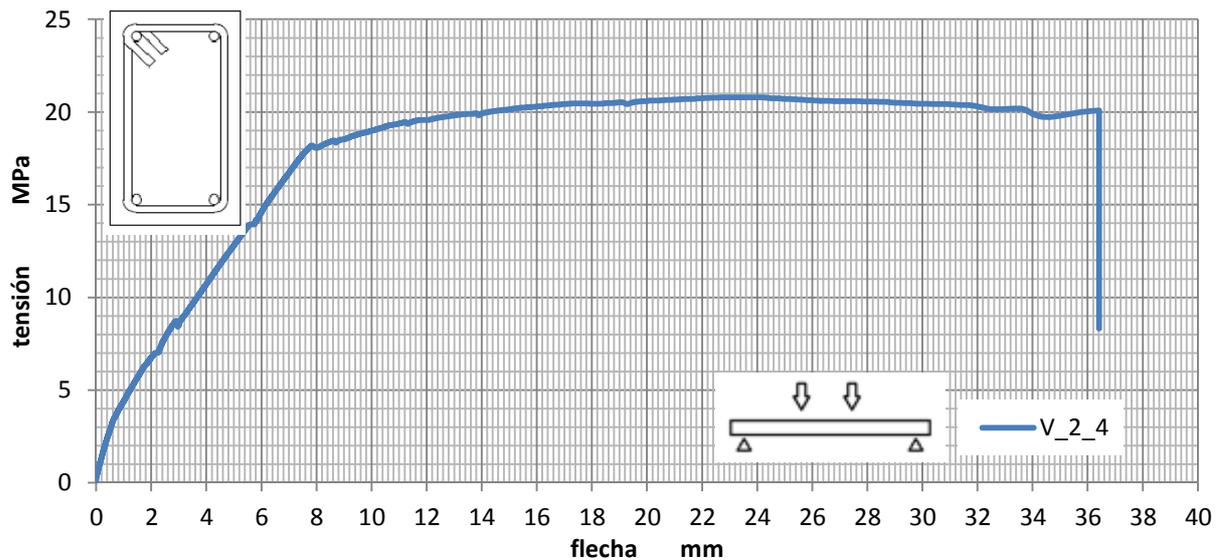
Flecha en Tensión máxima: 21,476 mm



Fotografías 84 y 85.- Rotura viga

#### 4) V\_2\_4. 1/2 Viga patrón + 12,4 kg/m<sup>3</sup>.

La viga V\_2\_4 es la viga que contiene 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras, la diferencia en esta viga reside en que el armado longitudinal inferior de la viga es la mitad que el de la viga patrón por lo tanto observaremos que la resistencia final será inferior a las que llevan 4Ø8 y podremos darnos cuenta de cómo influye la cantidad de acero en las zonas traccionadas en la resistencia final del hormigón armado.



Viga V\_2\_4 Ensayo a flexión a 28 días. 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Arm sup: 2Ø8; Arm inf: 2Ø8.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

Fuerza máxima: 29,45 kN

Tensión máxima: 20,78 MPa

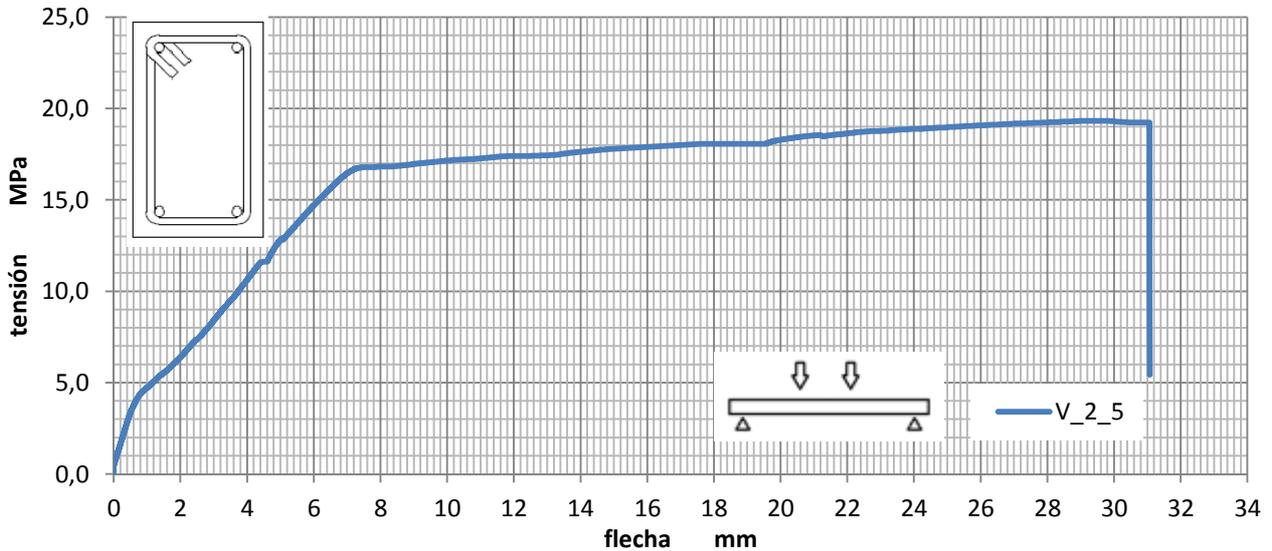
Flecha en Tensión máxima: 24,012 mm



Fotografías 86 y 87.- Rotura viga

### 5) V\_2\_5. 1/2 Viga patrón + 6,2 kg/m<sup>3</sup>.

La viga V\_2\_5 es la viga que contiene 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras, esta viga también tiene la mitad del armado longitudinal inferior de la viga patrón por lo tanto observaremos que la resistencia final será inferior a su análoga de 4Ø8 que se trata de la viga V\_2\_3.



Viga V\_2\_5 Ensayo a flexión a 28 días. 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Arm sup: 2Ø8; Arm inf: 2Ø8.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

Fuerza máxima: 27,37 kN

Tensión máxima: 19,32 MPa

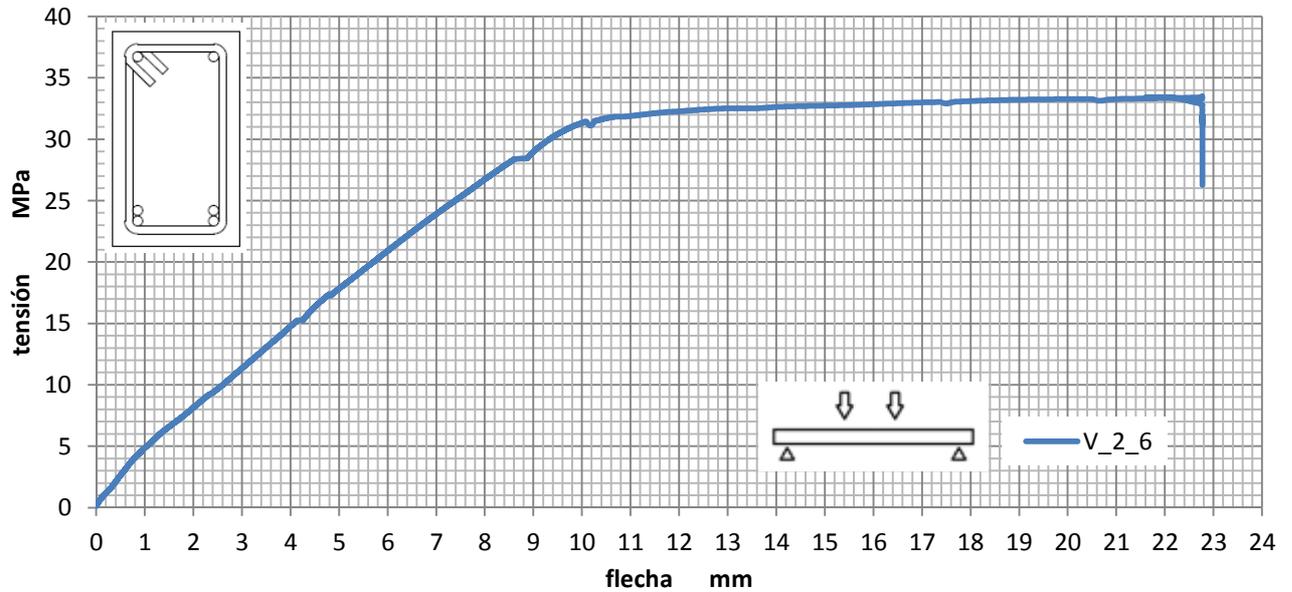
Flecha en Tensión máxima: 29,778 mm



Fotografías 88, 89 y 90.- Rotura viga

## 6) V\_2\_6. Viga patrón + 9 kg/m<sup>3</sup>.

La viga V\_2\_6 es la viga que contiene 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras, tiene el mismo armado que la viga patrón por lo tanto veremos muy bien el efecto que las fibras le confieren al hormigón, y la compararemos con la viga V\_2\_2 y la viga V\_2\_3, las cuales tienen una densidad superior e inferior, respectivamente.



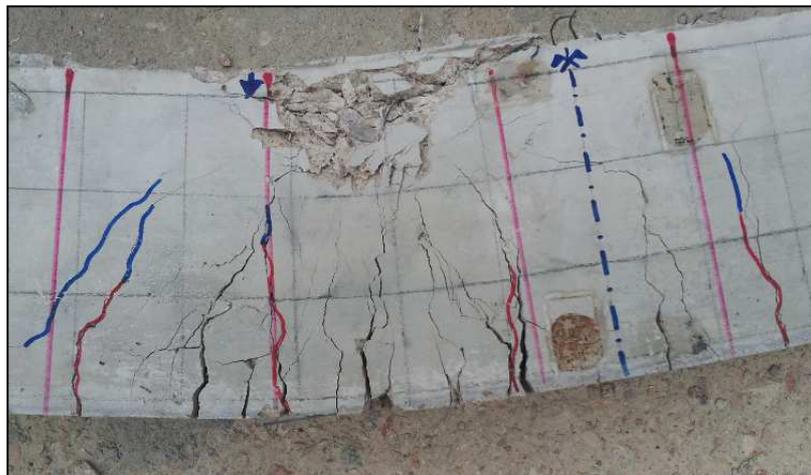
Viga V\_2\_6 Ensayo a flexión a 28 días. 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Arm sup: 2Ø8; Arm inf: 4Ø8.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

Fuerza máxima: 47,44 kN

Tensión máxima: 33,48 MPa

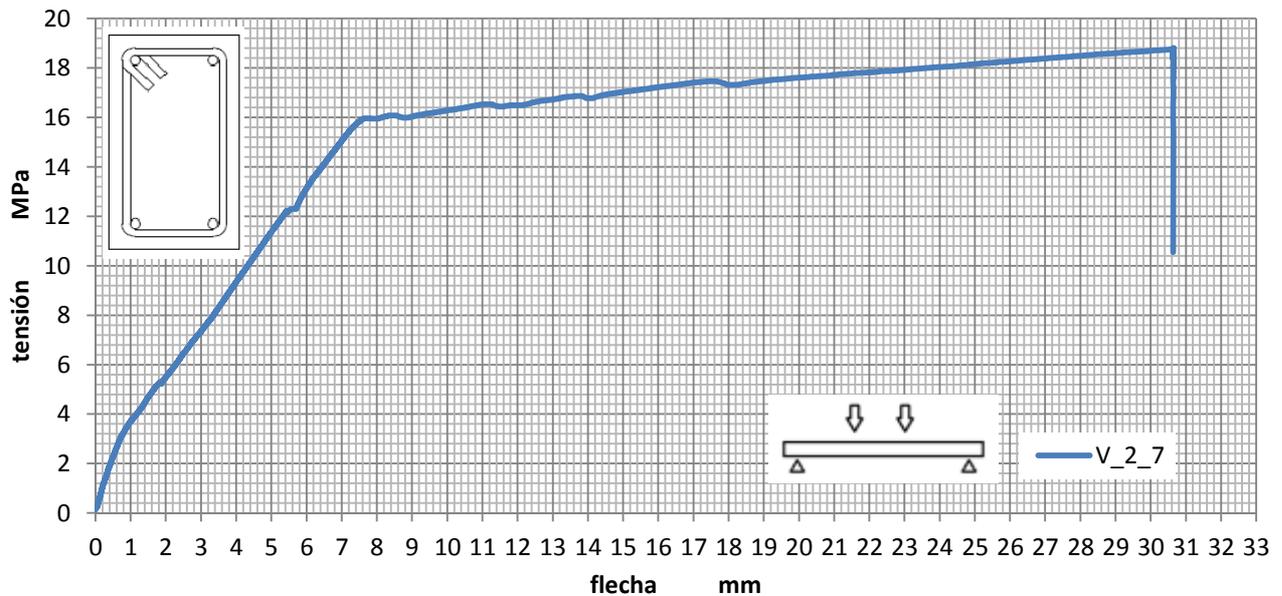
Flecha en Tensión máxima: 22,769 mm



Fotografía 91.- Rotura viga

### 7) V\_2\_7. 1/2 Viga patrón + 9 kg/m<sup>3</sup>.

La viga V\_2\_7 es la viga que contiene 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras, tiene la mitad de armado que la viga patrón por lo tanto la compararemos con la viga V\_2\_4 y la viga V\_2\_5, las cuales tienen una densidad de fibras superior e inferior y el mismo armado longitudinal inferior.



Viga V\_2\_7 Ensayo a flexión a 28 días. 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Arm sup: 2Ø8; Arm inf: 2Ø8.

Los datos que hemos obtenido para estas dos probetas son los siguientes:

Fuerza máxima: 26,63 kN

Tensión máxima: 18,979 MPa

Flecha en Tensión máxima: 30,643 mm



Fotografías 92 y 93.- Rotura viga

## 5.4.- Ensayo de las armaduras

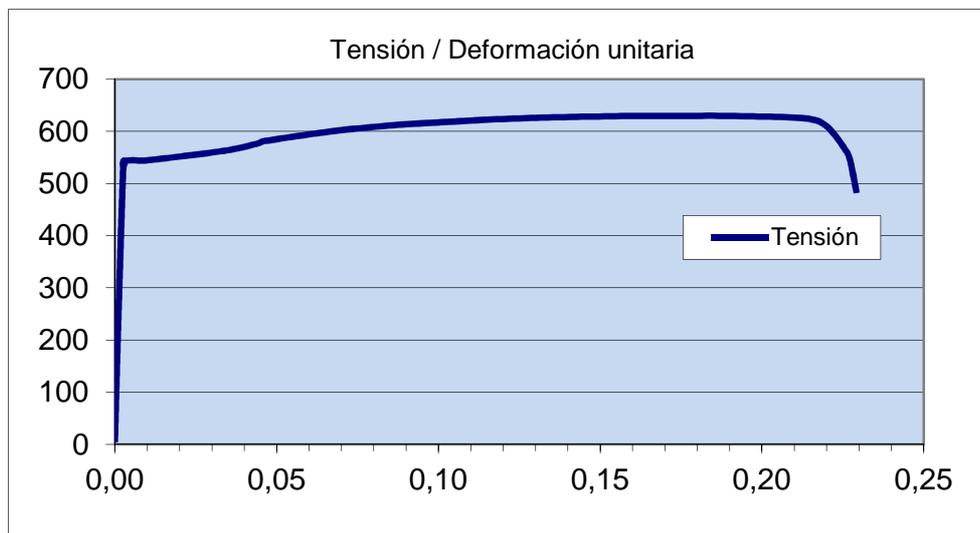
Por motivos ajenos a nosotros, los captadores de la máquina del laboratorio que controlan la deformación de los ensayos de las barras de acero, estaban estropeados por lo que los ensayos nos salieron defectuosos. De las 5 barras solo obtuvimos resultados satisfactorios de 2 barras. Una barra de ellas es de diámetro 8 mm y la otra de diámetro 6 mm.

A continuación vamos a exponer los resultados del ensayo de la barra del 8:

### RESISTENCIA - DUCTILIDAD Valores medidos Valores límites

Límite elástico Re fy	<b>Re fy</b> <u>541,9</u> MPa	<b>Re fy</b> ≥ 500 MPa
Carga unitaria de rotura Rm fs	<b>Rm fs</b> <u>629,8</u> MPa	<b>Rm fs</b> ≥ 575 MPa
Relación fs/fy en ensayo	<b>fs/fy</b> <u>1,16</u>	<b>fs/fy</b> . 1,15 a 1,35
Relación fy <sub>real</sub> /fy <sub>nominal</sub>	<b>fy<sub>real</sub>/fy<sub>nominal</sub></b> $\frac{541,9}{500} = \underline{1,08}$	<b>fy<sub>real</sub>/fy<sub>nominal</sub></b> 1 a 1,25
Alargamiento en rotura A εu5	<b>A εu5</b> $\frac{49,2-40}{40} \times 100 = \underline{23\%}$	<b>A εu5</b> ≥ 16 %
Alargamiento bajo carga máx	<b>Agt εmax</b> $\frac{173,5-160}{160} \times 100 = \underline{8,8\%}$	<b>Agt εmax</b> ≥ 7,5 %

¿Cumple? SI



Módulo de elasticidad (E) = 203177 MPa

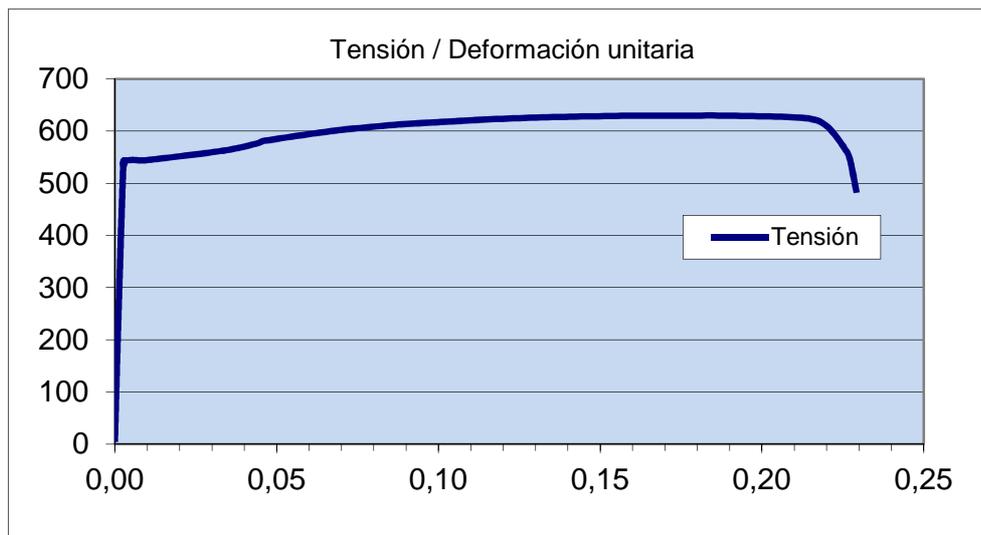
Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

Los resultados del ensayo de la barra del 6 són:

**RESISTENCIA - DUCTILIDAD** Valores medidos Valores límites

Límite elástico Re fy	<b>Re fy</b> <u>542,8</u> MPa	<b>Re fy</b> ≥ 500 MPa
Carga unitaria de rotura Rm fs	<b>Rm fs</b> <u>634,6</u> MPa	<b>Rm fs</b> ≥ 575 MPa
Relación fs/fy en ensayo	<b>fs/fy</b> <u>1,17</u>	<b>fs/fy</b> . 1,15 a 1,35
Relación fy <sub>real</sub> /fy <sub>nominal</sub>	<b>fy<sub>real</sub>/fy<sub>nominal</sub></b> $\frac{542,8}{500} = \underline{1,08}$	<b>fy<sub>real</sub>/fy<sub>nominal</sub></b> 1 a 1,25
Alargamiento en rotura A εu5	<b>A εu5</b> $\frac{36,3-30}{30} \times 100 = \underline{21\%}$	<b>A εu5</b> ≥ 16 %
Alargamiento bajo carga máx	<b>Agt εmax</b> $\frac{138,3-120}{120} \times 100 = \underline{15\%}$	<b>Agt εmax</b> ≥ 7,5 %

¿Cumple? SI



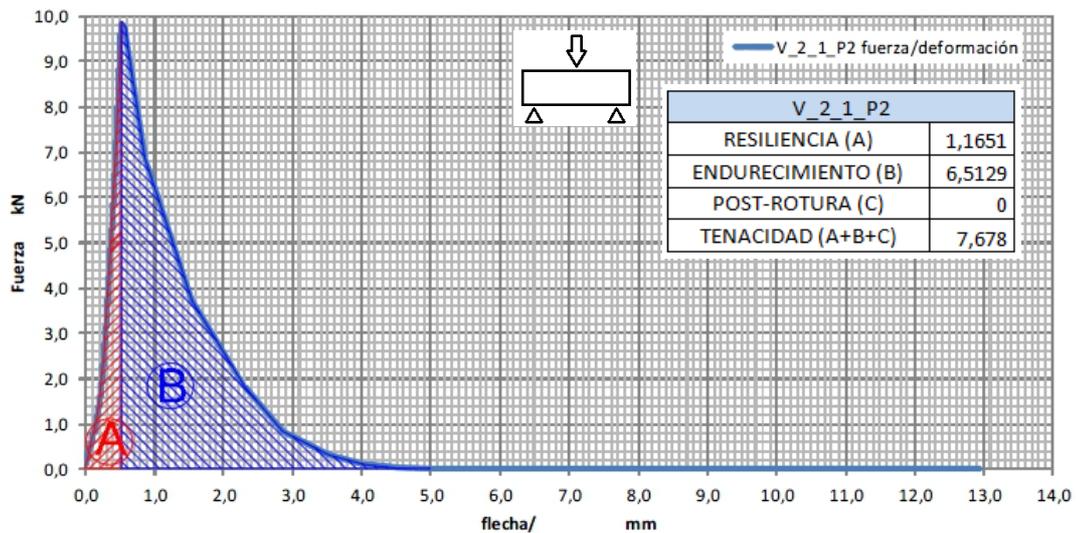
Módulo de elasticidad (E) = 206351 MPa

## 5.5.- Análisis de la tenacidad

### 5.5.1.- Tenacidad en las probetas

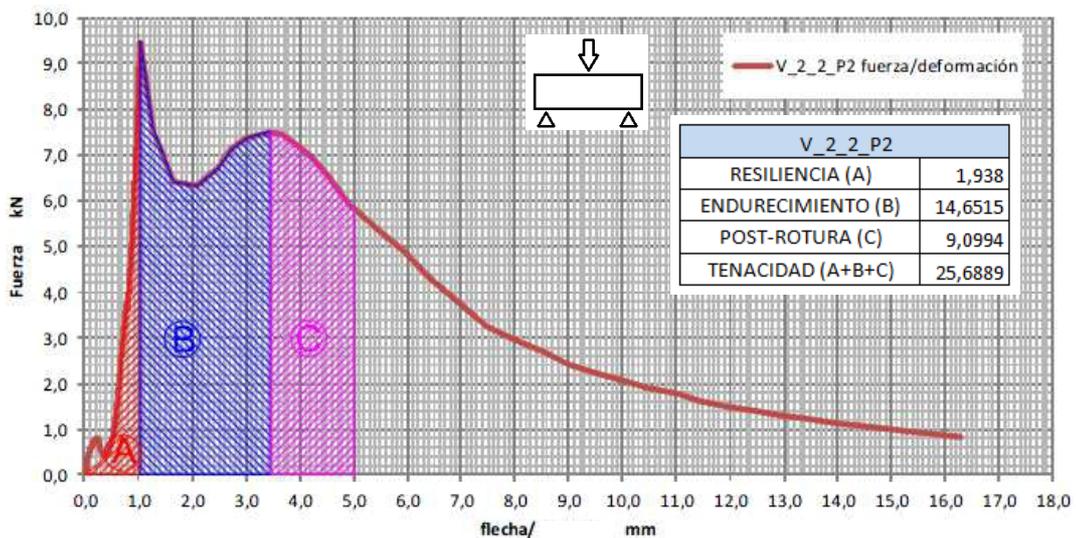
A continuación vamos a proceder a mostrar los resultados obtenidos en las probetas prismáticas. Hemos analizado únicamente la probeta más tenaz.

#### 1) V\_2\_1\_P2. Hormigón patrón.



Probeta prismática V\_2\_1-P2 ensayada a flexión a 28 días. 0 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

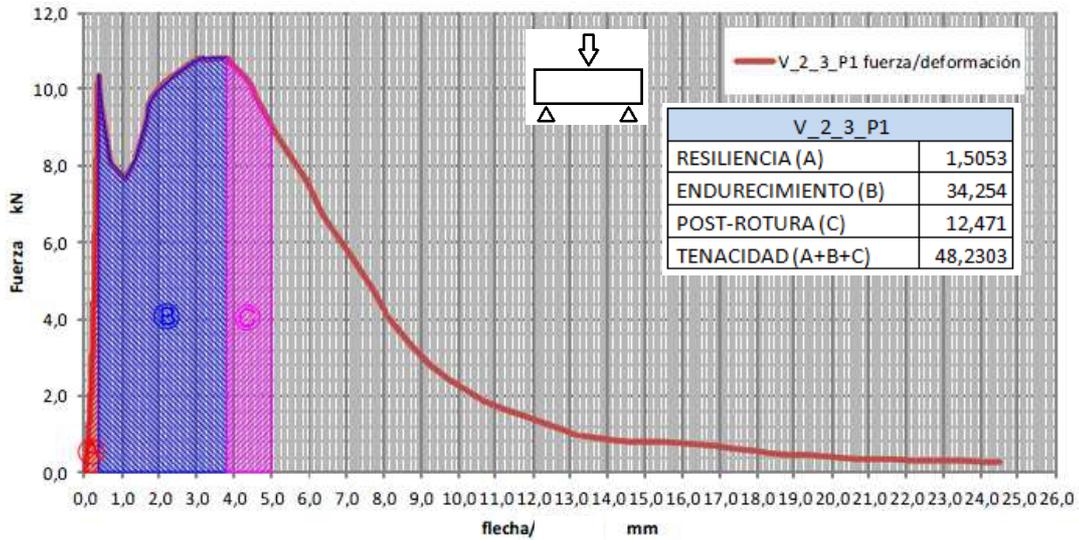
#### 2) V\_2\_2\_P2. Hormigón patrón + 12,4 kg/m<sup>3</sup>.



Probeta prismática V\_2\_2-P2 ensayada a flexión a 28 días. 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

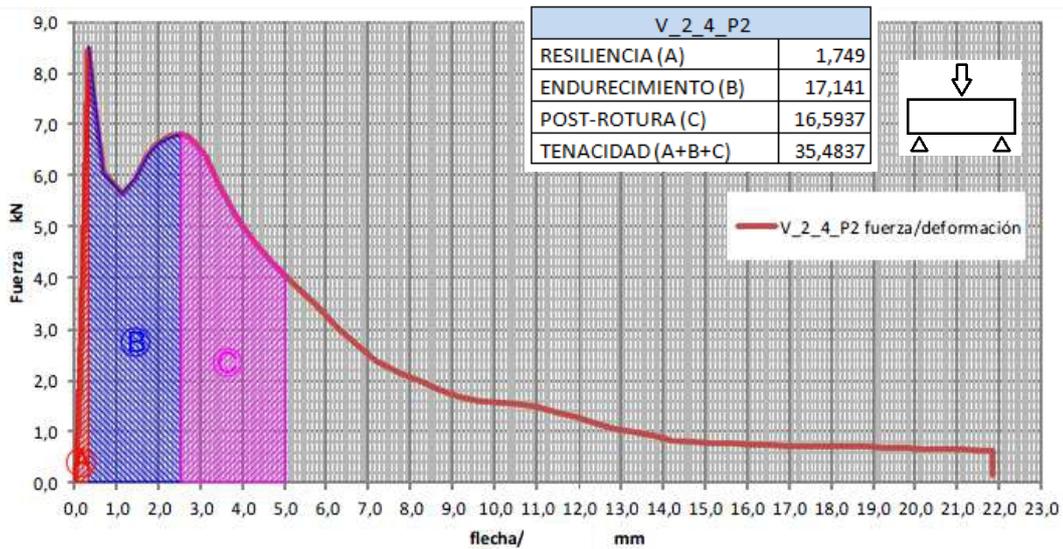
Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

3) V\_2\_3-P1. Hormigón patrón + 6,2 kg/m<sup>3</sup>.



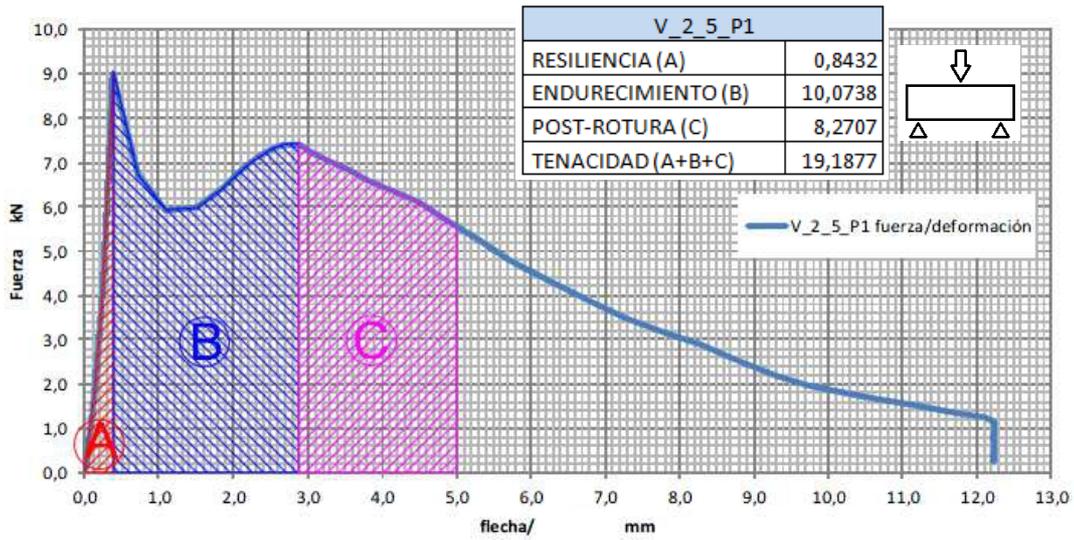
Probeta prismática V\_2\_3-P1 ensayada a flexión a 28 días. 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

4) V\_2\_4-P2. 1/2 Hormigón patrón + 12,4 kg/m<sup>3</sup>.



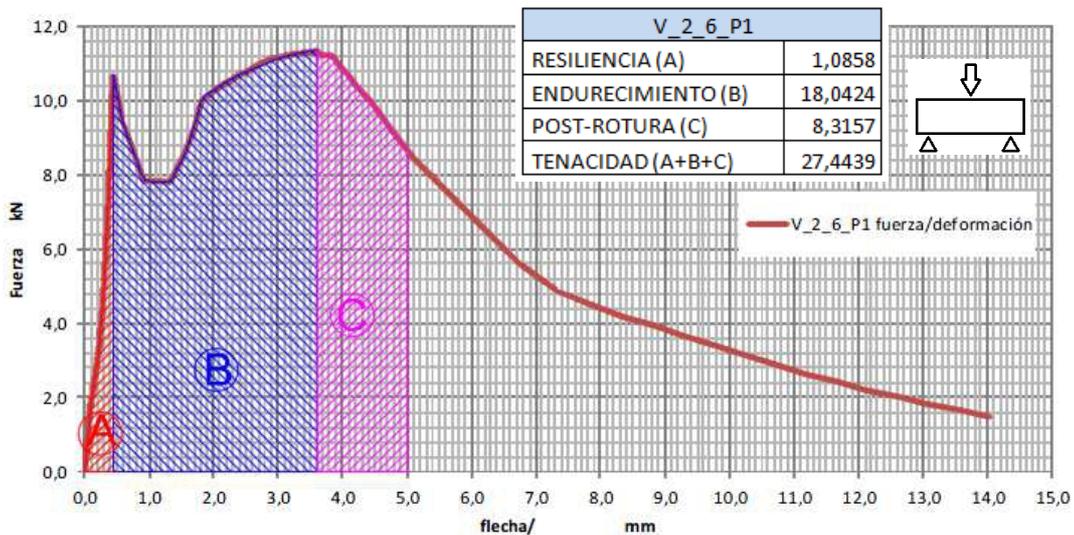
Probeta prismática V\_2\_4-P2 ensayada a flexión a 28 días. 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

5) V\_2\_5-P1. 1/2 Hormigón patrón + 6,2 kg/m<sup>3</sup>.



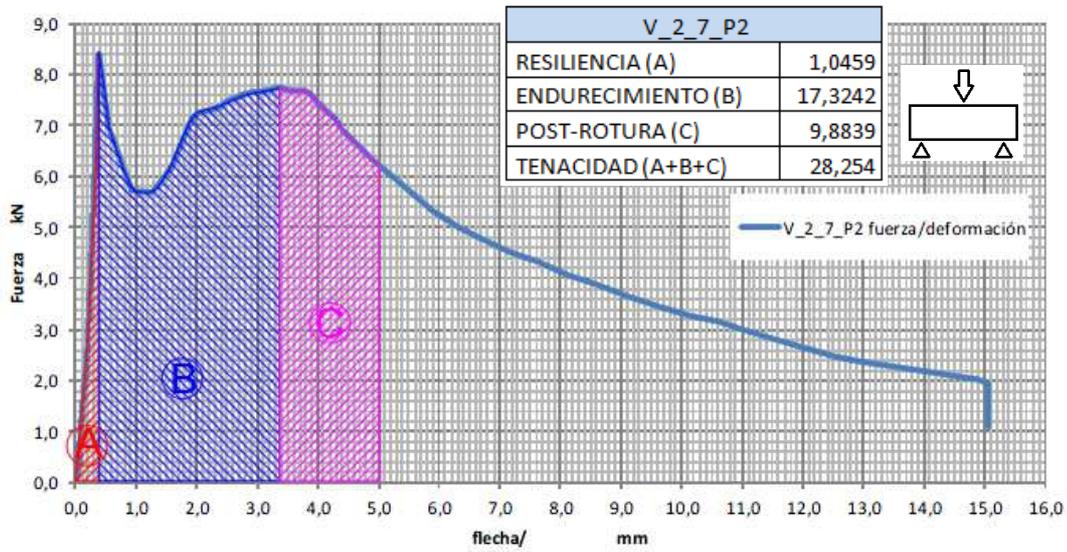
Probeta prismática V\_2\_5-P1 ensayada a flexión a 28 días. 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

6) V\_2\_6-P1. Hormigón patrón + 9 kg/m<sup>3</sup>.



Probeta prismática V\_2\_6-P1 ensayada a flexión a 28 días. 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

7) V\_2\_7-P2. 1/2 Hormigón patrón + 9 kg/m<sup>3</sup>.



Probeta prismática V\_2\_7-P2 ensayada a flexión a 28 días. 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

A continuación se muestra una tabla resumen donde se hace un comparativo de los valores de resiliencia, endurecimiento y post-rotura, así como la tenacidad de cada una de las gráficas realizadas.

PROBETAS PRISMÁTICAS	GRÁFICAS FUERZA/DEFORMACIÓN			
	RESILIENCIA (A) EN JULIOS	ENDURECIMIENTO (B) EN JULIOS	POST-ROTURA (C) EN JULIOS	TENACIDAD (A+B+C) EN JULIOS
V_2_1_P2	1,1651	6,5129	0	7,678
V_2_2_P2	1,938	14,6515	9,0994	25,6889
V_2_3_P1	1,5053	34,254	12,471	48,2303
V_2_4_P2	1,749	17,141	16,5937	35,4837
V_2_5_P1	0,8432	10,0738	8,2707	19,1877
V_2_6_P1	1,0858	18,0424	8,3157	27,4439
V_2_7_P2	1,0459	17,3242	9,8839	82,1153

Tabla 17.- Comparativa resultados tenacidades probetas prismáticas

**Resiliencia:** Calidad de un material para absorber energía de deformación por unidad de volumen mientras la deformación del material sea en la zona elástica.

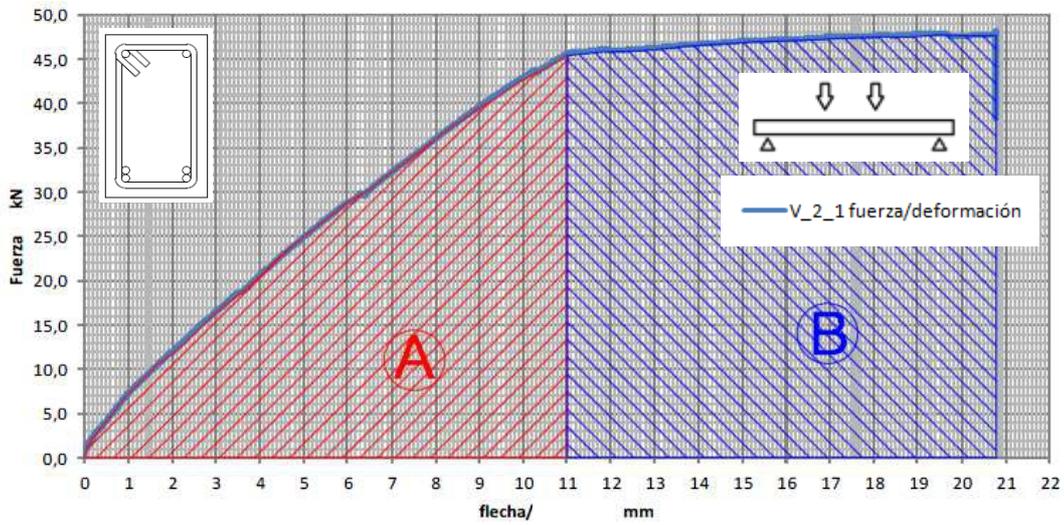
**Endurecimiento:** Tramo en la que la matriz cementicia ha roto y entran en acción las fibras poliméricas.

**Post-rotura:** Tramo en la que la fibra rompe.

**Tenacidad:** es la energía total que absorbe un material antes de alcanzar la rotura.

### 5.5.2.- Tenacidad en las vigas

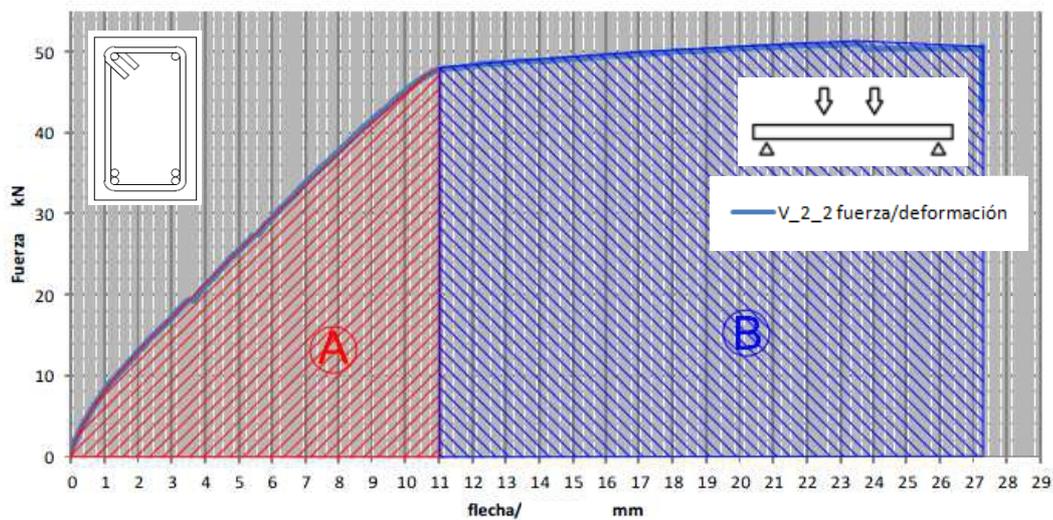
#### 1) V\_2\_1. Viga patrón.



Viga V\_2\_1 ensayada a flexión a 28 días. 0 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

V_2_1	
RESILIENCIA (A)	59,3824
ENDURECIMIENTO (B)	95,9856
TENACIDAD (A+B)	155,368

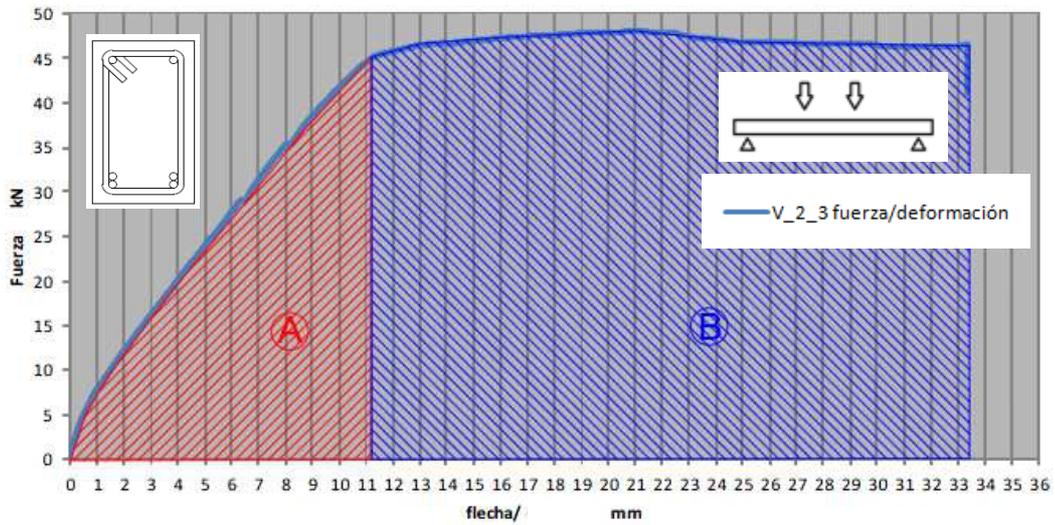
#### 2) V\_2\_2. Viga patrón + 12,4 kg/m<sup>3</sup>.



Viga V\_2\_2 ensayada a flexión a 28 días. 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

V_2_2	
RESILIENCIA (A)	75,1344
ENDURECIMIENTO (B)	204,8758
TENACIDAD (A+B)	280,0102

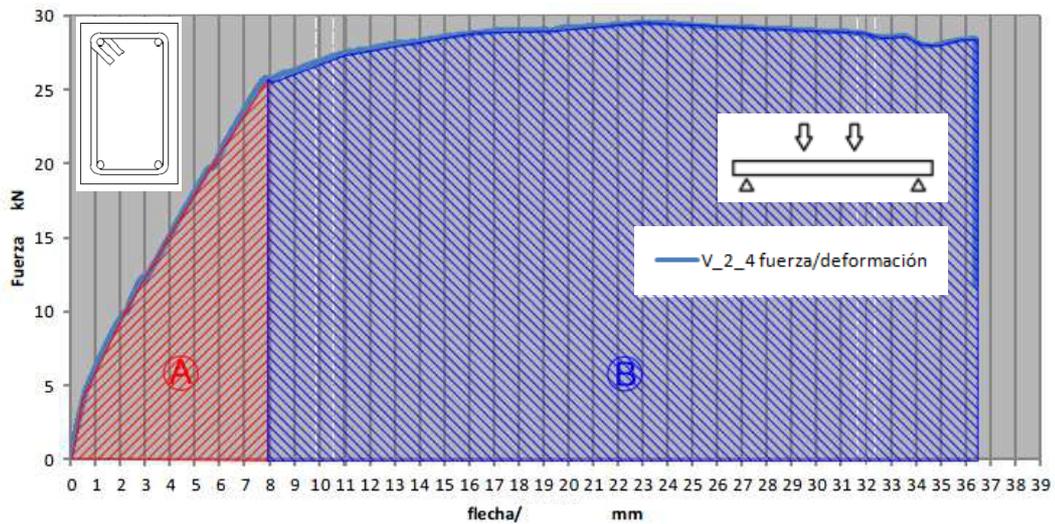
3) V\_2\_3. Viga patrón + 6,2 kg/m<sup>3</sup>.



Viga V\_2\_3 ensayada a flexión a 28 días. 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

V_2_3	
RESILIENCIA (A)	98,145
ENDURECIMIENTO (B)	359,955
TENACIDAD (A+B)	458,1

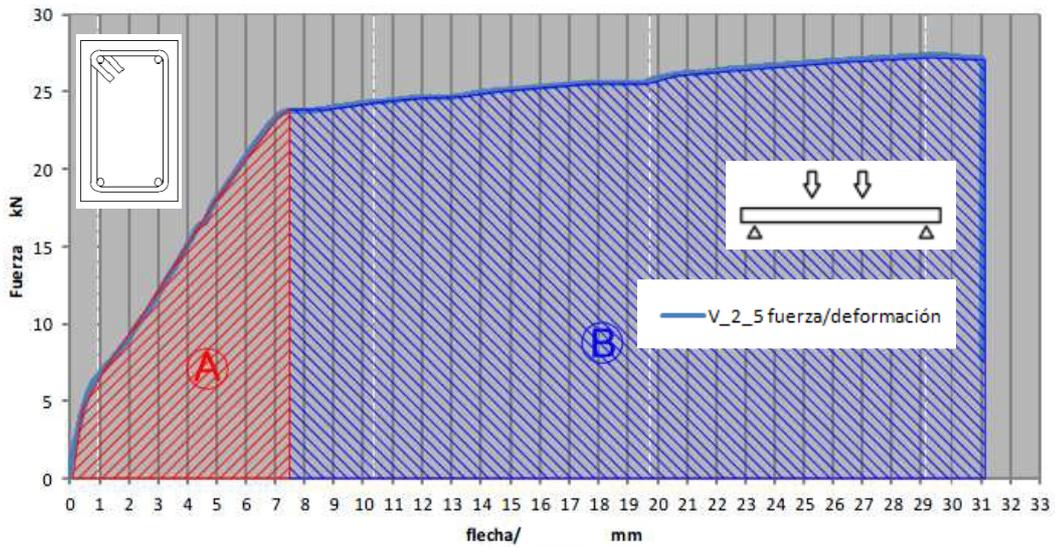
4) V\_2\_4. 1/2 Viga patrón + 12,4 kg/m<sup>3</sup>.



Viga V\_2\_4 ensayada a flexión a 28 días. 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

V_2_4	
RESILIENCIA (A)	71,1893
ENDURECIMIENTO (B)	508,9832
TENACIDAD (A+B)	580,1725

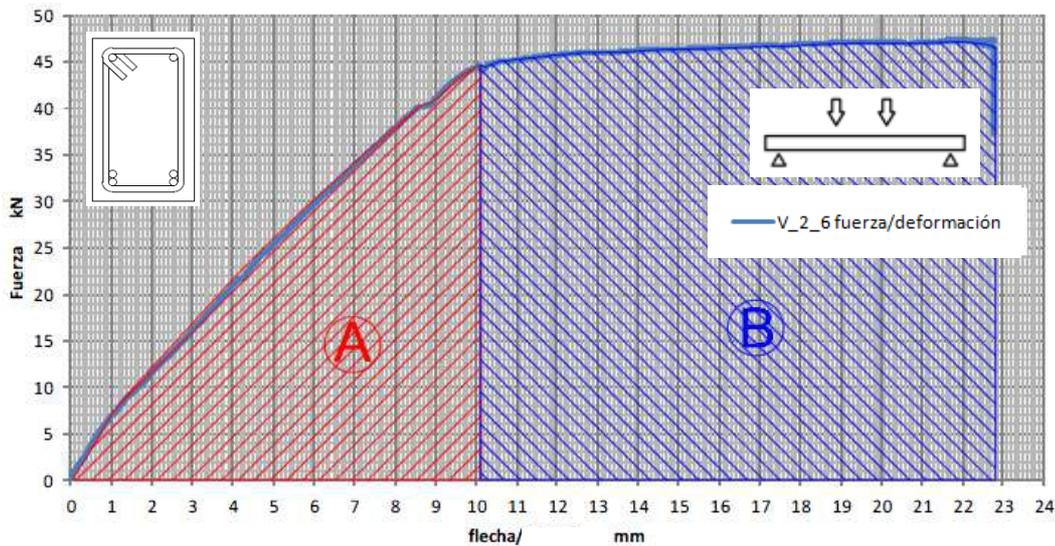
5) V\_2\_5. 1/2 Viga patrón + 6,2 kg/m<sup>3</sup>.



Viga V\_2\_5 ensayada a flexión a 28 días. 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

V_2_5	
RESILIENCIA (A)	51,7532
ENDURECIMIENTO (B)	307,628
TENACIDAD (A+B)	359,3812

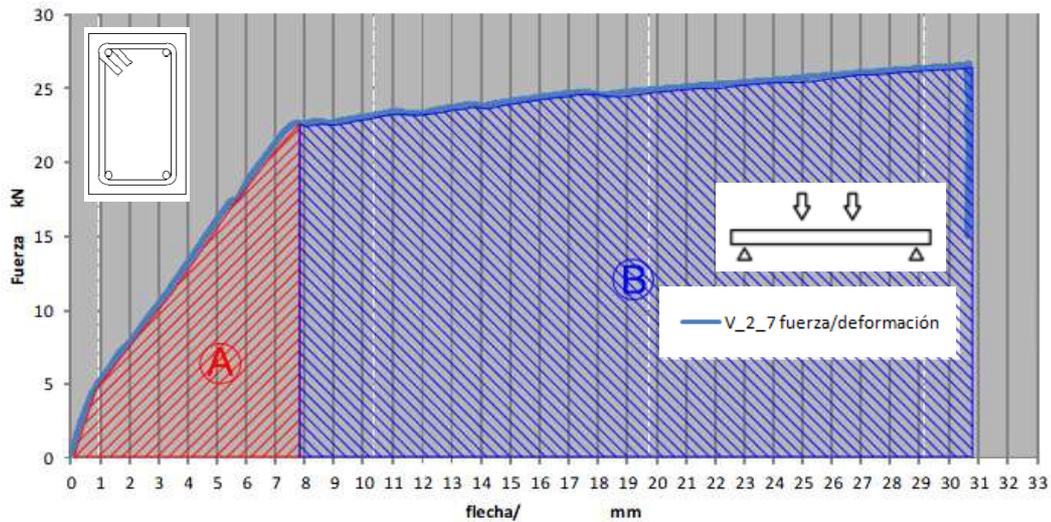
6) V\_2\_6. Viga patrón + 9 kg/m<sup>3</sup>.



Viga V\_2\_6 ensayada a flexión a 28 días. 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

V_2_6	
RESILIENCIA (A)	54,0127
ENDURECIMIENTO (B)	128,8671
TENACIDAD (A+B)	182,8798

### 7) V\_2\_7. 1/2 Viga patrón + 9 kg/m<sup>3</sup>.



Viga V\_2\_7 ensayada a flexión a 28 días. 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras pol. Cálculo tenacidad.

V_2_7	
RESILIENCIA (A)	48,8788
ENDURECIMIENTO (B)	285,0087
TENACIDAD (A+B)	333,8875

A continuación se muestra una tabla resumen donde se hace un comparativo de los valores de resiliencia, endurecimiento y post-rotura, así como la tenacidad de cada una de las gráficas realizadas.

VIGAS	GRÁFICAS FUERZA/DEFORMACIÓN		
	RESILIENCIA (A) EN JULIOS	ENDURECIMIENTO (B) EN JULIOS	TENACIDAD (A+B) EN JULIOS
V_2_1	59,3824	95,9856	155,368
V_2_2	75,1344	204,8758	280,0102
V_2_3	98,145	359,955	458,1
V_2_4	71,1893	508,9832	580,1725
V_2_5	51,7532	307,628	359,3812
V_2_6	54,0127	128,8671	182,8798
V_2_7	48,8788	285,0087	333,8875

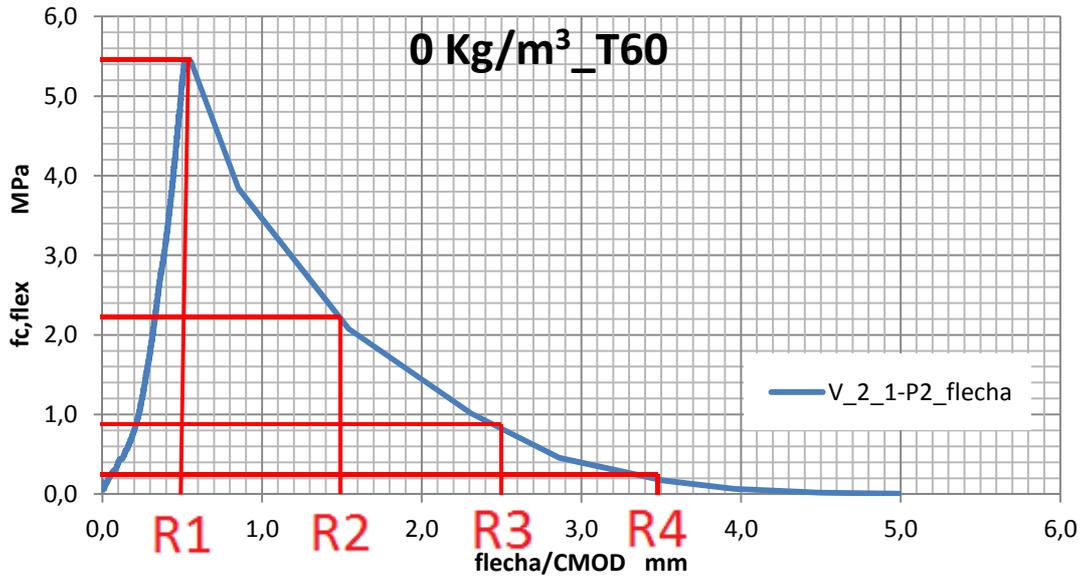
Tabla 18.- Comparativa resultados tenacidades vigas

**Resiliencia:** Calidad de un material para absorber energía de deformación por unidad de volumen mientras la deformación del material sea en la zona elástica.

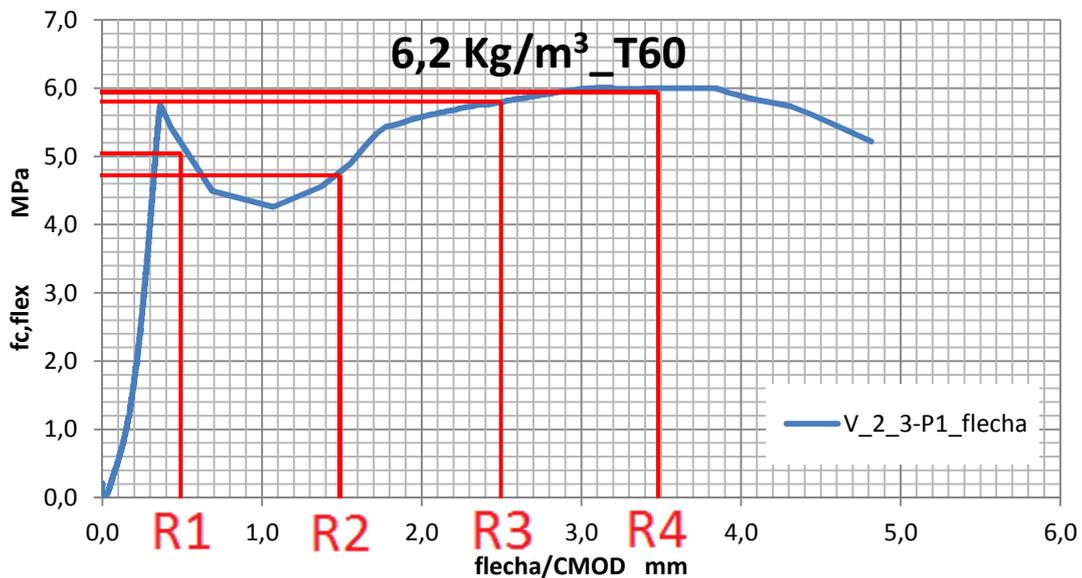
**Endurecimiento:** Tramo en la que la matriz cementicia ha roto y entran en acción las fibras poliméricas.

**Tenacidad:** es la energía total que absorbe un material antes de alcanzar la rotura.

5.6.- Análisis de la tensión residual.

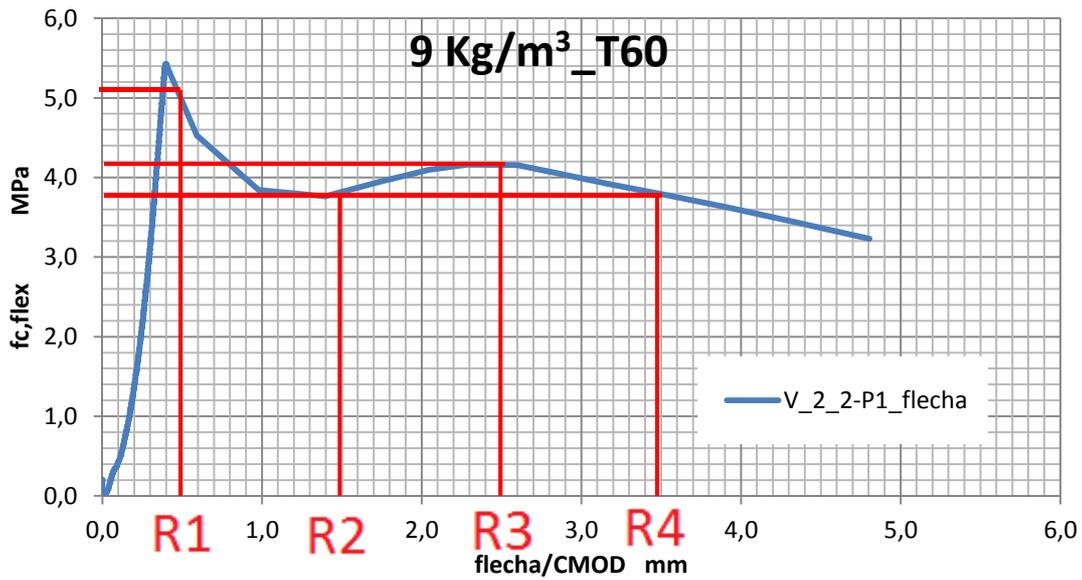


R1	$F_{c,flex}$ F1 COMD 0,5 mm	5,02
R2	$F_{c,flex}$ F2 COMD 1,5mm	2,20
R3	$F_{c,flex}$ F3 COMD 2,5 mm	0,84
R4	$F_{c,flex}$ F4 COMD 3,5 mm	0,18

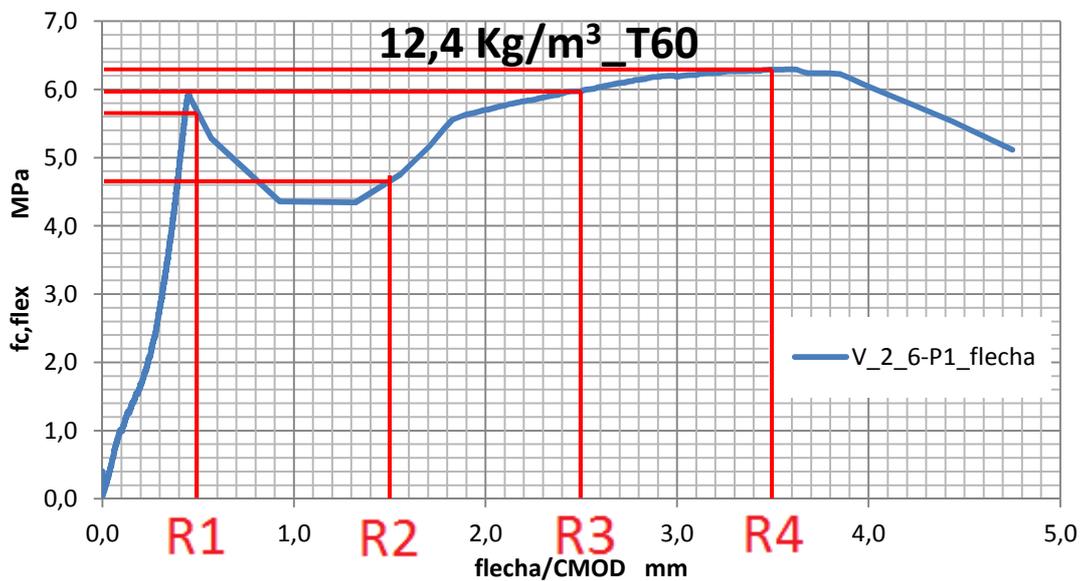


R1	$F_{c,flex}$ F1 COMD 0,5 mm	5,55
R2	$F_{c,flex}$ F2 COMD 1,5mm	4,81
R3	$F_{c,flex}$ F3 COMD 2,5 mm	5,81
R4	$F_{c,flex}$ F4 COMD 3,5 mm	6,02

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



R1	$F_{c,flex}$ F1 COMD 0,5 mm	5,64
R2	$F_{c,flex}$ F2 COMD 1,5mm	4,66
R3	$F_{c,flex}$ F3 COMD 2,5 mm	6,01
R4	$F_{c,flex}$ F4 COMD 3,5 mm	6,29

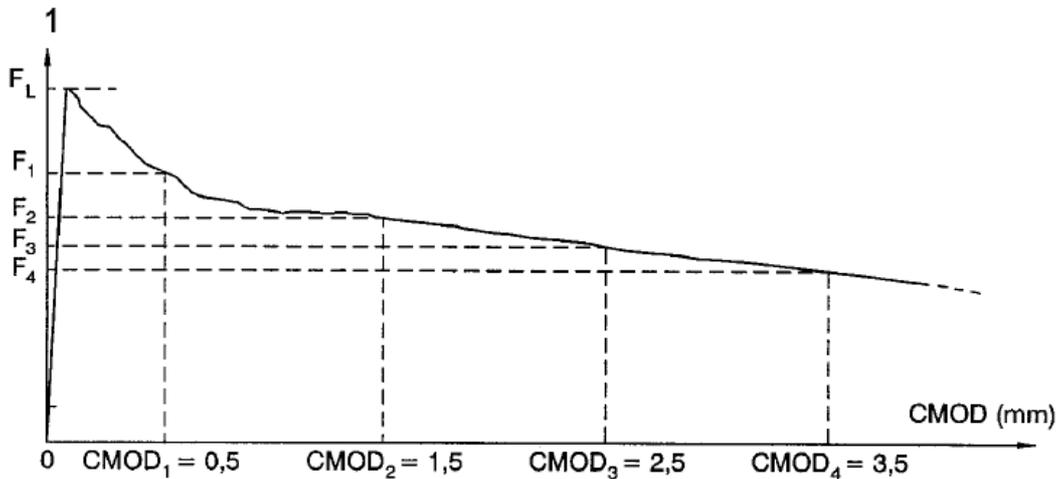


R1	$F_{c,flex}$ F1 COMD 0,5 mm	4,96
R2	$F_{c,flex}$ F2 COMD 1,5mm	3,83
R3	$F_{c,flex}$ F3 COMD 2,5 mm	4,17
R4	$F_{c,flex}$ F4 COMD 3,5 mm	3,79

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

Capacidades mecánicas del HACRF-P_ 0/6,2/9/12,4 kg/m3 fibra				
MPa	HACRF-P_0	HACRF-P_6,2	HACRF-P_9	HACRF-P_12,4
$F_{c\text{ cilíndrica}}$	10,10	10,65	9,83	10,93
$F_{c\text{ cubica}}$	40,16	44,76	41,86	43,81
$E_C$	3,90	4,40	3,90	4,10
$F_{c,\text{flex}}$	5,20	6,00	4,20	6,40
$F_{c,\text{flex Matriz}}$	5,20	5,80	5,50	6,00
$F_{I,\text{COMD } 0,05}$	0,26	0,10	0,46	0,23
$F_{c,\text{flex F1 COMD } 0,5\text{ mm}}$	5,02	5,55	5,64	4,96
$F_{c,\text{flex F2 COMD } 1,5\text{ mm}}$	2,20	4,81	4,66	3,83
$F_{c,\text{flex F3 COMD } 2,5\text{ mm}}$	0,84	5,81	6,01	4,17
$F_{c,\text{flex F4 COMD } 3,5\text{ mm}}$	0,18	6,02	6,29	3,79
$E_{\text{FLEX}}$	5,45	5,75	5,92	5,43
$T_{50\_segundos}$	3	10,5	5	16,4
$\text{Escurrimiento}_{\text{mm}}$	745	54,75	47,75	54,25

Tabla 19.- Capacidades mecánicas del HACRF-P con distintas densidades de fibras.



Esquema de la norma UNE-EN-14651=2007+A1=2008 de donde hemos hecho los esquemas anteriores



---

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

## 6.- Análisis de resultados

### 6.1.- Análisis de las capacidades mecánicas

### 6.2.- Análisis presupuestario

## 6.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1- Análisis de las capacidades mecánicas

En este apartado, hemos considerado que los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las vigas, realizar una comparación entre las vigas de la misma cantidad de fibras y compararlas siempre con la viga realizada con el modelo patrón, compuesta por una cantidad de armado inferior de  $4\phi 8\text{mm}$  y  $2\phi 8\text{mm}$  de armado superior; como armadura transversal  $\phi=6\text{mm}$  y un número de cercos totales por cada viga de  $18\phi$ , reforzando la sección de hormigón ante el esfuerzo cortante pero no a flexión.

Para concluir el análisis de las capacidades mecánicas, hemos considerado, que debemos realizar una comparación entre la rotura de todas las vigas en común, para ver su respuesta ante el esfuerzo de flexión y estudiar la respuesta de las fibras, del armado y del hormigón.

Dado que la tenacidad, que es la energía que absorbe el material antes de la rotura, es un dato que las fibras le confiere al material. Esto hace que se observe la deformada de la viga y en caso de colapso o fisuración facilite a la estructura un tiempo mayor de respuesta. En el análisis de los resultados de las propiedades mecánicas hemos considerado que este dato lo debemos comparar siempre con la viga patrón para ver que respuesta le confiere el uso de las fibras poliméricas y la adherencia con el hormigón.

Para el análisis de los resultados hemos realizado las siguientes fichas:

### Comparación viga patrón y viga reforzada con un contenido en fibras de 6,2 kg/m<sup>3</sup>.

En la primera comparación, realizada entre las vigas con un contenido de fibras de 6,2 kg/m<sup>3</sup>. Podemos observar que la tensión y la carga máxima que admite la sección de hormigón armado reforzado con fibras poliméricas es casi la misma que admite el material sin reforzarlo con fibras poliméricas.

En la viga con la mitad de armado, se puede observar que el punto de tensión máxima o carga máxima se reduce; pero se puede observar que en ambos casos, las vigas realizadas con hormigón reforzado con fibras poliméricas, la deformación (flecha) de la viga hasta el punto donde rompe es mucho mayor que la viga patrón, donde no existe ningún refuerzo de fibras poliméricas.

Tras la rotura de la viga se pudo observar que la viga patrón sufrió una rotura dúctil. La viga elaborada con un contenido de 6,2 Kg/m<sup>3</sup>, rompe con la misma tensión o carga que la viga patrón, solo que el hecho de incorporarle fibras le confiere mayor ductilidad a la viga, consiguiendo mayor deformación post-rotura de la pieza.

El contenido de 6,2 kg/m<sup>3</sup> de fibras poliméricas le confiere a la viga una deformada aproximadamente desde el 40% al 50% más que la viga patrón. Observando que la flecha máxima es de 21mm frente una flecha máxima antes de la rotura del conjunto reforzado con fibras poliméricas es de 31-33 mm, dependiendo si es con la mitad de armado o con el mismo armado que la viga patrón.

Se puede observar, también, que la 1/2 patrón al disminuir la cantidad de armadura, la rigidez de la viga es menor, el límite elástico y el punto de rotura de la pieza, aproximadamente es la mitad que la viga patrón o la patrón reforzada con 6,2 kg/m<sup>3</sup>; alcanzado una menor deformación en su campo plástico.

### Comparación viga patrón y viga reforzada con un contenido en fibras de 9 kg/m<sup>3</sup>.

En la comparación realizada entre las vigas con un contenido de fibras de 9 kg/m<sup>3</sup> y la patrón. Podemos observar que la tensión y la carga máxima que admite la sección de hormigón armado reforzado con fibras poliméricas es casi la misma que admite el material sin reforzarlo con fibras poliméricas.

En la viga con la mitad de armado, se puede observar que el punto de tensión máxima o carga máxima se reduce; pero se puede observar que en ambos casos, donde las vigas realizadas con hormigón reforzado con fibras poliméricas, la deformación (flecha) de la viga hasta el punto donde rompe el conjunto hormigón-fibras es mucho mayor que la viga patrón, donde no existe ningún refuerzo de fibras poliméricas. La viga patrón más 9 kg/m<sup>3</sup>, como observamos es ligeramente más rígida, como se puede apreciar en la pendiente de la recta de esta viga y de la patrón en su campo elástico.

Tras la rotura de la viga se pudo observar que la viga patrón sufrió una rotura dúctil. La viga elaborada con un contenido de 9 Kg/m<sup>3</sup>, rompe con la misma tensión o carga que la viga patrón, solo que el hecho de incorporarle fibras le confiere mayor ductilidad a la viga, consiguiendo mayor deformación post-rotura de la pieza.

El contenido de 9 kg/m<sup>3</sup> de fibras poliméricas le confiere a la viga una deformada aproximadamente entre un 10% y 40% más que la viga patrón. Observando que la flecha máxima es de 21mm frente una flecha máxima antes de la rotura del conjunto reforzado con fibras poliméricas es de 23-31 mm, dependiendo si es con la mitad de armado o con el mismo armado que la viga patrón.

En este caso se observa que la viga con la mitad de armadura absorbe el doble de energía hasta el punto de la rotura del conjunto, aunque la tensión y la carga máxima se reducen como ya hemos comentado anteriormente.

### Comparación viga patrón y viga reforzada con un contenido en fibras de 12,4 kg/m<sup>3</sup>.

En la comparación realizada entre las vigas con un contenido de fibras de 12,4 kg/m<sup>3</sup> y la patrón. Podemos observar que la tensión y la carga máxima que admite la sección de hormigón armado reforzado con fibras poliméricas es superior que la que admite el material sin reforzarlo con fibras poliméricas. La viga reforzada con 12,4 kg/m<sup>3</sup>, como se puede apreciar en la pendiente de la recta en su campo elástico, podemos decir que es más rígida, puesto que tiene mayor pendiente que la viga patrón.

En la viga con la mitad de armado, se puede observar que el punto de tensión máxima o carga máxima se reduce; pero se puede observar que en ambos casos, donde las vigas realizadas con hormigón reforzado con fibras poliméricas la absorción de energía hasta el punto donde rompe la viga es mucho mayor que la viga patrón donde no existe ningún refuerzo de fibras poliméricas, aproximadamente de cuatro a cinco veces superior.

Tras la rotura de la viga se pudo observar que la viga patrón sufrió una rotura dúctil. La viga elaborada con un contenido de 12,4 Kg/m<sup>3</sup>, rompe con mayor tensión o carga que la viga patrón, el hecho de incorporarle las fibras le confiere mayor ductilidad a la viga, consiguiendo mayor deformación post-rotura de la pieza.

El contenido de 12,4 kg/m<sup>3</sup> de fibras poliméricas le confiere a la viga una deformada aproximadamente entre el 40% y el 50% más que la viga patrón. Observando que la flecha máxima es de 21mm frente una flecha máxima antes de la rotura del conjunto reforzado con fibras poliméricas es de 27-37 mm, dependiendo si es con la mitad de armado o con el mismo armado que la viga patrón.

### Comparación en conjunto de todas las vigas realizadas.

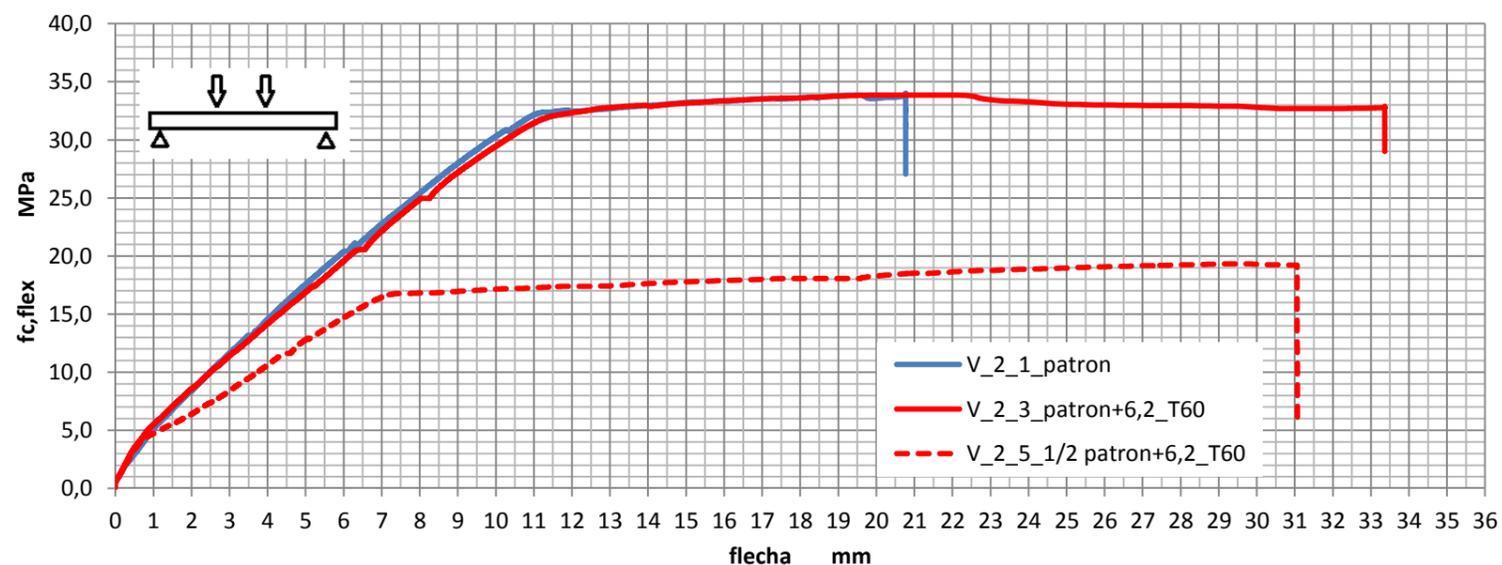
En esta comparación podemos observar que en general el límite elástico del hormigón confeccionado con fibras poliméricas es superior que la viga patrón. También, en general las fibras le confieren mayor rigidez a la viga, que las pendientes de las rectas de las vigas es mayor que la viga patrón.

También se observa que el hecho de la incorporación de fibras poliméricas confiere a la viga la capacidad mecánica de admitir más tensión o carga en la viga antes de su rotura. En el momento de la rotura se observa que las vigas realizadas con fibras poliméricas es superior la energía absorbida y la deformación máxima de las mismas.

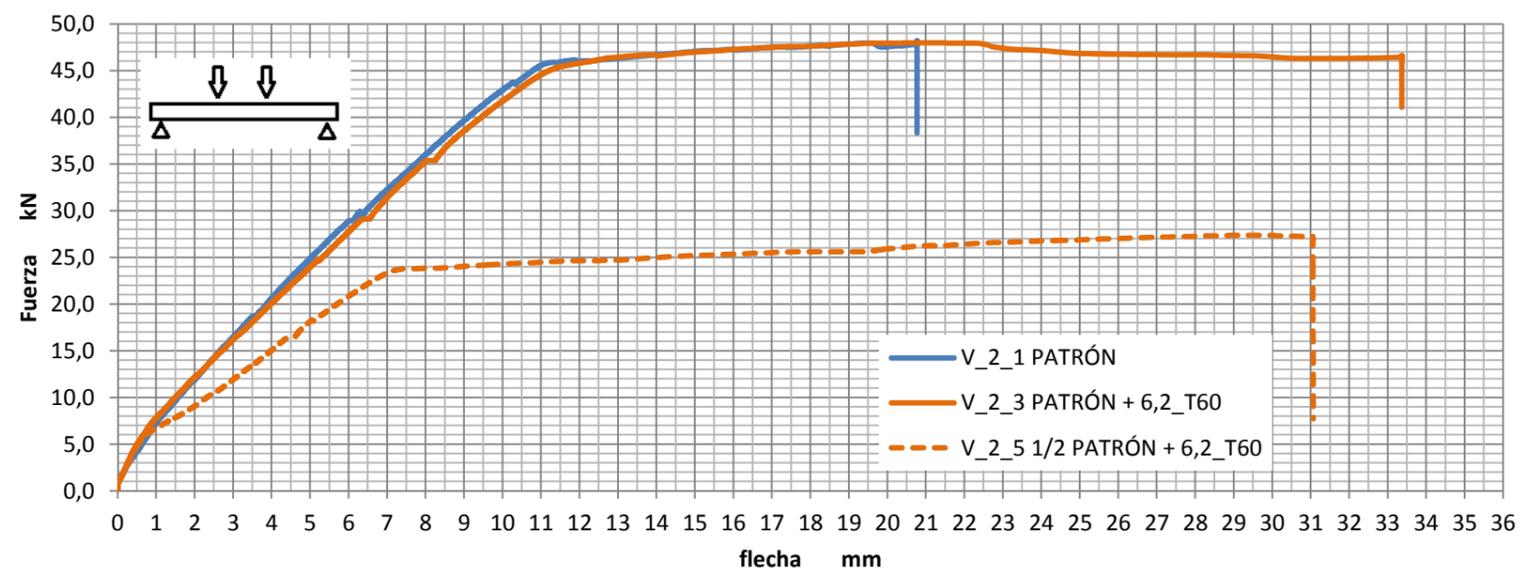
Las vigas con la mitad de armadura son menos rígidas que las vigas confeccionadas con la misma cantidad que la viga patrón. El límite elástico de las vigas con la mitad de armadura aproximadamente es la mitad que las vigas con la misma cantidad de armadura que la viga patrón y adquiere un poco menos de deformación hasta la rotura total del conjunto. Con la consiguiente mayor absorción de energía antes de su rotura.

En la gráfica se puede observar que a mayor contenido de fibras, mayor límite elástico de las vigas, la deformada hasta dicha rotura, la deformada total y la capacidad de soportar mayor carga es cada vez mayor. La deformada total varía desde un 10 hasta un 50% más. Aunque se observa que en las vigas con un contenido de fibras de  $9 \text{ kg/m}^3$  en estos datos es inferior. Esto puede estar causado por una mala distribución de las fibras en las vigas con dicho contenido de fibras o que en las vigas con una cantidad de  $6,2 \text{ kg/m}^3$  la adherencia fue perfecta y la distribución fue la deseada.

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



Gráfica Tensión/Deformación



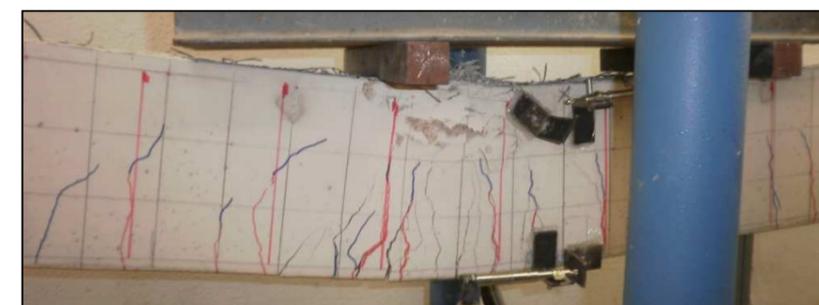
Gráfica Fuerza/Deformación

VIGAS	GRÁFICAS FUERZA/DEFORMACIÓN		
	RESILIENCIA (A)	ENDURECIMIENTO (B)	TENACIDAD (A+B)
V_2_1	59,3824	95,9856	155,368
V_2_3	98,145	359,955	458,1
V_2_5	51,7532	307,628	359,3812

PATRÓN { PATRÓN + 6,2 Kg/m<sup>3</sup>  
½ PATRÓN + 6,2 Kg/m<sup>3</sup>



Fotografía Viga patrón V\_2\_1

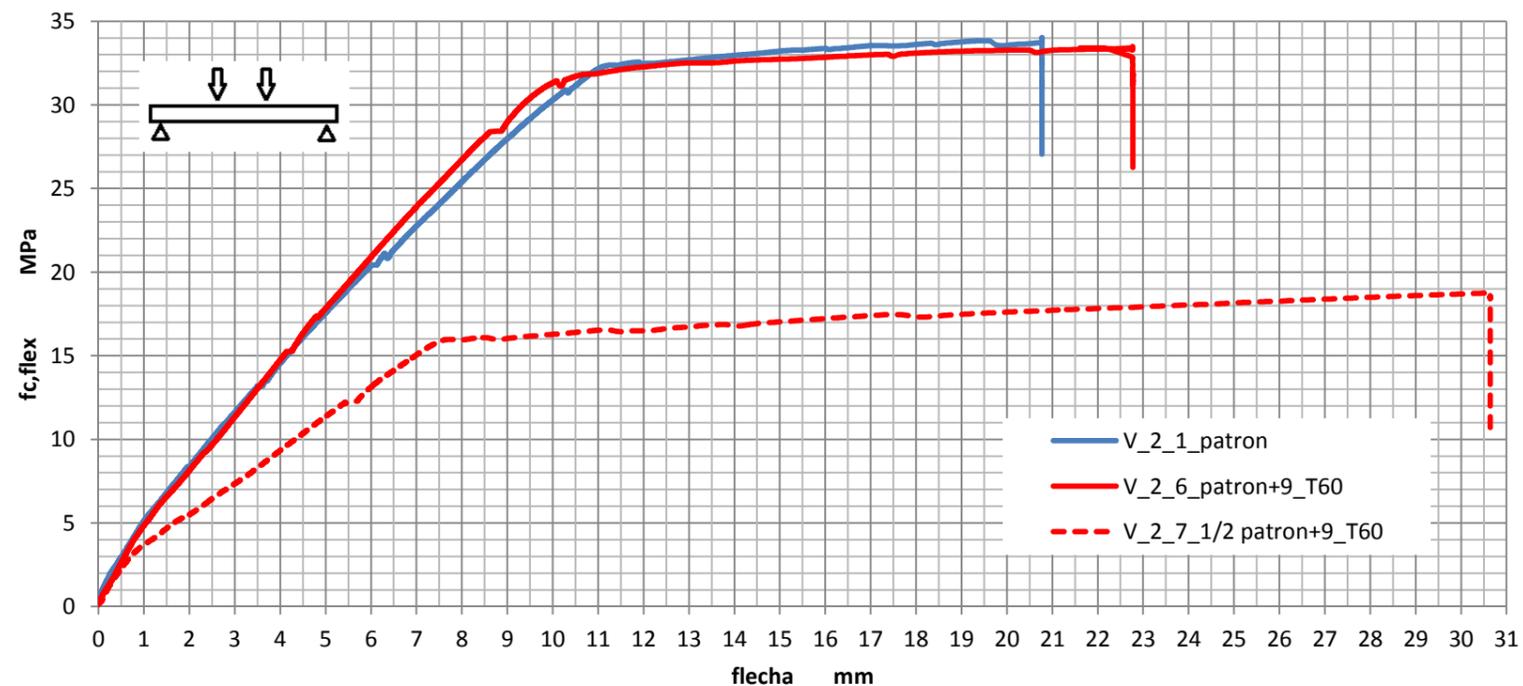


Fotografía Viga patrón+ 6,2 Kg/m<sup>3</sup> V\_2\_3

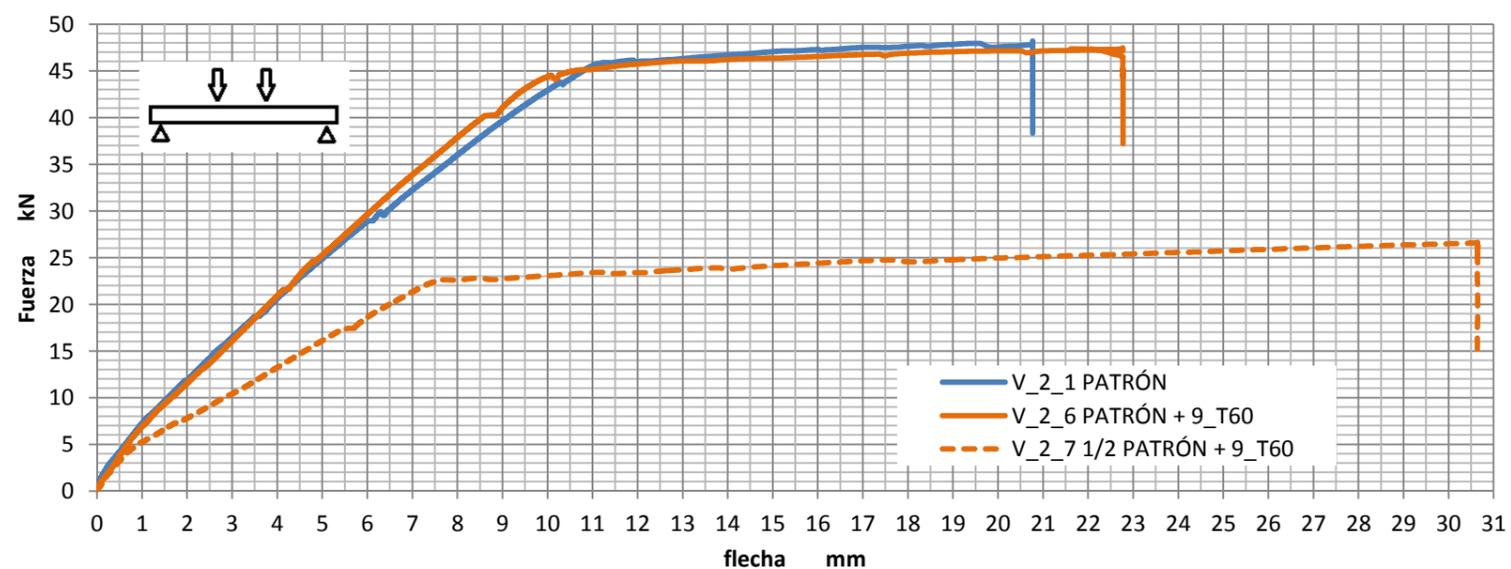


Fotografía Viga ½ patrón+ 6,2 Kg/m<sup>3</sup> V\_2\_3

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



Gráfica Tensión/Deformación



Gráfica Fuerza/Deformación

PATRÓN { PATRÓN + 9 Kg/m<sup>3</sup>  
½ PATRÓN + 9 Kg/m<sup>3</sup>



Fotografía Viga patrón V\_2\_1



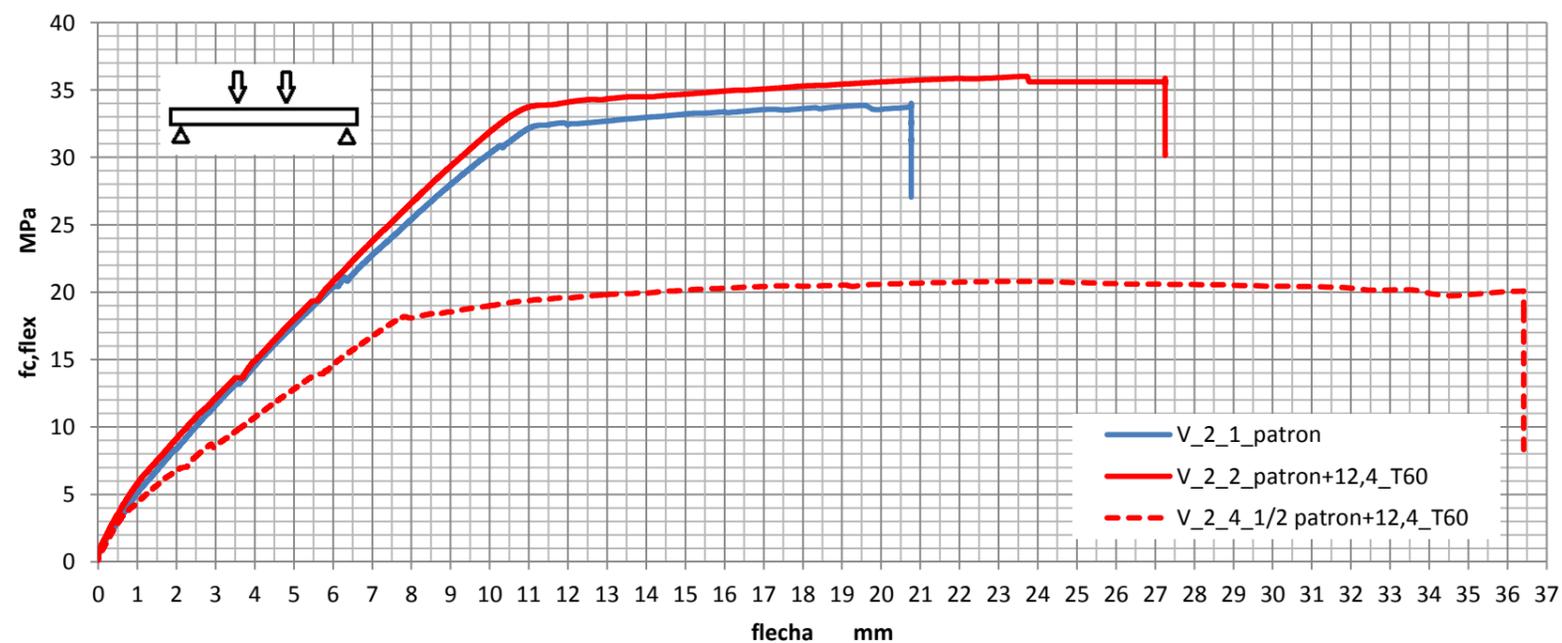
Fotografía Viga patrón+ 9 Kg/m<sup>3</sup> V\_2\_6



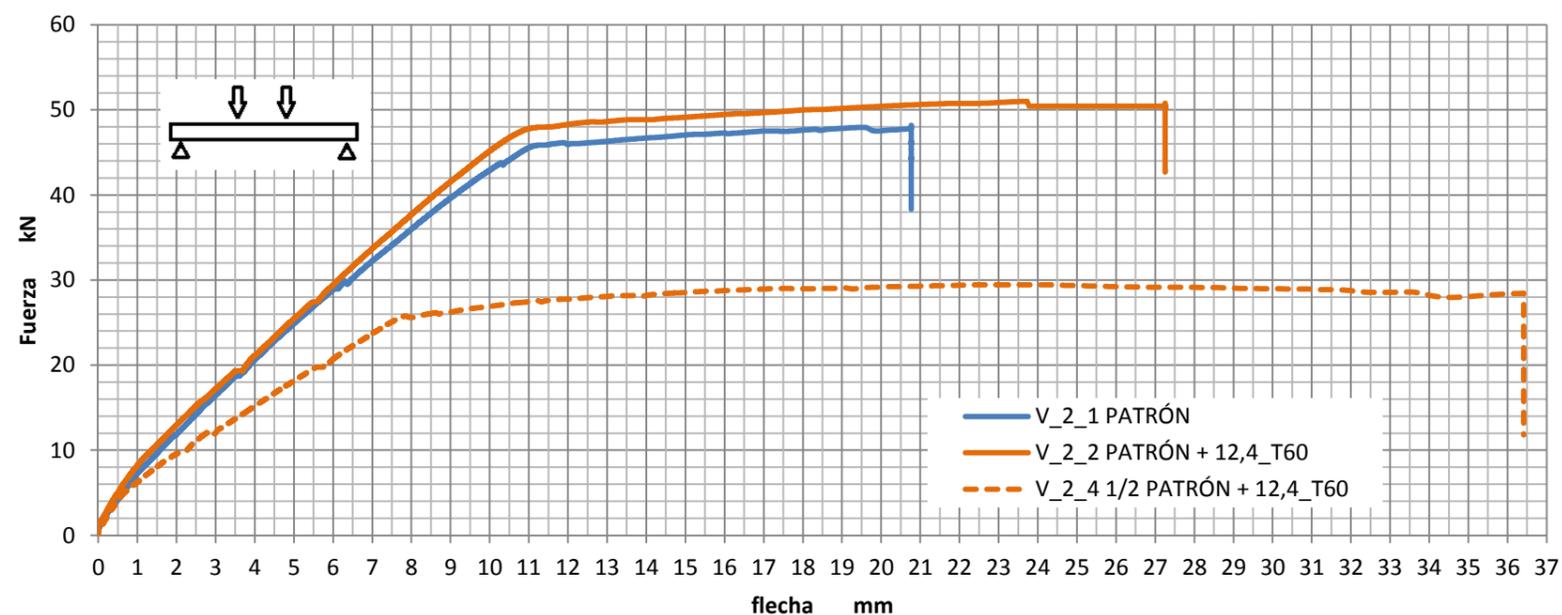
Fotografía Viga ½ patrón+ 9 Kg/m<sup>3</sup> V\_2\_7

VIGAS	GRÁFICAS FUERZA/DEFORMACIÓN		
	RESILIENCIA (A)	ENDURECIMIENTO (B)	TENACIDAD (A+B)
V_2_1	59,3824	95,9856	155,368
V_2_6	54,0127	128,8671	182,8798
V_2_7	48,8788	285,0087	333,8875

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



Gráfica Tensión/Deformación



Gráfica Fuerza/Deformación

**PATRÓN** {  
 PATRÓN + 12,4 Kg/m<sup>3</sup>  
 ½ PATRÓN + 12,4 Kg/m<sup>3</sup>



Fotografía Viga patrón V\_2\_1



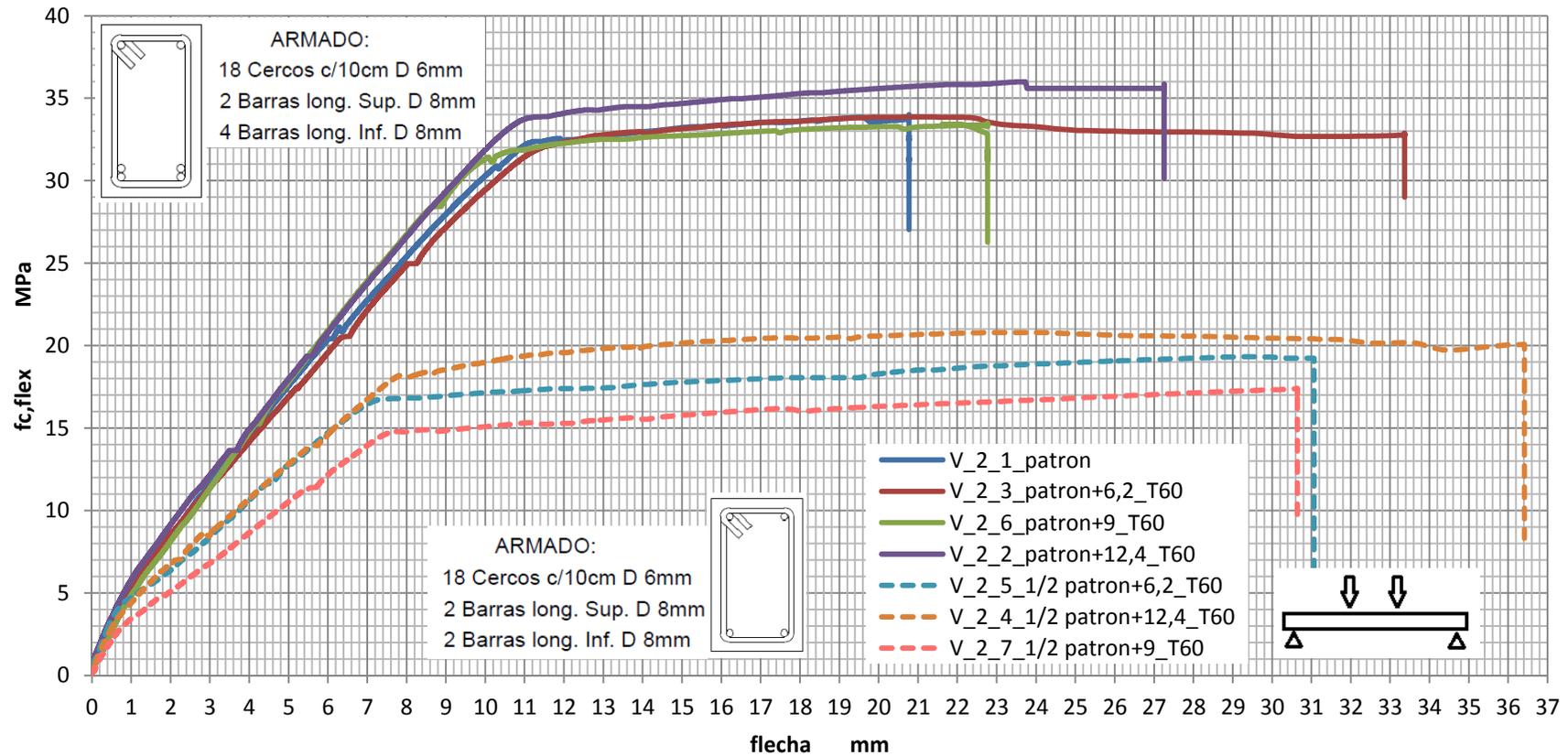
Fotografía Viga patrón + 12,4 Kg/m<sup>3</sup> V\_2\_2



Fotografía Viga patrón + 12,4 Kg/m<sup>3</sup> V\_2\_4

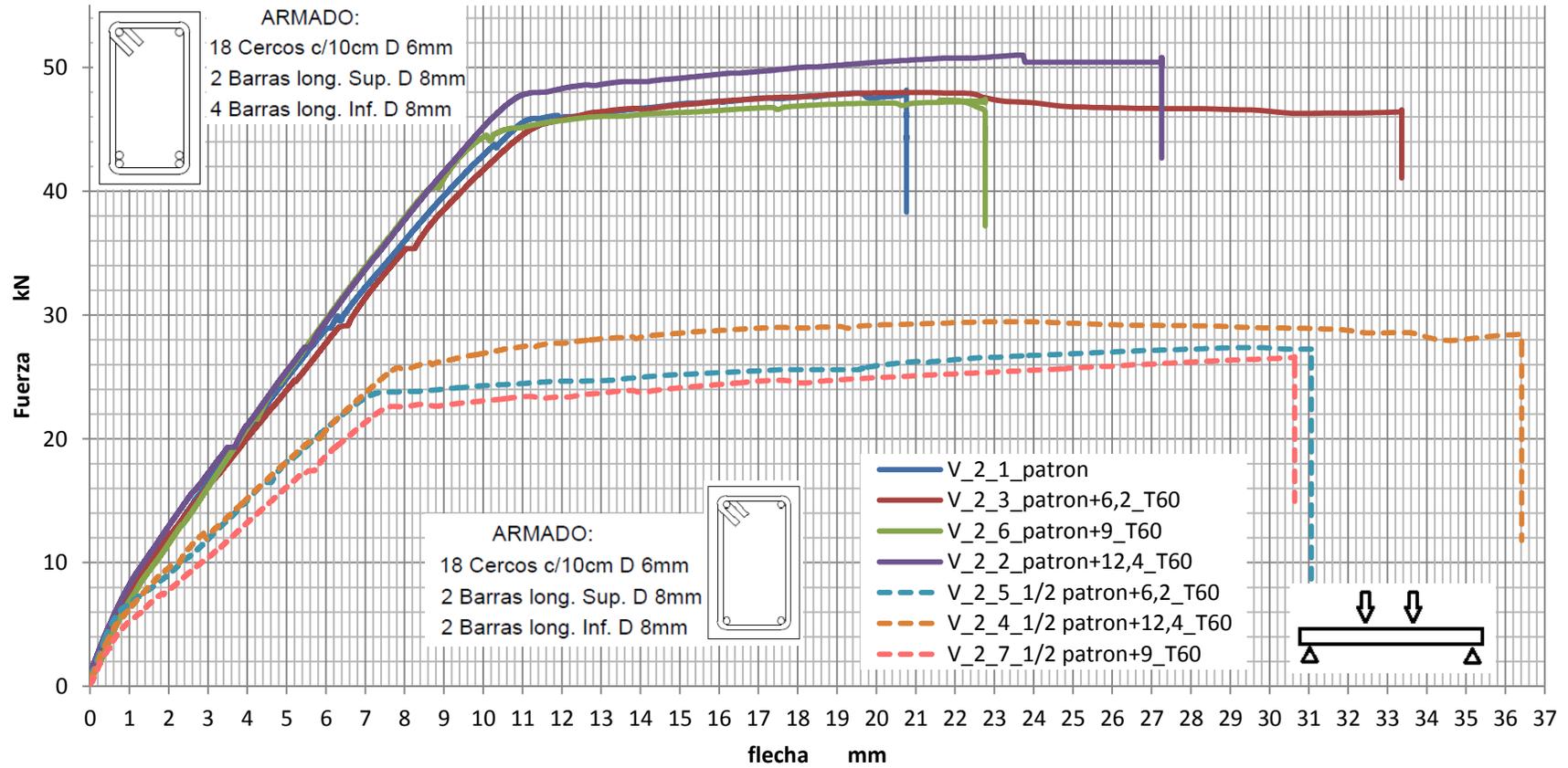
VIGAS	GRÁFICAS FUERZA/DEFORMACIÓN		
	RESILIENCIA (A)	ENDURECIMIENTO (B)	TENACIDAD (A+B)
V_2_1	59,3824	95,9856	155,368
V_2_3	98,145	359,955	458,1
V_2_4	71,1893	508,9832	580,1725

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



Gráfica Tensión/Deformación de todas las vigas realizadas

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



Gráfica Fuerza/Deformación de todas las vigas realizadas

## 6.1- Análisis presupuestario

Para el análisis presupuestario hemos realizado una consulta de los precios básicos de los materiales que hemos empleado para ejecutar las vigas. Éstos son los siguientes:

- Árido 12,5mm → 18,87 €/Tn (dato obtenido de la base de datos del IVE 2013)
- Arena 0/2mm → 8,09 €/Tn (dato obtenido de la base de datos del IVE 2013)
- Arena 0/4mm → 8,45 €/Tn (dato obtenido de la base de datos del IVE 2013)
- Filler calizo → 76,66 €/Tn (dato obtenido de la base de datos del IVE 2013)
- Agua → 0,01 €/L (dato obtenido de la base de datos del IVE 2013)
- Encofrado de madera aglomerada cubierta con melanina, tablero de 2100x400x19 mm → 6€ (comprado en Leroy Merlin)
- Barra de acero corrugado de diámetro 6mm → 0,85 €/kg. (dato obtenido de la base de datos del IVE 2013)
- Barra de acero corrugado de diámetro 8mm → 0,84 €/kg. (dato obtenido de la base de datos del IVE 2013)
- Cemento CEMENTVAL CEMII/B-M (S-L) 42,5R → 90 €/Tn (precio de suministro de central)
- Aditivo SIKA VISCONCRETE 3425 → 0,75 €/kg. (precio de suministro)
- Fibras poliméricas SIKAFIBBER T60 → 5 €/kg. (precio de suministro)

El precio del agua es orientativo y la amortización que se la va a dar a los tableros de madera son de tres y cuatro veces.

Hemos realizado un precio compuesto del conjunto, teniendo en cuenta la cantidad de armadura inferior y la cantidad de fibras que contiene el hormigón. Éstos los mostramos a continuación:

## Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

 M. de viga realizada con HACRF-P\_0kg/m<sup>3</sup> 2Ø8+4Ø8

Rendimiento	Descripción	Precio	Importe
9,42	Kg de arido 12,5mm	0,01887	0,18
8,79	Kg de arena 0/2mm	0,00809	0,07
0,31	Filler calizo	0,07666	0,02
12,87	Kg de arena 0/4mm	0,00845	0,11
5,525	Kg cemento	0,09	0,50
0,15	kg aditivo	0,75	0,11
3,83	kg acero	0,95	3,6385
3,315	kg de agua	0,01	0,03
0,5868	Amort. Encofrado madera 3 usos	3,52	2,07
4,5	h. de mano de obra	16	72,00

3% Costes directos complementarios 2,28  
5% Costes indirectos 4,05

Total	85,06	€/m
-------	-------	-----

 M. de viga realizada con HACRF-P\_6,2kg/m<sup>3</sup> 2Ø8+4Ø8

Rendimiento	Descripción	Precio	Importe
9,42	Kg de arido 12,5mm	0,01887	0,18
8,79	Kg de arena 0/2mm	0,00809	0,07
0,31	Filler calizo	0,07666	0,02
12,87	Kg de arena 0/4mm	0,00845	0,11
5,525	Kg cemento	0,09	0,50
0,15	kg aditivo	0,75	0,11
3,83	kg acero	0,95	3,6385
3,315	kg de agua	0,01	0,03
0,1	kg Fibras poliméricas T60	5	0,50
0,5868	Amort. Encofrado madera 3 usos	3,52	2,07
4,5	h. de mano de obra	16	72,00

3% Costes directos complementarios 2,30  
5% Costes indirectos 4,08

Total	85,60	€/m
-------	-------	-----

## Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

 M. de viga realizada con HACRF-P\_6,2 kg/m<sup>3</sup> 2Ø8+2Ø8

Rendimiento	Descripción	Precio	Importe
9,42	Kg de arido 12,5mm	0,01887	0,18
8,79	Kg de arena 0/2mm	0,00809	0,07
0,31	Filler calizo	0,07666	0,02
12,87	Kg de arena 0/4mm	0,00845	0,11
5,525	Kg cemento	0,09	0,50
0,15	kg aditivo	0,75	0,11
2,74	kg acero	0,95	2,603
3,315	kg de agua	0,01	0,03
0,1	kg Fibras poliméricas T60	5	0,50
0,5868	Amort. Encofrado madera 3 usos	3,52	2,07
4,5	h. de mano de obra	16	72,00

3% Costes directos complementarios 2,27  
5% Costes indirectos 4,02

Total	84,49	€/m
-------	-------	-----

 M. de viga realizada con HACRF-P\_9kg/m<sup>3</sup> 2Ø8+4Ø8

Rendimiento	Descripción	Precio	Importe
9,42	Kg de arido 12,5mm	0,01887	0,18
8,79	Kg de arena 0/2mm	0,00809	0,07
0,31	Filler calizo	0,07666	0,02
12,87	Kg de arena 0/4mm	0,00845	0,11
5,525	Kg cemento	0,09	0,50
0,15	kg aditivo	0,75	0,11
3,83	kg acero	0,95	3,6385
3,315	kg de agua	0,01	0,03
0,15	kg Fibras poliméricas T60	5	0,75
0,5868	Amort. Encofrado madera 3 usos	3,52	2,07
4,5	h. de mano de obra	16	72,00

3% Costes directos complementarios 2,31  
5% Costes indirectos 4,09

Total	85,88	€/m
-------	-------	-----

## Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

 M. de viga realizada con HACRF-P\_9kg/m<sup>3</sup> 2Ø8+2Ø8

Rendimiento	Descripción	Precio	Importe
9,42	Kg de arido 12,5mm	0,01887	0,18
8,79	Kg de arena 0/2mm	0,00809	0,07
0,31	Filler calizo	0,07666	0,02
12,87	Kg de arena 0/4mm	0,00845	0,11
5,525	Kg cemento	0,09	0,50
0,15	kg aditivo	0,75	0,11
2,74	kg acero	0,95	2,603
3,315	kg de agua	0,01	0,03
0,15	kg Fibras poliméricas T60	5	0,75
0,5868	Amort. Encofrado madera 3 usos	3,52	2,07
4,5	h. de mano de obra	16	72,00

3% Costes directos complementarios 2,28

5% Costes indirectos 4,04

Total	84,76	€/m
-------	-------	-----

 M. de viga realizada con HACRF-P\_12,4kg/m<sup>3</sup> 2Ø8+4Ø8

Rendimiento	Descripción	Precio	Importe
9,42	Kg de arido 12,5mm	0,01887	0,18
8,79	Kg de arena 0/2mm	0,00809	0,07
0,31	Filler calizo	0,07666	0,02
12,87	Kg de arena 0/4mm	0,00845	0,11
5,525	Kg cemento	0,09	0,50
0,15	kg aditivo	0,75	0,11
3,83	kg acero	0,95	3,6385
3,315	kg de agua	0,01	0,03
0,21	kg Fibras poliméricas T60	5	1,05
0,5868	Amort. Encofrado madera 3 usos	3,52	2,07
4,5	h. de mano de obra	16	72,00

3% Costes directos complementarios 2,32

5% Costes indirectos 4,10

Total	86,20	€/m
-------	-------	-----

## Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

 M. de viga realizada con HACRF-P\_12,4kg/m<sup>3</sup> 2Ø8+2Ø8

Rendimiento	Descripción	Precio	Importe
9,42	Kg de arido 12,5mm	0,01887	0,18
8,79	Kg de arena 0/2mm	0,00809	0,07
0,31	Filler calizo	0,07666	0,02
12,87	Kg de arena 0/4mm	0,00845	0,11
5,525	Kg cemento	0,09	0,50
0,15	kg aditivo	0,75	0,11
2,74	kg acero	0,95	2,603
3,315	kg de agua	0,01	0,03
0,21	kg Fibras poliméricas T60	5	1,05
0,5868	Amort. Encofrado madera 3 usos	3,52	2,07
4,5	h. de mano de obra	16	72,00

3% Costes directos complementarios	2,29
5% Costes indirectos	4,05

Total	85,08	€/m
-------	-------	-----

Como se observa en los diferentes precios, dependiendo de su cantidad de armadura inferior y su contenido de fibras, el precio varía poco, incrementándose lógicamente cuando el contenido de fibras es mayor, notándose la disminución del precio cuando el armado inferior de la viga es la mitad que la viga patrón.

Al disponer de menos armadura el tiempo de ejecución disminuye, el hecho de ser autocompactante, también lo reduce ya que evita el vibrado del hormigón. La viga, al estar elaborada con menos armadura que la que necesitaría para resistir el esfuerzo de tracción, el vertido y colocación del hormigón en obra es mucho más simple lo que se obtiene un ahorro de tiempo y mano de obra, lo que hace que este tipo de hormigones sea objeto de estudio ya que puede suponer un ahorro económico aunque el material sea más caro cuanto mayor sea el contenido de fibras.

En su aplicación en soleras, las fibras resisten las dilataciones y contracciones del material, con lo que tenemos un ahorro a la hora de colocación del mallazo electrosoldado, ya que éste sería ineficiente.



Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

## 6.- CONCLUSIONES

En el presente proyecto, donde se estudia la resistencia a flexión de vigas realizadas con hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas, podemos concluir que todas las roturas fueron dúctiles, consiguiendo más ductilidad cuanto mayor es la cantidad de fibras poliméricas.

La cantidad de armadura de acero es importante, puesto que ésta trabaja muy bien a tracción. Este dato hace que la viga adquiera un mayor límite elástico del material.

Cuando se ejecutan las vigas con la mitad de armadura, el límite elástico, la carga máxima y la rigidez del conjunto se reduce aproximadamente a la mitad que las vigas realizadas con la misma cantidad de armadura que la viga patrón.

También se puede concluir que el hecho de añadirle fibras al hormigón, éstas le confieren una mayor deformación post-rotura, lo cual una vez rompe el material deforma mucho hasta la rotura total de la viga.

Observando las gráficas comparativas de las vigas, observamos que el hecho de añadirle fibras al hormigón repercuten en éste incrementando su rigidez, como se puede observar en las pendientes de las rectas en la rama elástica del material.

Al añadirle fibras al hormigón, en los ensayos de las probetas y las vigas al calcular la energía que absorbe el material hasta la rotura, podemos concluir que a mayor contenido de fibras al hormigón la energía absorbida es mayor.

Como material y su puesta en obra, creemos que el hecho de que sea un hormigón autocompactante, es una ventaja para los hormigones reforzados con fibras poliméricas, puesto que con el alto contenido de fibras en el hormigón rebajan la trabajabilidad de éste.

Económicamente hablando, en este tipo de hormigones, aunque el precio de las fibras es algo elevado, observamos que al añadirle fibras se puede reducir la cantidad de armadura, con lo que conseguimos un ahorro económico. El hecho de trabajar con menor cantidad de armadura la trabajabilidad y puesta en obra del hormigón es mejor; con lo que obtenemos un ahorro económico, ya que el ritmo de puesta en obra del hormigón es menor. Esto también se consigue ya que el hormigón elaborado es autocompactante.

## 7.- FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Como futuras líneas de trabajo para continuar esta labor de estudio, hemos optado por unas ideas las cuales son fruto de las dificultades que nos han surgido o aspectos interesantes en los cuales nos hubiera gustado profundizar más:

- Ensayo del mismo modelo de viga y hormigón con fibras menos utilizadas a día de hoy como: fibras de carbono, fibras metálicas...
- Ensayo de nuestro hormigón HACRF-P aligerado, ya sea mediante inclusión de árido ligero, aire, poliestireno expandido, etc.
- Ensayo del mismo modelo de viga, con inclusión en nuestro hormigón de mayor cantidad de cemento para conferirle más cohesión y resistencia.
- Investigar otras formas y longitud de diseño de las fibras poliméricas que consigan coser mejor la matriz cementante entre sí. Una vez diseñadas, fabricarlas y ensayarlas para comparar resultados con las estudiadas en este proyecto.
- Ensayar las mismas vigas en lugar de a dos cargas aplicadas de forma constante y centrada, de forma que se asemeje a un sismo. Y de esta forma corroborar que la tenacidad que conseguimos alcanzar con las fibras poliméricas es válida también cuando de una serie de esfuerzos potentes y de forma intermitente se le aplican a la viga.
- Estudio más intenso de la granulometría a fin de lograr un grado de fluidez mayor y comprobar que es compatible con las fibras.



## 8.- BIBLIOGRAFÍA

- GARCIA, T., AGULLÓ, L., AGUADO, A, CANALS, G, Evaluación de la tenacidad en el hormigón proyectado reforzado con fibras poliméricas de alto módulo, artículo en boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio.
- CANOVAS, M.F. Hormigones con fibras: tecnología y propiedades generales. Hormigón y Acero, No. 228-229, pp.167-176, 2003.
- American Concrete Institute. Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.2R-98. ACI Fannington Hilis, MI, 1999.
- American Concrete Institute. State of art Report on Fiber Reinforced. Concrete, ACI 544.1R-96. ACI Fannington Hilis, MI, 1996.
- PUJADES ALVAREZ, Pablo, Durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno, Publicaciones del Departamento de la Ingeniería de la construcción, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2009. Tutores: AGUADO DE CEA, Antonio, VANDEWALLE, Marc.
- Norma ACI 544.2R
- CANOVAS, M.F. Hormigón. Colección Escuelas.
- DÍAZ HEREDIA, ELENA. Influencia de diferentes variables en el comportamiento a flexión de secciones de hormigón armado.
- DELIBES LINIERS, ADOLFO Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón.
- CEMEX. Piel de hormigón: aspectos técnicos y estéticos del hormigón autocompactante.
- PARKER, HARRY. Diseño simplificado de concreto reforzado
- INTEMAC. Flexión simple en hormigón armado [Vídeo-DVD].
- NORMAS UNE
- NORMAS UNE-EN
- NORMATIVA EHE-08



- VVAA, Hormigón proyectado reforzado con fibras poliméricas de alto módulo, Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.



## ANEXO I: GRANULOMETRÍA

### Grava 12,5 mm

Tamiz (g)	R (g) Retenido (g)	RA (g) Retenido acumulado (g)	R % % Retenido en el tamiz	RA % % Retenido acumulado	P % % Pasa
63	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
32,5	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
20	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
16	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
14	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
12,5	51,17	51,17	2,69%	2,69%	97,31%
10	616,5	667,67	32,45%	35,15%	64,85%
8	723,01	1390,68	38,06%	73,21%	26,79%
6,5	280	1670,68	14,74%	87,95%	12,05%
4	222,96	1893,64	11,74%	99,69%	0,31%
2	5,95	1899,59	0,31%	100,00%	0,00%
1	0	1899,59	0,00%	100,00%	0,00%
0,5	0	1899,59	0,00%	100,00%	0,00%
0,25	0	1899,59	0,00%	100,00%	0,00%
0,125	0	1899,59	0,00%	100,00%	0,00%
0,063	0	1899,59	0,00%	100,00%	0,00%
Pasa	0	1899,59	0,00%	100,00%	0,00%
<b>Muestra desecada (g)</b>		<b>1899,59</b>		<b>Mg</b>	<b>6,73</b>
<b>T max</b>	<b>12,5</b>	<b>mm</b>			

### Arena 0/4

Tamiz (g)	R (g) Retenido (g)	RA (g) Retenido acumulado (g)	R % % Retenido en el tamiz	RA % % Retenido acumulado	P % % Pasa
63	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
32,5	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
20	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
16	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
14	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
12,5	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
10	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
8	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
6,5	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
4	19,44	19,44	6,93%	6,93%	93,07%
2	79,78	99,22	28,44%	35,37%	64,63%
1	51,26	150,48	18,27%	53,65%	46,35%
0,5	29,25	179,73	10,43%	64,07%	35,93%
0,25	23,61	203,34	8,42%	72,49%	27,51%
0,125	21,74	225,08	7,75%	80,24%	19,76%
0,063	22,12	247,2	7,89%	88,13%	11,87%
Pasa	33,3	280,5	11,87%	100,00%	0,00%
<b>Muestra desecada (g)</b>		<b>280,5</b>		<b>Mg</b>	<b>3,13</b>
<b>T max</b>	<b>4</b>	<b>mm</b>			

## Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión

## Arena 0/2

Tamiz (g)	R (g) Retenido (g)	RA (g) Retenido acumulado (g)	R % % Retenido en el tamiz	RA % % Retenido acumulado	P % % Pasa
63	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
32,5	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
20	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
16	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
14	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
12,5	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
10	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
8	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
6,5	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
4	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
2	3,25	3,25	1,12%	1,12%	98,88%
1	90,62	93,87	31,21%	32,33%	67,67%
0,5	58,36	152,23	20,10%	52,43%	47,57%
0,25	36,51	188,74	12,57%	65,01%	34,99%
0,125	24,83	213,57	8,55%	73,56%	26,44%
0,063	21	234,57	7,23%	80,79%	19,21%
Pasa	55,77	290,34	19,21%	100,00%	0,00%
<b>Muestra desecada (g)</b>		<b>290,34</b>		<b>Mg</b>	<b>2,24</b>
<b>T max</b>	<b>2</b>	<b>mm</b>			

Dos áridos:

$$T2 = 100(Mb2 - Mg1) + T0 \times Mg1 / Mg2 - Mg1$$

$$T1 = 100 - T2 - T0$$

Tres áridos:

$$T0 + T1 + T2 = 100 * (Mg3 - Mb3 / Mg3 / Mb2)$$

$$T1 = (T0 + T1 + T2) (Mg2 - Mb2) - T0 * Mb2$$

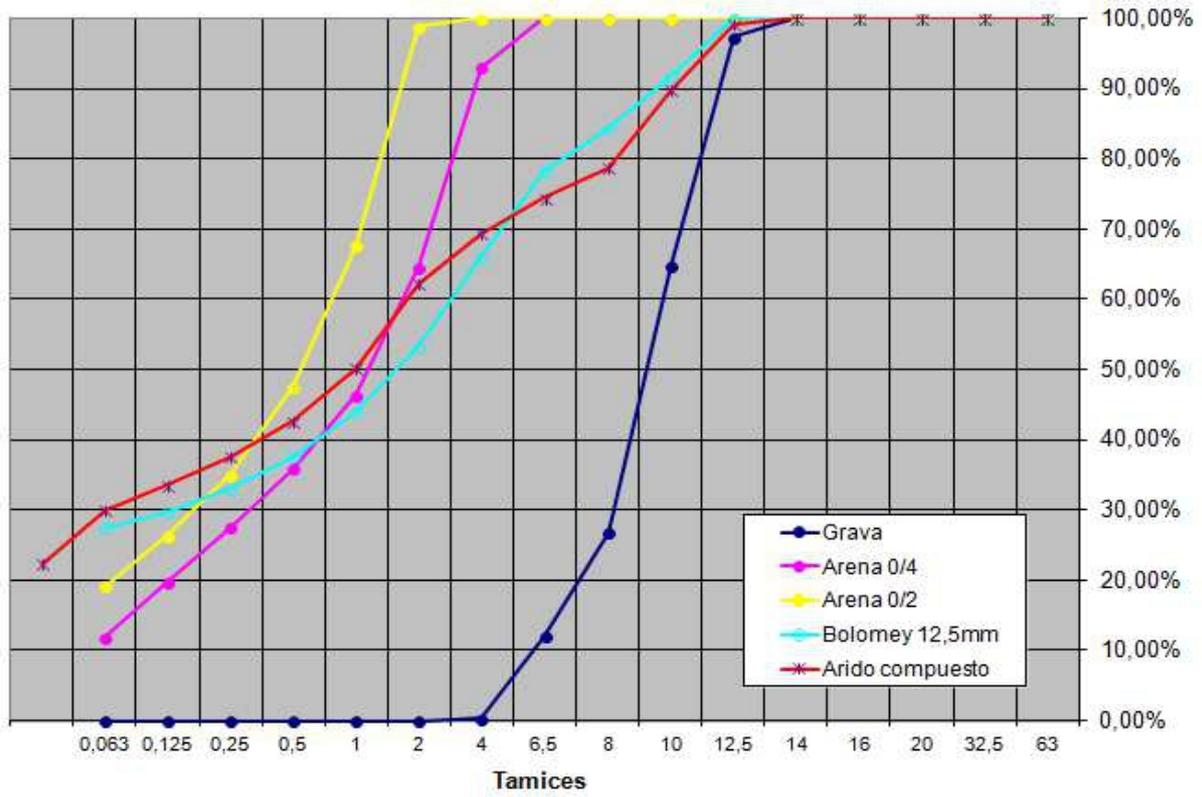
$$T2 = (T0 + T1 + T2) - (T0 + T1)$$

$$T3 = 100 - (T0 + T1 + T2)$$

CEM  $T0 = (\text{peso CEM po } m^3 / \text{densidad CEM}) / \text{vol. Componentes } m^3 - \text{vol agua } m^3$

% CEM	22,33
% Arena 0/2	24,9
% Arena 0/4	23,74
% Grava	29,03

Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzos de flexión



Gráfica análisis granulométrica

