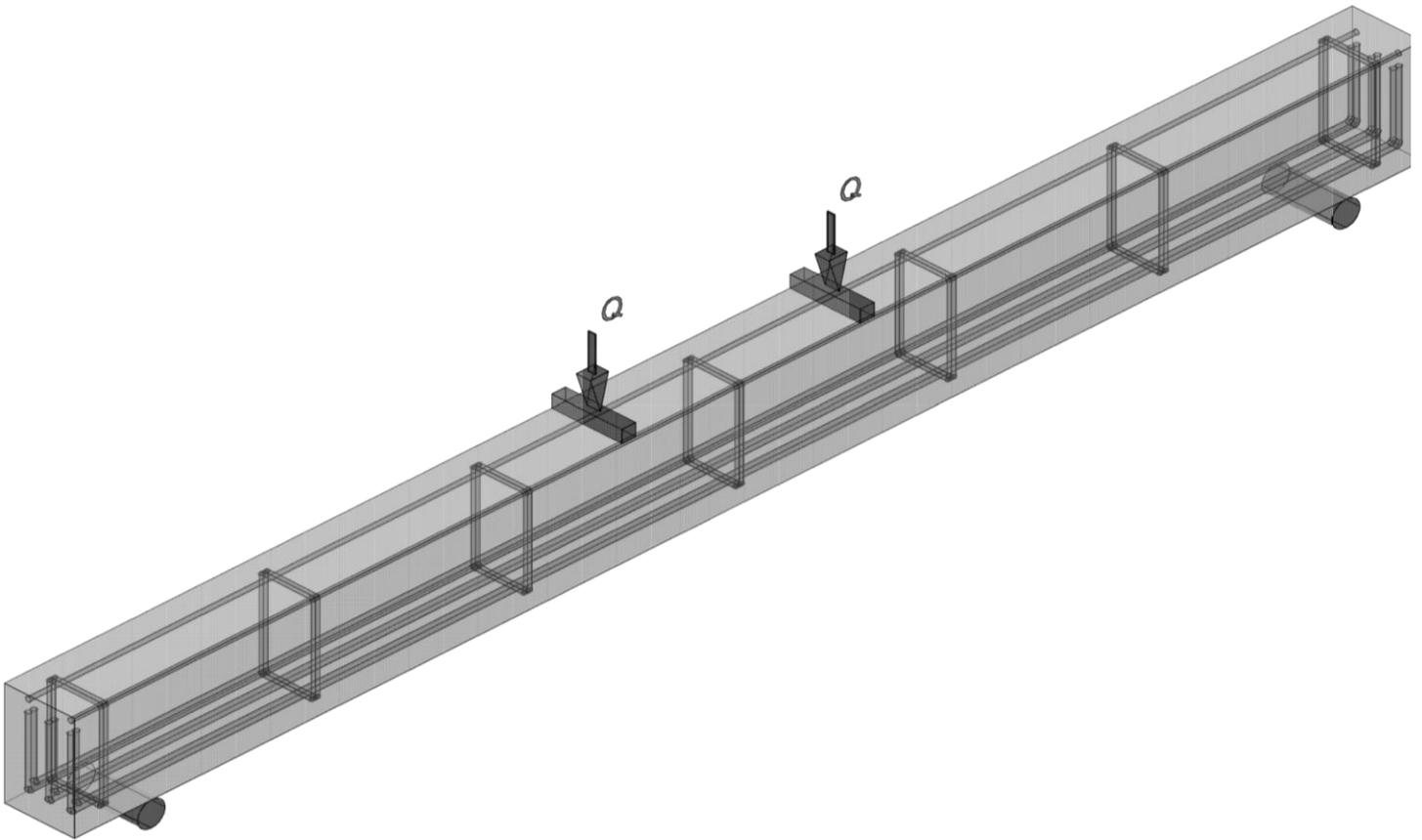


ESTUDIO DEL ESFUERZO A CORTANTE EN VIGAS DE HAC REFORZADO CON FIBRAS POLIMÉRICAS



Titulación: Grado en Arquitectura Técnica
Modalidad: Científico-Técnico

Alumnas: Armero Lavie, María Vanesa
Pardo Hernández, Raquel

Profesores: Albiol Ibáñez, José Ramón
García Ballester, Luis

Julio 2013

Agradecimientos:

A nuestros tutores del proyecto José Ramón Albiol Ibáñez y Luis García Ballester, por su constante dedicación y orientación.

A Rafa Calabuig Pastor y Jesús Martínez Sanz, técnicos del laboratorio de construcciones arquitectónicas, por su ayuda y consejos durante nuestras horas en el laboratorio.

A Viraje Arquitectura por apoyarnos y proporcionarnos parte del material necesario para la realización de nuestro proyecto.

A nuestros compañeros del taller por su ayuda y colaboración, sobretodo en los largos días de laboratorio.

Y por último y más importante a nuestras familias por su constante apoyo, ayuda y consejos.

ÍNDICE

1. OBJETIVOS.....	1
2. ESTADO DEL ARTE	2
2.1 Antecedentes.....	2
2.2 Hormigón autocompactante.....	3
2.2.1 Definición del hormigón autocompactante.....	3
2.2.2 Propiedades específicas.....	3
2.2.3 Diferencias con el hormigón convencional.....	3
2.2.4 Dosificación orientativa de un HAC.....	3
2.3 Hormigón reforzado con fibras.....	4
2.3.1 Definición de hormigón reforzado con fibras.....	4
2.3.2 Características del hormigón reforzado con fibras.....	4
2.3.3 Ventajas e inconvenientes del hormigón reforzado con fibras	4
2.3.4 Tipos de fibras.....	5
2.3.4.1 Fibras de acero.....	6
2.3.4.2 Fibras poliméricas.....	7
2.3.4.2.1 Ventajas de las fibras poliméricas frente a las fibras metálicas.....	9
2.3.4.3 Otras fibras inorgánicas.....	9
2.3.5 Adherencia fibras-matriz.....	10
2.4 Características del hormigón autocompactante (HAC) y del hormigón reforzado con fibras (HRF).....	11
2.4.1 Propiedades del hormigón endurecido.....	11
2.4.2 Módulo de deformación longitudinal del hormigón.....	12
2.4.3 Retracción del hormigón.....	12
2.4.4 Fluencia del hormigón.....	13
2.4.5 Resistencias mecánicas del hormigón.....	13
2.4.5.1 Resistencia a tracción.....	13
2.4.5.2 Resistencia a flexión.....	14
2.4.5.3 Resistencia a cortante.....	16
2.4.5.4 Resistencia a compresión.....	16
2.4.5.5 Resistencia a torsión.....	17
2.4.5.6 Tenacidad.....	17
2.4.6 Docilidad del hormigón.....	18
2.4.7 Durabilidad del hormigón.....	18
2.5 Ensayos hormigón.....	19
2.5.1 Ensayos hormigón fresco.....	19
2.5.1.1 Ensayo de determinación de la densidad.....	20
2.5.1.2 Ensayo de determinación de contenido de aire.....	21
2.5.1.3 Ensayo del escurrimiento.....	21
2.5.1.4 Ensayo del embudo en V.....	21
2.5.1.5 Ensayo del anillo J.....	21
2.5.1.6 Ensayo de la caja en L.....	21
2.5.1.7 Ensayo del índice visual de estabilidad.....	22
2.5.1.8 Ensayo de segregación por tamiz.....	22
2.5.1.9 Requisitos generales para la autocompactabilidad según la EHE-08.....	22
2.5.2 Ensayos hormigón endurecido.....	22
2.5.2.1 Ensayo por compresión simple en probetas cilíndricas de HRF.....	22
2.5.2.2 Determinación del módulo de elasticidad a compresión.....	23
2.5.2.3 Determinación del índice de tenacidad a compresión.....	23
2.5.2.4 Determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura.....	23

2.5.2.5 Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).....	24
2.6 Tipificación de los hormigones según la EHE-08.....	26
2.6.1 Hormigón autocompactantes Anejo 17 (EHE-08).....	26
2.6.2 Hormigón reforzado con fibras Anejo 14 (EHE-08).....	28
2.7 Materiales empleados en la fabricación de hormigones autocompactantes reforzados con fibras.....	29
2.7.1 Áridos.....	29
2.7.1.1 Árido grueso.....	29
2.7.1.2. Arena.....	30
2.7.1.3. Filler mineral.....	30
2.7.2. Cementos.....	31
2.7.3 Aditivos.....	31
2.7.3.1. Superplastificantes.....	31
2.7.3.2. Agentes modificadores de viscosidad.....	32
2.7.3.3 Otros.....	32
2.7.4 Adiciones.....	32
2.7.4.1 Ceniza volante.....	33
2.7.4.2 Humo de sílice.....	33
2.7.4.3. Otras adiciones.....	33
2.7.5 Agua.....	34
2.7.6 Fibras.....	34
2.7.7 Pigmentos.....	34
2.7.8 Ventajas y desventajas del uso de materiales.....	34
2.8 Análisis del comportamiento a cortante en vigas.....	36
2.8.1 Clasificación de las fisuras según armado.....	37
2.8.2 Mecanismos para la transmisión de cortante.....	39
2.8.3 Factores que afectan a la resistencia a cortante.....	41
2.8.4 Resistencia a cortante en hormigón reforzado con fibras.....	43
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	45
3.1 Programación.....	45
3.2 Ensayos previos.....	47
3.3 Fabricación de las vigas y probetas.....	48
3.4 Ensayo de hormigón endurecido.....	49
3.4.1 Probetas.....	49
3.4.1.1 Ensayo a flexión.....	49
3.4.1.2 Ensayo a compresión en probetas prismáticas.....	49
3.4.1.3. Ensayo del módulo de elasticidad.....	49
3.4.1.4 Ensayo a compresión en probetas cilíndricas.....	49
3.4.2 Vigas.....	49
4. METODOLOGÍA.....	50
4.1 Caracterización de los materiales.....	50
4.1.1 Áridos.....	50
4.1.1.1 Árido grueso.....	50
4.1.1.2 Arena.....	52
4.1.1.2.1 Arena gruesa 0/4.....	52
4.1.1.2.2 Arena fina 0/2.....	53
4.1.1.3 Granulometría compuesta de los 3 áridos.....	54
4.1.2 Cemento.....	55

4.1.3 Aditivo.....	55
4.1.4 Agua.....	56
4.1.5 Finos.....	56
4.1.6 Fibras.....	57
4.1.7 Acero.....	57
4.1.7.1 Ensayos para caracterización del acero.....	59
4.1.7.1.1 Determinación de las características geométricas del acero.....	59
4.1.7.1.2 Ensayo de tracción del acero.....	59
4.2 Dosificación.....	60
4.3 Fabricación de vigas y probetas.....	62
4.3.1 Elaboración de encofrados.....	62
4.3.2 Montaje de armado.....	63
4.3.3 Preparación de moldes y encofrados.....	64
4.3.4 Confección del hormigón.....	64
4.3.4.1 Obtención y corrección la humedad.....	64
4.3.4.2 Proceso de amasado.....	65
4.3.5 Realización de ensayos de hormigón fresco para caracterización del HAC.....	66
4.3.5.1 Ensayo del escurrimiento.....	66
4.3.5.2 Ensayo del anillo J.....	67
4.3.5.3 Ensayo del embudo en V.....	68
4.3.5.4 Ensayo de determinación de contenido de aire (mediante el método del manómetro).....	69
4.3.5.5 Ensayo del índice visual de estabilidad.....	70
4.3.6 Hormigonado de vigas y probetas.....	70
4.3.7 Desencofrado, desmoldado y transporte a la cámara de curado.....	71
4.4 Ensayos de hormigón endurecido en probetas.....	72
4.4.1 Preparación de probetas.....	72
4.4.2 Ensayo a flexión en probetas prismáticas.....	72
4.4.3 Ensayo por compresión simple en probetas prismáticas.....	73
4.4.4 Determinación del módulo de elasticidad a compresión.....	74
4.4.5 Ensayo por compresión simple en probetas cilíndricas.....	75
4.5 Ensayo en vigas.....	76
4.5.1 Preparación de vigas.....	76
4.5.2 Rotura de vigas a flexión en cuatro puntos.....	76
5. ANÁLISIS Y RESULTADOS	77
5.1 Ensayos previos.....	77
5.1.1 Ensayos acero.....	77
5.1.1.1 Determinación de las características geométricas del acero.....	77
5.1.1.2 Ensayo de tracción del acero.....	78
5.1.2 Pruebas de dosificación.....	81
5.1.1.1 Dosificación 1.....	81
5.1.1.2 Dosificación 2.....	83
5.1.1.3 Dosificación 3.....	83
5.1.1.4 Dosificación 4.....	84
5.1.1.5 Dosificación 5.....	84
5.1.1.6 Dosificación 6.....	85
5.1.1.7 Dosificación 7.....	86
5.1.1.8 Dosificación 8.....	86
5.1.1.9 Dosificación 9.....	87
5.1.1.10 Dosificación 10.....	88
5.1.1.11 Dosificación 11.....	89

5.1.1.12 Dosificación 12.....	89
5.1.1.13 Dosificación 13.....	90
5.1.1.14 Dosificación 14.....	90
5.1.3 Dosificación definitiva.....	91
5.2 Ensayos en hormigón fresco.....	92
5.2.1 Amasada V.1.1 para viga y probetas.....	92
5.2.2 Amasada V.1.2 para viga y probetas.....	93
5.2.3 Amasada V.1.3 para viga y probetas.....	94
5.2.4 Amasada V.1.4 para viga y probetas.....	95
5.2.5 Amasada V.1.5 para viga y probetas.....	96
5.2.6 Amasada V.1.6 para viga y probetas.....	97
5.2.7 Amasada V.1.7 para viga y probetas.....	98
5.2.8 Análisis de la incorporación de fibras al hormigón autocompactante en estado fresco.....	99
5.3.1 Ensayos en probetas.....	100
5.3.1.1 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.1.....	100
5.3.1.2 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.3.....	102
5.3.1.3 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.5.....	105
5.3.1.4 Análisis de resultados de HAC reforzado con 6,2 kg/m ³ de fibras poliméricas en probetas.....	107
5.3.1.5 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.6.....	111
5.3.1.6 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.7.....	114
5.3.1.7 Análisis de resultados de HAC reforzado con 9 kg/m ³ de fibras poliméricas en probetas.....	116
5.3.1.8 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.2.....	119
5.3.1.9 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.4.....	121
5.3.1.10 Análisis de resultados de HAC reforzado con 12,4 kg/m ³ de fibras poliméricas en probetas.....	124
5.3.1.11 Análisis de resultados de HAC reforzado con distintas cantidades de fibras poliméricas en probetas.....	127
5.3.2 Ensayos en vigas.....	134
5.3.2.1 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.1.....	135
5.3.2.2 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.3.....	137
5.3.2.3 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.5.....	138
5.3.2.4 Análisis de resultados de HAC reforzado con 6,2kg/m ³ de fibras poliméricas en vigas.....	140
5.3.2.5 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.6.....	141
5.3.2.6 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.7.....	143
5.3.2.7 Análisis de resultados de HAC reforzado con 9 kg/m ³ de fibras poliméricas en vigas.....	145
5.3.2.8 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.2.....	146
5.3.2.9 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.4.....	148
5.3.2.10 Análisis de resultados de HAC reforzado con 12,4kg/m ³ de fibras poliméricas en vigas.....	150
5.3.2.11 Análisis de resultados de HAC reforzado con distintas cantidades de fibras poliméricas y variación de armado en vigas.....	151
5.4 Resumen de análisis y resultados.....	154
6. PRESUPUESTO.....	160
7. CONCLUSIONES.....	165
8. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	167
9. BIBLIOGRAFÍA.....	168
ANEXO I: Listado de tablas, imágenes, figuras y gráficas.....	174



1. Objetivos

1. OBJETIVOS

Los hormigones autocompactantes se presentan como una alternativa de ejecución rápida, fácil y más económica que garantiza una buena puesta en obra y una mejora de las prestaciones mecánicas en comparación con los hormigones convencionales.

Por otro lado, los hormigones reforzados con fibra de carácter estructural son cada vez más demandados ya que, en el caso de contar con el tipo y proporción de fibras adecuado, pueden permitir una sustitución total o parcial del armado.

Estas fibras, pudiendo ser de una gran variedad de materiales (acero, vidrio, polímeros, carbono...), formas y características, son utilizadas para prevenir y controlar la fisuración del hormigón, dotan al mismo de un mejor comportamiento (resistente y tenaz) frente a sollicitaciones distintas a la de compresión, consiguiendo aportar ductilidad una vez se ha producido el fallo de la matriz, trabando las fisuras, transmitiendo la tensión a través de las fibras evitando el crecimiento de estas fisuras.

La fibra comúnmente más utilizada, con función estructural, es la fibra de acero. Sin embargo, en este estudio se utilizan fibras poliméricas que además de ofrecer las características habituales de este tipo de fibras como son el control de fisuración, mejora del comportamiento frente a la retracción y mejora del comportamiento frente al fuego, presentan un incremento de la tenacidad y/o capacidad de carga post-fisuración. Otras de las razones de la elección de este tipo de fibra se basa en incrementar la vida útil de la estructura de hormigón debido a la no corrosión de este tipo de fibras y menor aporte de peso.

En el presente proyecto se pretende analizar el comportamiento de las fibras frente a esfuerzo cortante en elementos estructurales, concretamente en vigas realizadas con hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas.

El estudio se centrará en el comportamiento de las fibras según su dosificación, por lo que se van a comparar vigas con distintas cantidades de estas, (0 kg/m^3 , $6'2 \text{ kg/m}^3$, 9 kg/m^3 y $12'4 \text{ kg/m}^3$). Se diseñará el armado de las vigas de forma específica para que rompan a cortante, reduciendo el número de cercos con respecto a una viga armada convencionalmente, analizando así el fallo por dicho esfuerzo. También comprobaremos si varía el comportamiento de las vigas al armarlas con cercos simples o dobles.

Como complemento del estudio de las vigas caracterizaremos este material con la fabricación de probetas para comprobar la tenacidad y el comportamiento, tanto a compresión como a flexión en todas sus fases (comportamiento a primera fisura, ablandamiento, endurecimiento y comportamiento post-rotura).



2. Estado del arte

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Antecedentes

Hace 8000 años, la mezcla de cemento con agua, arena y áridos dio como resultado un nuevo material que se podía moldear fácilmente y que, cuando endurecía, adquiría características de solidez, resistencia y durabilidad notables. Este nuevo material fue el origen del hormigón.

Este material fue evolucionando poco a poco hasta la década de 1850, donde dio un gran salto evolutivo, mediante la inclusión de varillas metálicas para mejorar el esfuerzo a flexión, tracción, torsión, cortante...

Ya a principios de siglo se estudia las propiedades del hormigón al introducirle clavos picados y trozos de piezas metálicas. Poco después propone la utilización de fibras de acero para la mejora de la estabilidad y resistencia del hormigón.

En la década de 1960 aparece el hormigón reforzado con fibras, incorporadas en el momento del amasado. Se trata de un hormigón que contiene materiales fibrosos que aumentan su resistencia estructural. Suelen ser fibras cortas, de discretos tamaños repartidas de manera uniforme y orientadas al azar. Estas pueden ser de acero, de vidrio, sintéticas o naturales.

Los hormigones reforzados con fibras están revolucionando el mundo de la construcción ya que con ellos se consigue disminuir el coste de la mano de obra, empleando menor cantidad de armado. Gracias al refuerzo con fibras, estos hormigones tienen mayor tenacidad y son especialmente adecuados para resistir cargas dinámicas y poder controlar la fisuración del hormigón.

Otro importante avance tecnológico en el campo del hormigón se produce en la década de 1980 en Japón con el uso del hormigón autocompactante (HAC) y su utilización se ha ido generalizando en los países más avanzados durante los últimos años.

El HAC se puede definir como aquel hormigón que es capaz de fluir en el interior del encofrado, rellenando de forma natural el volumen del mismo pasando entre las barras de armadura y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso sin compactación interna ni externa, todo esto sin segregación o indicios de bloqueo. Es especialmente adecuado para piezas prefabricadas o donde la complejidad del armado sea alta.

En el presente proyecto elaboraremos hormigón armado autocompactante, reforzado con distintas cantidades de fibras poliméricas, para ver los efectos de estas sobre las propiedades y resistencias del hormigón.

2.2 Hormigón autocompactante

2.2.1 Definición del hormigón autocompactante

“Se define como hormigón autocompactante aquel hormigón que, como consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su 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.” (Anejo 17. EHE-08)

2.2.2 Propiedades específicas

El HAC que ofrece resistencias semejantes a los hormigones convencionales presenta las siguientes propiedades específicas:

- La interfase pasta-árido es más densa dándole una mayor deformabilidad, reduciendo así la fricción entre las partículas.
- Autocompacta por sí sólo sin necesidad de aporte de energía externa (sin vibración).
- Proporciona mejor acabado de superficies
- Es menos permeable y ocluye menos aire (menor velocidad de difusión de agentes agresivos).
- Resistencia al bloqueo o habilidad de paso entre las armaduras
- Resistencia a la segregación estabilidad estática y dinámica que le permite alcanzar una distribución uniforme u homogénea del árido en toda su masa evitando la exudación durante el hormigonado y tras este.

2.2.3 Diferencias con el hormigón convencional

Algunas de las diferencias entre un hormigón autocompactante y un hormigón convencional en su composición son:

- Menor contenido de árido grueso.
- Menor tamaño máximo de árido. $D_{max}=25\text{mm}$. (Recomendable $D_{max}=12-20\text{mm}$).
- Contenido mayor de finos:
 - Finos $<0,125\text{ mm}$ de árido + cemento + adiciones, aprox. 23% del peso seco del hormigón ($450-600\text{ kg/m}^3$)
 - Contenido en partículas $< 0,063\text{ mm}$
- Cantidad de cemento comprendida entre $250-500\text{ kg/m}^3$

2.2.4 Dosificación orientativa de un HAC

Material	EHE-08	Fernández y Burón
Finos totales (cemento+filler+adiciones)	$450-600\text{ kg/m}^3$	$380-600\text{ kg/m}^3$
Pasta (cemento+filler+adiciones+agua)	$>350\text{ l/m}^3$	$530-810\text{ kg/m}^3$
Árido grueso ($<25\text{ mm}$ tamaño máx.)	$<50\%$	$650-900\text{ kg/m}^3$
Cemento	$350-500\text{ kg/m}^3$	-
Filler	$\leq 250\text{ kg/m}^3$	-
Agua	-	$150-210\text{ kg/m}^3$
Arena	-	48-55% del peso total de los áridos
Relación agua/polvo (Volumen)	$0,95-1,05\text{ kg/m}^3$	-

Tabla 1. Proporciones recomendadas HAC

2.3 Hormigón reforzado con fibras

2.3.1 Definición de hormigón reforzado con fibras

“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.” (Anejo 14. EHE-08)

La adición de fibras se permite en hormigones en masa, armados o pretensados.

La aplicación de estos hormigones puede ser estructural o no estructural. Estructural cuando las fibras se tienen en cuenta para el cálculo de la resistencia del elemento constructivo y no estructural cuando estas se incluyen para la mejora de características como la resistencia al fuego o el control de la fisuración.

2.3.2 Características del hormigón reforzado con fibras

“La incorporación de fibras modifica el comportamiento no lineal del hormigón estructural, especialmente en tracción, impidiendo la abertura y propagación de fisuras.” (Anejo 14. EHE-08)

En los hormigones reforzados con fibras, es el propio hormigón el que soporta los esfuerzos, ya que al añadirle las fibras al hormigón aportamos cierta ductilidad al mismo, a diferencia del hormigón armado tradicional donde la armadura colabora de forma anisótropa en este tipo de hormigones las fibras proporcionan un comportamiento más isótropo.

La adición de fibras al hormigón proporciona mejoras en sus propiedades, ya que estas forman una pequeña red que dota de mayor cohesión al hormigón, formando un cosido entre los distintos componentes del mismo, permitiendo así la formación de fisuras de forma controlada, llevando al hormigón a un comportamiento dúctil tras la fisuración inicial, evitando así la rotura frágil.

Las fibras no modifican el peso específico del hormigón y mejoran el comportamiento a tracción, pero no a compresión, permitiendo controlar la fisuración. El empleo de estas puede provocar pérdida de docilidad, por lo que en general se requiere una mayor energía de compactación. El efecto de las mismas sobre las propiedades del hormigón es mayor cuando aumenta la esbeltez y su dosificación, pero empeora la trabajabilidad y aumenta el riesgo de acumulación de fibras (formación de bolas o erizos). El efecto de las fibras mejora también la resistencia del hormigón a la erosión (ambiente E).

2.3.3 Ventajas e inconvenientes del hormigón reforzado con fibras

De los hormigones reforzados con fibras podemos destacar como ventajas principales:

- Reducción de la mano de obra y de equipos necesarios, por lo tanto, mayor productividad en menor plazo y menor coste de producción.

- Posibilita y facilita el hormigonado en elementos altamente armados y con secciones complejas, asegurando la compactación del hormigón.
- Permite una mayor flexibilidad en el diseño de elementos estructurales y su armadura, que sería poco viables o difíciles de construir mediante una vibración convencional.
- Permite una mayor flexibilidad en la disposición de los puntos de hormigonado.
- Mejora la uniformidad en acabados de superficies, reduciendo los trabajos de reparación superficial.
- Altas resistencias a corto y largo plazo.
- Alta impermeabilidad, proporcionando así alta durabilidad.
- Mayor resistencia interna al congelamiento.
- Asegura un refuerzo homogéneo y tridimensional más eficaz.
- Mejora el comportamiento y estabilidad de las juntas.
- Mayor capacidad de absorción de energía en el impacto (resiliencia) y resistencia al impacto para sollicitaciones dinámicas.
- Compatible con todo tipo de mezclas de cemento y hormigón.
- Reducción notable de fisuras.

Destacamos como principales inconvenientes:

- Difícil dosificación, debido grandes alteraciones ante pequeños cambios en la humedad de los áridos.
- Difícil control de la cantidad y efectos del superplastificante, ya que por un pequeño exceso del mismo puede provocar exudación y segregación de la masa.
- Altas temperaturas debido al alto contenido de cemento provocando un curado más exhaustivo.

2.3.4 Tipos de fibras

“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.

De una manera general se pueden clasificar como fibras estructurales, aquellas que proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa (en el caso de las fibras estructurales, la contribución de las mismas puede ser considerada en el cálculo de la respuesta de la sección de hormigón), o como fibras no estructurales, a aquellas que sin considerar en el cálculo esta energía suponen una mejora ante determinadas propiedades como por ejemplo el control de la fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros” (Anejo 14. EHE-08)

“Las fibras individualmente, o como grupo, deberán tener un coeficiente de Poisson similar al del hormigón si se quiere tener en cuenta el efecto red a nivel estructural.” (Anejo 14. EHE-08)

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS FIBRAS MÁS COMUNES				
Material	Densidad (g/mm ³)	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 2. Características mecánicas de las fibras más comunes (Revista hay nº183, libro Hormigón, M Fernández Cánovas)

2.3.4.1 Fibras de acero

Estas fibras deberán ser conformes con UNE 14889-1 y, según el proceso de fabricación se clasifican en:

- GRUPO I: alambres estirados en frío
- GRUPO II: laminas cortadas
- GRUPO II: extractos fundidos
- GRUPO IV: conformados en frío
- 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.”(UNE 14889-1)

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	l, l_d (si es aplicable)	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$
>30 mm			$\pm 1,5$ mm
≤ 30 mm			
Diámetro (equivalente)	d	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$
>0,30 mm			$\pm 0,015$ mm
$\leq 0,30$ mm			
Relación	λ	$\pm 15\%$	$\pm 7,5\%$
Legenda			
l	longitud de la fibra, en mm	d	diámetro o diámetro equivalente de la fibra, en mm
l_d	longitud desarrollada de la fibra, en mm	λ	= l/d y es la relación de aspecto de la fibra

Tabla 3. 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 ó red de fibras. El espaciamento entre fibras se reduce cuando la fibra es más fina, siendo más eficiente y permitiendo una mejor redistribución de la carga ó de los esfuerzos.” (Anejo 14. EHE-08)

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.

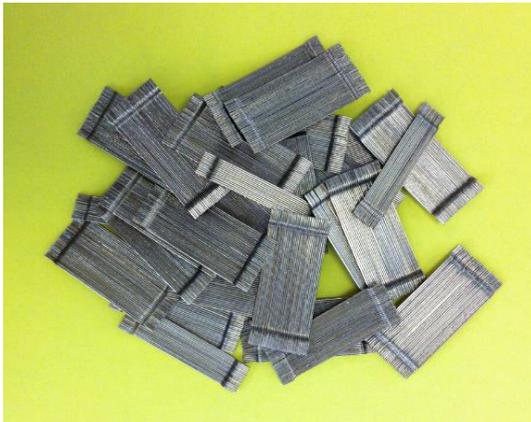


Imagen 1. Ejemplos de fibras metálicas



Imagen 2. Ejemplos de fibras metálicas

2.3.4.2 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).

Según su sección se clasifican en:

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

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

Tabla 4. Tolerancias en la longitud y el diámetro de la fibra (UNE 14889-2)

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.



Imagen 3. Ejemplo de fibras poliméricas

2.3.4.2.1 Ventajas de las fibras poliméricas frente a las fibras metálicas

En el pasado las únicas fibras empleadas con carácter estructural eran las metálicas, pero actualmente también se emplean las fibras poliméricas con capacidad estructural ya contempladas en el anejo 14 de la EHE-08. Este tipo de fibras presenta claras ventajas con respecto a las fibras metálicas:

- Menor dosificación en kilos de fibra/m³ 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 m³ 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 alongamiento.
- Aumento de la impermeabilidad

2.3.4.3 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 cementicia 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.” (Anejo 14. EHE-08)



Imagen 4. Ejemplo de fibras poliméricas

2.3.5 Adherencia fibras-matriz

Según M-2 ACHE, para cada tipo de fibra, la adherencia fibra-matriz es función de la microestructura de la zona de transición; es decir, depende más de la tendencia a la exudación de la matriz que de la resistencia de ésta. Y como la exudación está íntimamente relacionada con la cantidad de agua de amasado, ésta da una mejor relación con la capacidad adherente de las fibras que la resistencia de la matriz (Bentur, 1986). Por lo tanto, resulta vital para mejorar la eficacia del refuerzo disminuir la relación agua/cemento, incrementando así la resistencia a tracción y la microdureza de la zona de transición (Wei, 1986).

El efecto de las fibras es mucho mayor tras la fisuración de la matriz, pues entonces cosen las fisuras, retrasando y haciendo más dúctil, asó, el fenómeno de agotamiento del material compuesto. En esta situación, la respuesta de las piezas es gobernada, sobre todo, por la resistencia de las fibras al *pull-out*, propiedad que es la principal aportación de las fibras a la tenacidad del material (capacidad de absorción de energía) (Naaman, 1991 a).

En fibras lisas de sección circular, el incremento de la fuerza P provoca un desplazamiento del extremo de la fibra, que conduce a su despegue progresivo de la matriz a lo largo de la interfase.

Cuando la longitud de despegue se iguala a la longitud l de la fibra, se moviliza un mecanismo dinámico de arrancamiento, sumándose al desplazamiento del extremo libre el deslizamiento del extremo embebido (Naaman, 1991 a).

Por tanto, la contribución a la tenacidad de la rama ascendente de la curva carga-deslizamiento es mucho menor que la de la rama descendente, lo que indica la importancia del rozamiento que comienza tras el despegue total de las fibras (Naaman, 1991 a).

Se ha concluido, pues, que, para elevar la absorción de energía, hay que evitar la rotura de las fibras (Shah, 1987) (ACI committee 544, 1988 a)

La adherencia fibras-matriz aumenta con la esbeltez de las fibras. En tal sentido, se ha comprobado que utilizando fibras de extremos conformados, por ejemplo, la resistencia al arrancamiento de un conjunto de tres fibras de esbeltez igual a 100 es un 50% mayor que la obtenida al ensayar un sola fibra de esbeltez a 75 y con el mismo volumen que el conjunto de las tres fibras anteriores (Giaccio, 1986).

Las fibras aleatoriamente distribuidas en la masa no suelen ser ortogonales a las fisuras que van apareciendo en la matriz. En consecuencia, cuando una fisura se ensancha, las fibras que la atraviesan se ven sometidas a una fuerza de arrancamiento, que genera los mecanismos de respuesta que se detallan a continuación (Ouyang, 1994):

En la práctica, la longitud de las fibras es inferior a la crítica, con lo que se suele agotar su capacidad adherente y no su resistencia a tracción. En consecuencia, los dispositivos de anclaje especiales (fibras de extremos conformados o ensanchados, por ejemplo) mejoran los mecanismos adherentes de respuesta, incrementando la resistencia y la tenacidad del compuesto, y también su docilidad en estado fresco, pues permiten reducir la esbeltez de las fibras (Johnston, 1980). Así, de los diversos intentos efectuados para mejorar las propiedades adherentes de las fibras, el más efectivo ha sido su deformación mecánica (Banthia, 1994 b).

2.4 Características del hormigón autocompactante (HAC) y del hormigón reforzado con fibras (HRF).

2.4.1 Propiedades del hormigón endurecido

“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.” (Anejo 17. EHE-08)

“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.” (Anejo 17. EHE-08)

“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.” (Anejo 17. EHE-08)

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” (Anejo 14. EHE-08)

“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%.” (Anejo 14. EHE-08)

“En sollicitaciones de compresión, el diagrama tensión-deformación del hormigón con fibras no se modifica respecto al del articulado, ya que se puede considerar que la adición de las fibras no varía de forma significativa el comportamiento del hormigón en compresión.” (Anejo 14. EHE-08)

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.

2.4.2 Módulo de deformación longitudinal del hormigón.

“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 esta Instrucción 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.” (Anejo 17. EHE-08)

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

2.4.3 Retracción del hormigón.

Debido a la composición del hormigón autocompactante, puede presentarse una mayor retracción. Como 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. 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.

Debido a las bajas relaciones agua/ligante, cobra especial importancia el curado del hormigón autocompactante. En el hormigón autocompactante, 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, la mayor cantidad de material fino y las bajas relaciones agua/finos, que provocan mayor calor de hidratación. La utilización de cenizas volantes y/o filler calizo puede contribuir a la reducción de la retracción endógena.

Un alto contenido de cemento conducirá a un mayor calor de hidratación, una consecuente dilatación y una posterior retracción térmica, lo cual podría resultar crítico de cara a la fisuración. Se deben emplear las mismas precauciones que para el hormigón de compactación convencional.

En cuanto al HRF, se ha demostrado que las deformaciones debidas a la retracción del hormigón de compactación convencional son del mismo orden de magnitud que las del HRF. Sin embargo, cabe mencionar, que si se impide la deformación manteniendo las dimensiones de la pieza constantes (retracción restringida) se logra que las tensiones de tracción aumenten más lentamente en el caso de lo HRF. Mediante esta reducción del aumento de las tensiones de tracción se consigue que disminuya el riesgo de fisuración produciéndose un menor número de fisuras en el caso de que fisure el HRF. Partiendo de lo anterior, se puede aumentar el modo significativo la distancia entre juntas de contracción. (ACI Committee 544)

2.4.4 Fluencia del hormigón.

En general, puede utilizarse la formulación incluida en el Artículo 39.8 de esta Instrucción. 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 podrían 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. (Anejo 17. EHE-08)

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”. (Anejo 14. EHE-08)

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

2.4.5 Resistencias mecánicas del hormigón.

“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. Por lo tanto, pueden aplicarse las relaciones entre ambas resistencias propuestas por el Artículo 39.1. de esta Instrucción para la resistencia a tracción y a flexotracción.” (Anejo 17. EHE-08)

“A partir de estos valores se determinará el diagrama de cálculo a tracción según lo indicado en el Artículo 39. También, se podrán incorporar otros diagramas que definan dichas ecuaciones constitutivas de forma directa siempre y cuando los resultados vengan avalados por campañas concluyentes de tipo experimental y bibliografía especializada.” (Anejo 14. EHE-08)

Las propiedades mecánicas del HRF de mayor interés son las relacionadas con la tracción, la flexión, el cortante y la compresión a pesar de que el hormigón resiste las compresiones por sí solo.

Otras propiedades de menor interés son las relacionadas con la torsión y la tenacidad.

2.4.5.1 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 brusco.

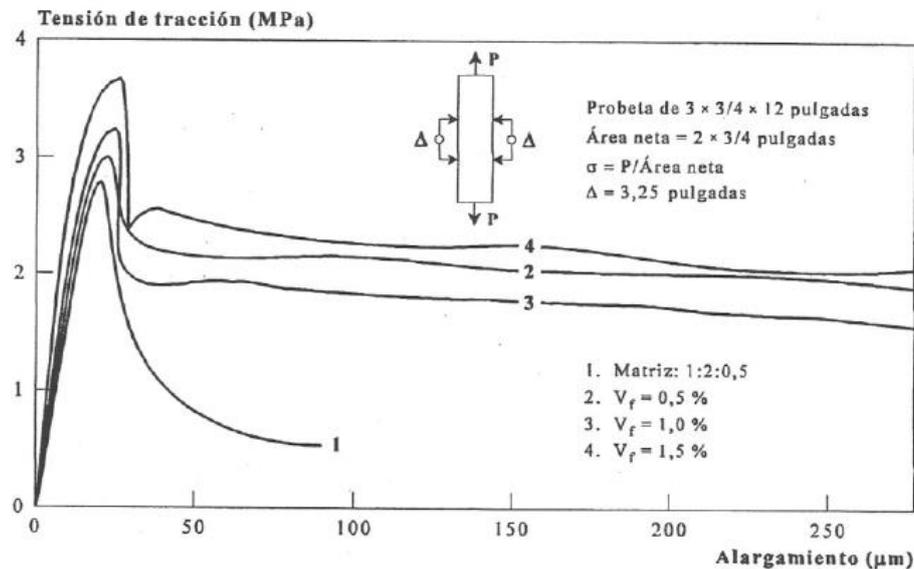


Figura1. Diagrama carga-deformación. (ACHE)

Este comportamiento está directamente relacionado con:

- Orientación de las fibras: La orientación de las fibras no se puede controlar, es completamente aleatoria, no pudiendo así determinar la cuantía en la que colaboran las mismas. La adición de fibras al hormigón evita la formación de grietas y fisuras y la propagación de las mismas.
- Relación de forma y 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.

Por su comportamiento después de la fisuración, la tenacidad del hormigón con fibras solicitado a tracción es mayor que la matriz por: la energía consumida por el rozamiento fibra-matriz, la flexión de las fibras inclinadas ancladas a ambos lados de las fisuras.

2.4.5.2 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.

CARGA

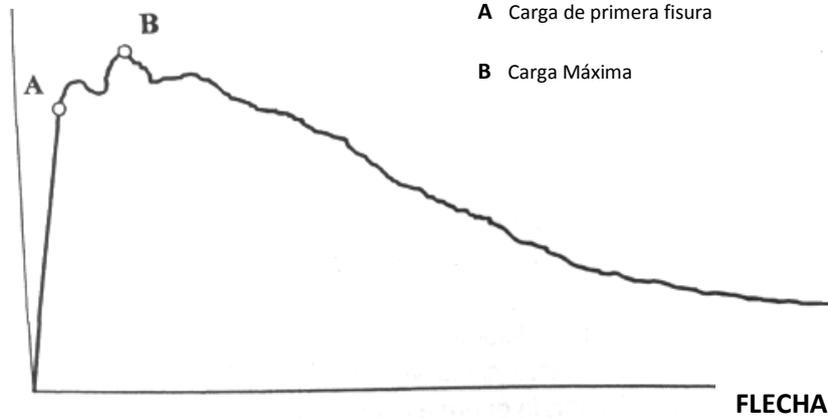


Figura2. Diagrama carga-flecha. (ACHE)

“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.” (ACI Committee 544)

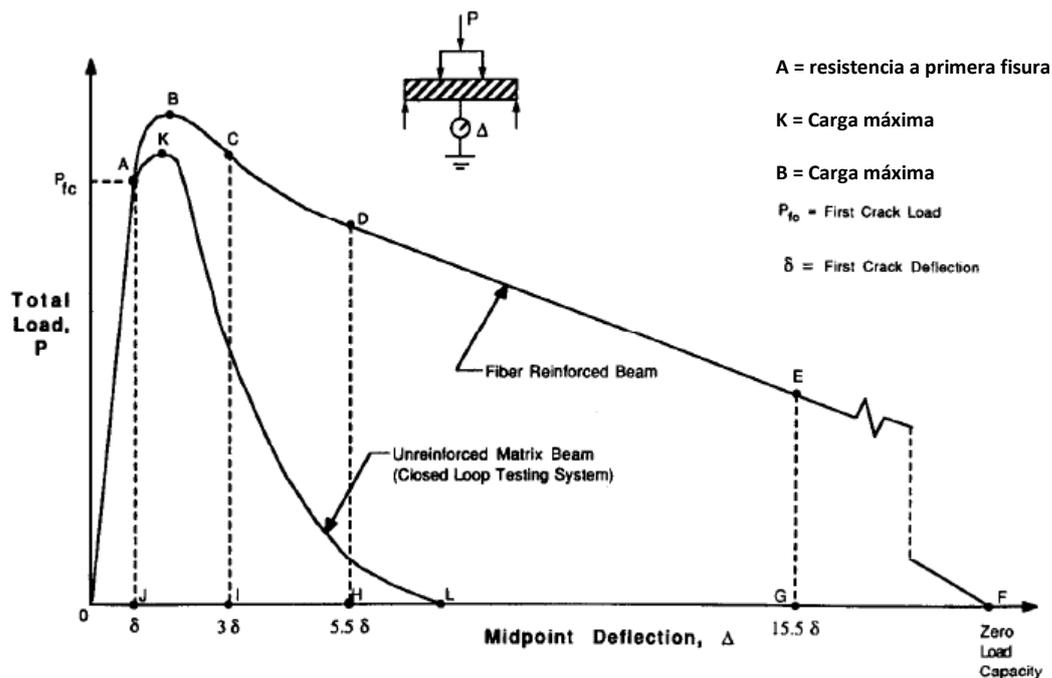


Figura3. Diagrama carga-deformación. (ACI Committee 544)

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/m³.

Según la ACHE sobre la resistencia a rotura por flexotracción 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

2.4.5.3 Resistencia a cortante

El análisis del comportamiento a cortante del HRF es objeto de amplios estudios, la causa es la dificultad que conlleva la individualización total de lo que aporta la influencia de la fibra a la acción cortante. Los parámetros fundamentales que influyen en el cortante son: tipo de fibra discontinua, fracción de volumen, relación área-diámetro y eficiencia. Más adelante en el **punto 2.8** estudiaremos con profundidad la resistencia a cortante del HRF.

2.4.5.4 Resistencia a compresión

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

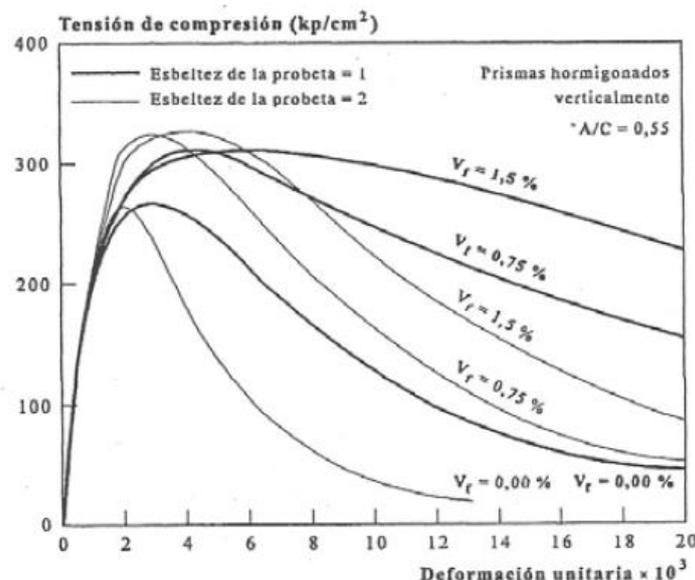


Figura 4. Diagrama tensión-deformación. (ACHE)

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

TIPO DE HORMIGÓN PROYECTADO	R. COMPRESIÓN (MPA)	
	7 días	28 días
Hormigón sin fibras	44,0	72,5
Hormigón con fibras sintéticas (Dosificación en kg/m ³)	4,6	61,9
	5,0	59,4
	9,3	56,3
	14	55,5

Tabla 5. Resultados de resistencia a compresión (Morgan et al. 1999)

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.

2.4.5.5 Resistencia a torsión

La resistencia a torsión de un elemento de hormigón reforzado con fibras va a estar condicionado al volumen de fibras que posea y a la relación l_f/d_f , es decir, a la esbeltez de las mismas.

2.4.5.6 Tenacidad

“Tal como se ha manifestado anteriormente, la resistencia de un hormigón con fibras no disminuye bruscamente a partir del inicio de la fisuración conduciendo a una disipación progresiva de la energía durante el proceso de rotura. La tenacidad del material se puede definir como el parámetro que cuantifica esta capacidad de absorción de energía. Puede considerarse también como el inverso de la fragilidad teniendo en cuenta que un material frágil no posee ninguna capacidad de absorción de energía a partir de formación de la fisura y presenta una rotura brusca. Aunque no se utiliza la tenacidad directamente como parámetro de cálculo, su caracterización es fundamental para representar el efecto de la incorporación de las fibras en el hormigón.” (Monografía CIMNE, N°53, Mayo 2000)

Por tanto, si se entiende por tenacidad la cantidad de energía necesaria para producir un deterioro o la rotura del material la variable que más influye es la capacidad adherente de las fibras.

Para la caracterización de la capacidad de absorción de energía se han desarrollado distintos ensayos de carga como los de compresión, flexotracción y tracción directa, de los cuales el más utilizado es el de flexotracción.

2.4.6 Docilidad del hormigón.

“La docilidad del hormigón autocompactante no puede ser caracterizada por los medios descritos en el artículo 31.5 de esta Instrucción para el hormigón convencional. 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.” (Anejo 17. EHE-08)

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.” (Anejo 14. EHE-08)

2.4.7 Durabilidad del hormigón.

Como consecuencia de la ausencia de vibración y del uso de adiciones y fillers en el HAC, se obtiene una interfase pasta-árido más densa. Todo esto junto con la mayor compacidad de la estructura granular provoca una reducción en la velocidad de ataque de los agentes agresivos.

A su vez, la ausencia de vibración dotará al hormigón de en una capa exterior de recubrimiento de mayor densidad y, por tanto, menos permeabilidad.

El empleo de HRF en las clases de exposición IIIb, IIIc y IV y F, deberá justificarse mediante pruebas experimentales en el caso del empleo de fibras de acero al carbono.

En caso de las clases de exposición Qa, Qb y Qc, las fibras de acero y sintéticas podrán emplearse previo estudio de la no reactividad de los agentes químicos con dichos materiales distintos del hormigón.

2.5 Ensayos hormigón

2.5.1 Ensayos hormigón fresco

Los ensayos nos ayudan a identificar la autocompactabilidad del hormigón determinando la fluidez, velocidad y viscosidad del HAC. Teniendo en cuenta también, su capacidad de llenado de espacios dentro del encofrado sin ayuda de vibración conservando la homogeneidad.

Estos ensayos se podrían clasificar del siguiente modo según la IECA:

- Ensayos para la medida de las propiedades plásticas.

Método de ensayo	Método de ensayo
Caja en "L"	Capacidad para el paso y resistencia a formar obstrucciones
Caja en "U"	
Anillo en "J"	
Ensayo de flujo T50	Resistencia a la segregación, estabilidad y asentamiento.
Índice visual de estabilidad IVE	
Extensión de flujo	Resistencia a la migración de aire. Viscosidad

Tabla 6. Ensayos sobre medida de las propiedades (IECA, 2005).

- Ensayos para situaciones especiales.

Método de ensayo	Método de ensayo
Ensayo de estabilidad de pantalla	Segregación estática. Resistencia al asentamiento.
Ensayo de Bleeding	Resistencia a la segregación dinámica.
Embudo en "V"	Capacidad de paso. Resistencia a formar bloqueos.
Anillo en "J"	Segregación dinámica. Capacidad de paso.

Tabla 7. Ensayos especiales (IECA, 2005).

Según la EHE-08 los ensayos específicos para determinar la docilidad de un hormigón autocompactante son los siguientes:

- 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.

Según la EHE-08 para la determinación de la segregación no existe ningún ensayo normalizado, así pues la comprobaremos observando la apariencia de la "torta" al realizar el ensayo de escurrimiento. Esta debe presentar una homogeneidad y uniformidad del árido grueso sin mostrar segregación o exudación en el perímetro.

Posteriormente a la EHE-08 se ha aprobado una nueva norma, UNE 12350-EN 11 para la determinación de la resistencia a la segregación del hormigón, **ensayo de segregación por tamiz**.

Ensayo	UNE según EHE-08	UNE-EN actualizada
De escurrimiento	83.361: 2007	12350-8:2011
Embudo en V	83.364: 2007	12350-9:2011
Anillo J	83.362: 2007	12350-12:2011
Caja en L	83.363: 2007	12350-10:2011
De segregación por tamiz	-	12350-11:2011

Tabla 8. Normativa actualizada

Previamente a la explicación de los ensayos en estado fresco para el hormigón autocompactante se define:

- **“Fluidez:** Facilidad de flujo del HAC en estado fresco no confinado por el encofrado y/o el refuerzo.
- **Resistencia a la segregación:** Capacidad del HAC de mantener su composición homogénea en estado fresco.
- **Escurrecimiento:** Diámetro medio del HAC en estado fresco extendido a partir de un cono convencional de medida del asentamiento.
- **Viscosidad:** Resistencia a fluir del HAC en estado fresco una vez ha comenzado el flujo.
- **Capacidad de paso:** Capacidad del HAC en estado fresco de fluir sin segregación o bloqueo a través de aberturas estrechas como los espacios entre las barras de acero de refuerzo.” (UNE-206-9:2013)

Para la toma de muestra de los siguientes ensayos tendremos en cuenta las especificaciones marcadas en la UNE-EN 12350-1.

Los ensayos a realizar en el hormigón fresco son:

2.5.1.1 Ensayo de determinación de la densidad

Este ensayo contemplado en la norma UNE-EN 12350-6 trata de valorar la densidad del hormigón en estado fresco.

El hormigón fresco se compacta en un recipiente rígido y estanco al agua cuya masa y volumen son conocidos, y una vez compactado se pesa.

Este ensayo puede no ser aplicable a hormigones muy consistentes que no pueden compactarse por vibración normal.

2.5.1.2 Ensayo de determinación de contenido de aire

Este ensayo contemplado en la norma UNE-EN 12350-7 pretende cuantificar el aire ocluido en la masa del hormigón en estado fresco. Existen dos métodos para la determinación del contenido de aire en el hormigón.

- Método de la columna de agua
- Método del manómetro

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.

2.5.1.3 Ensayo del escurrimiento

Este ensayo contemplado en la norma UNE-EN 12350-8 describe el procedimiento para la determinación del escurrimiento y del 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 40 mm.

2.5.1.4 Ensayo del embudo en V

Este ensayo contemplado en la norma UNE-EN 12350-9 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.

2.5.1.5 Ensayo del anillo J

Este ensayo contemplado en la norma UNE-EN 12350-12 trata de determinar: 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 t_{50} , del hormigón autocompactante al pasar por el anillo japonés.

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

Este ensayo del anillo japonés es una alternativa al ensayo de la caja en L de la UNE-EN 12350-10.

Existen dos tipos de anillo para la realización del ensayo, su uso 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.

2.5.1.6 Ensayo de la caja en L

Este ensayo contemplado en la norma UNE-EN 12350-10 evalúa 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.

2.5.1.7 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.

Ya que no está basado en ninguna norma se deberán establecer unos criterios previos para este ensayo.

2.5.1.8 Ensayo de segregación por tamiz

Este ensayo contemplado en la norma UNE-EN12350-11 tiene como finalidad determinar la resistencia a la segregación del hormigón.

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

2.5.1.9 Requisitos generales para la autocompactabilidad según la EHE-08

“La Tabla siguiente muestra los rangos admisibles de los parámetros de autocompactabilidad que deben cumplirse, en cualquier caso, según los diferentes métodos de ensayo. “

Ensayo	Parámetro medido	Rango admisible
Escurrimiento	T50	$T50 \leq 8 \text{ seg}$
	df	$550 \leq df \leq 850 \text{ mm}$
Embudo en V	TV	$4 \text{ seg} \leq TV \leq 20 \text{ seg}$
Caja en L	CbL	$0,75 \leq CbL \leq 1,00$
Escurrimiento con anillo J	djf	$\geq df - 50 \text{ mm}$

Tabla 9. Requisitos generales para la autocompactabilidad (Anejo 17.EHE-08)

2.5.2 Ensayos hormigón endurecido

2.5.2.1 Ensayo por compresión simple en probetas cilíndricas de HRF

Este ensayo contemplado en las normas UNE-83507 y UNE 12390-3 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.

2.5.2.2 Determinación del módulo de elasticidad a compresión

Este ensayo contemplado en la norma 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.

2.5.2.3 Determinación del índice de tenacidad a compresión

Este ensayo contemplado en la norma UNE-83508 sirve para determinar la tenacidad a compresión del hormigón reforzado con fibras.

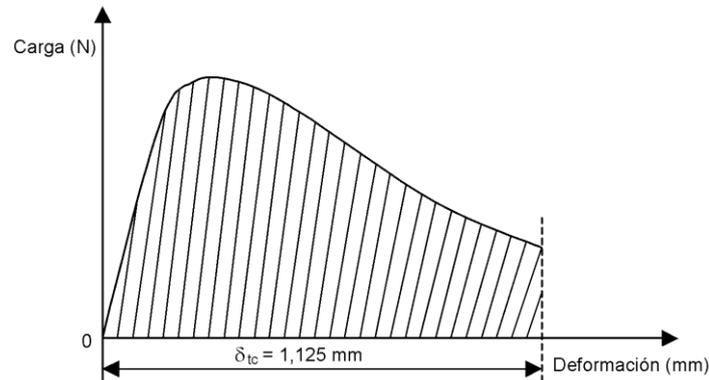


Figura. 5 Curva carga-deformación

Se define como Tenacidad a compresión el área limitada por la curva carga-deformación desde el origen 0, el eje de abscisas y la ordenada correspondiente a una deformación de 1,125 mm (0,75% de la base de medida, siendo ésta de 15 cm).

2.5.2.4 Determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura

Este ensayo contemplado en la norma UNE-83510 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.

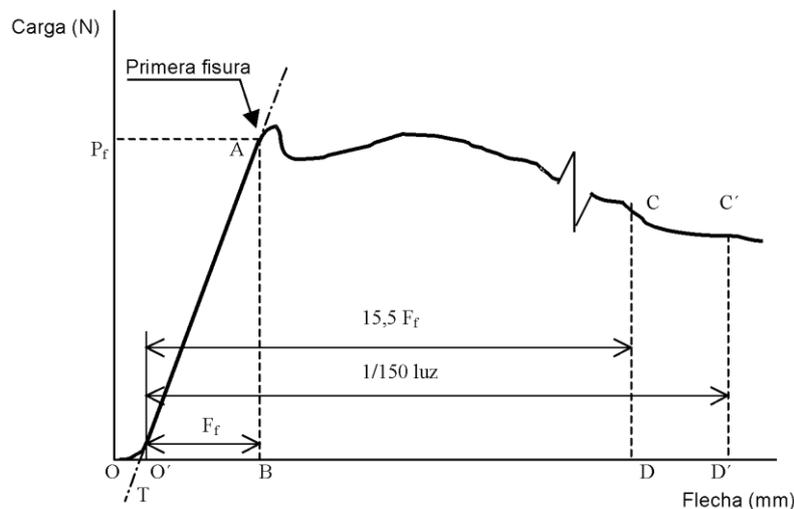


Figura. 6 Determinación de la tenacidad a flexotracción

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

Este ensayo contemplado en la norma UNE-EN 14651:2005+A1 sirve para determinar la resistencia a la tracción por flexión del hormigón con fibras 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.

Para este ensayo es necesario tener claros los siguientes conceptos:

- Desplazamiento del borde de la fisura (CMOD, crack mouth opening displacement): Desplazamiento lineal, medido por un transductor instalado sobre un prisma sometido a una carga puntual centrada F .
- Flecha: Desplazamiento lineal, medido por un transductor sobre un prisma sometido a una carga puntual centrada F .
- Límite de proporcionalidad (LOP, limit of proportionality): Tensión en el fondo de la entalla que se supone actúa, en el caso de una distribución lineal de tensiones, en una sección no agrietada del centro de vano de un prisma sometido a una carga puntual centrada F_L .
- Resistencia residual a la tracción por flexión: Tensión ficticia en el fondo de la entalla que se supone actúa, en el caso de una distribución lineal de tensiones, en una sección no agrietada en el centro de vano de un prisma sometido a una carga puntual centrada F_j correspondiente a $CMOD_j$ donde $CMOD_j > CMOD_{F_L}$ o $\delta_j > \delta_{F_L}$ ($j = 1, 2, 3, 4$).

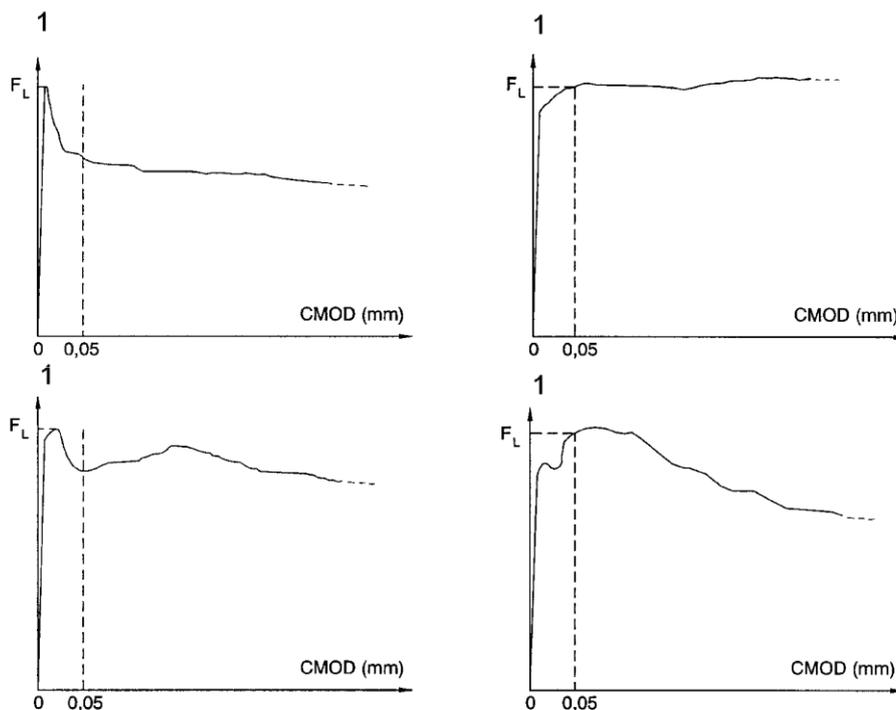


Figura 7. Diagramas de carga-CMOD y F_L

El comportamiento a tracción del hormigón con fibras se evalúa en términos de valores de la resistencia residual a la tracción por flexión determinados a partir de la curva carga-desplazamiento del borde de la fisura o de la curva carga-flecha, obtenida aplicando una carga puntual centrada sobre un prisma con entalla simplemente apoyado.

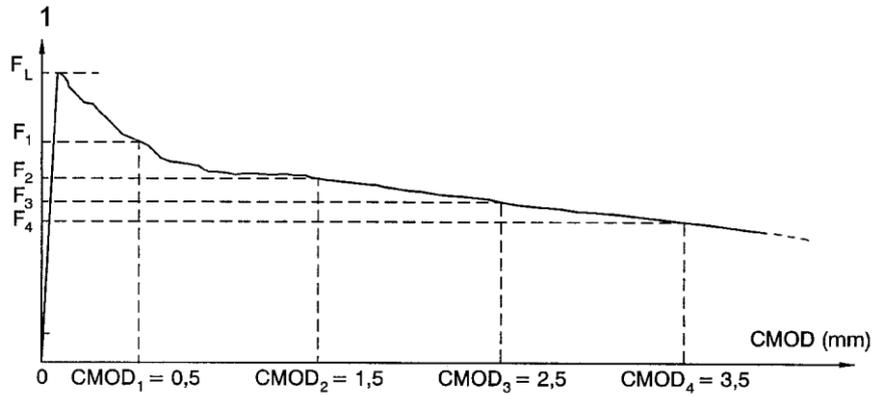


Figura 8. Diagrama carga-CMOD y F_j ($j = 1, 2, 3, 4$)

2.6 Tipificación de los hormigones según la EHE-08

2.6.1 Hormigón autocompactantes Anejo 17 (EHE-08)

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, (como, por ejemplo, HA-35/AC/20/IIIa), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$T-R/AC/TM/A$$

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:

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

donde:

- T** será HM para hormigón en masa, HA hormigón armado y HP hormigón pretensado
- R** resistencia característica especificada en N/mm^2
- TM** tamaño máximo del árido en mm (según Art. 28.2 EHE-08)
- A** designación del ambiente (según Art. 8.2.1 EHE-08)

CLASE ESPECÍFICA DE EXPOSICIÓN			
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso
No agresiva		I	Ninguno
Normal	Humedad alta	IIa	Corrosión de origen diferente de los cloruros
	Humedad media	IIb	
Marina	Aérea	IIIa	Corrosión por cloruros
	Sumergida	IIIb	
	En zona de carrera de mareas y en zonas de salpicaduras	IIIc	
Con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	Corrosión por cloruros
Química agresiva	Débil	Qa	Ataque químico
	Media	Qb	
	Fuerte	Qc	
Con heladas	Sin sales fundentes	H	Ataque hielo – deshielo
	Con sales fundentes	F	Ataque por sales fundentes
Erosión		E	Abrasión cavitación

Tabla 10. Clases de exposición

AC-E clase de escurrimiento según:

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

Tabla 11. Clases de escurrimiento

AC-V clase de viscosidad según:

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	$2'5 \text{ seg} < T50 \leq 8 \text{ seg}$	$10 \text{ seg} \leq T_v \leq 20 \text{ seg}$
AC-V2	$2 \text{ seg} < T50 < 8 \text{ seg}$	$6 \text{ seg} \leq T_v \leq 10 \text{ seg}$
AC-V3	$T50 \leq 2 \text{ seg}$	$4 \text{ seg} \leq T_v \leq 6 \text{ seg}$

Tabla 12. Clases de viscosidad

AC-RB clase de resistencia al bloqueo según:

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	$d_{Jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$, 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	$d_{Jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$, con un anillo de 20 barras	$\geq 0,80$, con 3 barras

Leyenda:

df representa el escurrimiento en el ensayo según UNE 83361

DJf representa el escurrimiento en el ensayo del anillo J, según UNE 83362

Tabla 13. Clases de resistencia al bloqueo

En el caso de que el hormigón deba pasar por zonas con espesores inferiores a 60 mm, se deberá analizar el comportamiento experimentalmente, diseñando elementos que permitan valorar la resistencia específica al bloqueo para el caso concreto.

Se considera la clase de autocompactabilidad AC-E1 en los siguientes casos:

- Estructuras no muy fuertemente armadas
- Estructuras en las que el llenado de los encofrados es sencillo, el hormigón puede pasar por huecos amplios y los puntos de vertido del mismo no exige que se desplace horizontalmente largas distancias en el interior del encofrado
- Elementos estructurales en que la superficie no encofrada se separa ligeramente de la horizontal

Se recomienda la clase de autocompactabilidad AC-E3 en los siguientes casos:

- Estructuras muy fuertemente armadas.
- Estructuras en las que el llenado de los encofrados es muy difícil, el hormigón debe pasar por huecos muy pequeños y los puntos de vertido del mismo exigen que se desplace horizontalmente distancias muy largas en el interior del encofrado.
- Elementos estructurales horizontales en los que es muy importante conseguir la autonivelación del propio hormigón.
- Elementos estructurales muy altos, de gran esbeltez y muy fuertemente armados.

2.6.2 Hormigón reforzado con fibras Anejo 14 (EHE-08)

Los hormigones se tipificarán de acuerdo con el siguiente formato:

$$\mathbf{T - R / f-R1-R3 / C / TM-TF / A}$$

donde:

- 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^2
- f** Indicativo del tipo de fibras que será A en el caso de fibras de acero, P en el caso de fibras poliméricas y V en el caso de fibra de Vidrio
- R1,R3** Resistencia característica residual a flexotracción especificada $f_{R,1,k}$ y $f_{R,3,k}$, en N/mm^2
- C** Letra inicial del tipo de consistencia (Art. 31.5 EHE-08)

Tipo de consistencia	Asentamiento en cm
Seca (S)	0 – 2
Plástica (P)	3 – 5
Blanda (B)	6 – 9
Fluida (F)	10 – 15
Líquida (L)	16 - 20

Tabla 14. Asentamiento según consistencia

- TM** Tamaño máximo del árido en milímetros (Art. 28.2 EHE-08)
- TF** Longitud máxima de la fibra, en mm
- A** Designación del ambiente (Art. 8.2.1 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 30.5:

$$\mathbf{1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 - 3,0 - 3,5 - 4,0 - 4,5 - 5,0 - \dots}$$

En la cual las cifras indican las resistencias residuales a flexotracción características especificadas del hormigón a 28 días, expresada en N/mm^2 .

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:

$$\mathbf{T - D - G/f/C/TM/A}$$

donde:

G es el contenido de fibra, en kg/m^3 de hormigón, prescrito por el peticionario.

El resto de los parámetros tiene el significado que se indica en el Articulado. 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.

2.7 Materiales empleados en la fabricación de hormigones autocompactantes reforzados 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.” (Anejo 17. EHE-08)

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.

A continuación se describen los materiales empleados en la fabricación del hormigón autocompactante.

2.7.1 Áridos

Se pueden emplear los mismos áridos que para el hormigón convencional, ya que no se requiere de ninguna especificación físico-química en particular aunque se debe prestar una especial atención a la calidad y distribución de los tamaños de los mismos porque influirán en su comportamiento en el estado fresco del hormigón autocompactante.

Por razones económicas, en los hormigones convencionales se busca reducir el volumen de partículas finas y aumentar el de partículas más gruesas. En el hormigón autocompactante las partículas finas en mayor medida son las que aportan la autocompactabilidad, ya que la habilidad para atravesar zonas muy armadas se rige por el volumen de mortero y la proporción de árido grueso de la mezcla.

2.7.1.1 Árido grueso

No existen requisitos especiales para el árido grueso, la única especificación que requiere el hormigón autocompactante es la limitación del árido grueso para conseguir una mezcla más homogénea y evitar problemas de bloqueo en el paso del hormigón en estado fresco entre las armaduras.

Según el Anejo 17 de la EHE-08, el tamaño máximo permitido es de 25 mm, aunque no se aconseja superar los 20 mm. Los tamaños máximos habituales están comprendidos entre 12-16 mm.

2.7.1.2. Arena

Se pueden emplear todas aquellas arenas que cumplan con las especificaciones que se establecen en la EHE-08, prestando especial atención a los finos menores que 0,125mm, puesto que las partículas por debajo de este tamaño afectan a las propiedades de autocompactabilidad del hormigón. No es necesario que sea una arena de granulometría continua debido a que, para obtener la autocompactabilidad, hay que añadir partículas finas.

Las arenas rodadas favorecen la trabajabilidad del hormigón debido a su menor relación superficie/volumen, en cambio las arenas de machaqueo incrementan la fricción de la mezcla, por lo que requieren más agua o aditivo superplastificante para conseguir los mismos resultados que con las primeras.

La dosificación en el hormigón autocompactante se realiza ajustando la relación agua/finos inferiores a 0,125mm. Al aumentar la cantidad de finos aumenta la viscosidad del hormigón. Esta es una de las razones por las que la proporción de arena entre el volumen mayor de áridos es mayor que en un hormigón convencional.

2.7.1.3. Filler mineral

El filler mineral se emplea en el HAC para dar cohesión y aumentar el volumen de pasta con el fin de dar cohesión y trabajabilidad al hormigón. En consecuencia se evita la exudación del agua y la segregación de los áridos gruesos.

La finura, la granulometría y la naturaleza del filler influyen en el comportamiento del hormigón autocompactante. Debe de tenerse especial cuidado con la finura de este ya que incide sobre la cantidad de agua y/o aditivo superplastificante a emplear.

La granulometría de este tipo de material se define en la Tabla 1.1 de acuerdo con la norma UNE-EN 12620:2002. La tendencia general fija que las partículas cuyo diámetro sea inferior a 0,125 mm se consideren como material fino incluyéndose en ellas el cemento, el filler mineral y las adiciones.

Tamaño del tamiz (mm)	% en masa que pasa
2	100
0.125	85 a 100
0.063	70 a 100

Tabla 15. Granulometría del filler mineral (UNE12620)

En el Anejo 17 de la EHE-08, se recomienda que la cantidad máxima de finos (teniendo en cuenta el filler y los finos de los áridos) menores de 0,063 mm sea de 250 kg/m³. Cuando se use un cemento que tenga como adición complementaria la caliza, esta adición hay que tenerla en cuenta en el cómputo total de la cantidad de finos.

Entre los distintos tipos de fillers existentes destacan: el filler calizo, el filler 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.

El filler calizo no reacciona químicamente con otros componentes pero sí que mejora la trabajabilidad del hormigón. (Neville, 1995) Existen otros estudios que dicen que el filler calizo sí

que interviene en los procesos de hidratación, esta alteración se demostró mediante ensayos midiendo la generación de calor. (Pera 1999 y Poppe et al. 2003) Además, indica que el filler calizo funciona como un catalizador en el proceso de hidratación, actuando como un centro de nucleación, aunque no se producen reacciones químicas con otros componentes. (Billberg 2001)

El efecto que se busca al incorporar filler a la dosificación se puede conseguir también con el empleo de humo de sílice, escoria granulada y ceniza volante que poseen una actividad puzolánica y por tanto reciben el tratamiento de adiciones.

2.7.2. Cementos

No existen requisitos específicos en cuanto al tipo de cemento y, se pueden usar todos aquellos que cumplan con la vigente Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08). Los criterios a seguir en la elección del cemento para obtener un hormigón autocompactante son similares a los empleados en un hormigón convencional. Los cementos más habituales son los de tipo I, pero también se emplean los cementos con adiciones.

Se recomienda realizar ensayos de compatibilidad entre el cemento y el aditivo, ya que cada cemento tiene propiedades diferentes e interactúa de forma diferente con el aditivo.

La cantidad de cemento a utilizar oscila entre los 350 kg/m³ y 450 kg/m³. No se deben superar los 500 kg/m³ de cemento porque puede haber problemas de retracción por el excesivo calor de hidratación. Se puede disminuir la cantidad de 350 kg/m³ si se usa un cemento con adiciones activas (EFNARC, 2002).

2.7.3 Aditivos

El aditivo es un producto químico que se usa en la fabricación del hormigón para mejorar sus propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido o en ambos. Es un componente esencial en el hormigón autocompactante.

Los aditivos más usados en la fabricación del hormigón autocompactante son los superplastificantes o aditivos reductores de agua de alta actividad y los cohesionantes o agentes modificadores de viscosidad

Se pueden emplear más de un tipo de aditivo y en ese caso, al igual que ocurre con el hormigón convencional, es conveniente realizar pruebas de compatibilidad entre ellos y de estos con el cemento.

2.7.3.1. Superplastificantes

Los superplastificantes o reductores de alta actividad son aditivos cuyo fin es reducir el agua permitiendo una elevada trabajabilidad con una baja relación agua/cemento, de manera que garantiza un buen desarrollo de las propiedades mecánicas y de la durabilidad. El empleo de este tipo de aditivos es imprescindible en el hormigón autocompactante, especialmente de

los superplastificantes de nueva generación, basados en policarboxilatos, que son capaces de reducir el agua hasta en un 40%.

Además de la capacidad reductora de agua, otros criterios a considerar que condicionaran su elección son el mantenimiento de la autocompactabilidad en el tiempo, el desarrollo de resistencias tempranas y posible retraso de fraguado, el desarrollo de resistencias a largo plazo, la incorporación de aire o la presencia de otros aditivos químicos (ACHE2008)

	Tipo de consistencia	Relación agua/cemento
Superplastificantes convencionales (SNF, SMF)	Fluida – Líquida (hasta asentamiento = 20 cm)	$0,40 < a/c < 0,65$
Superplastificantes de nueva generación (PCE)	Líquida (hasta asentamiento = 25 cm) y hormigones autocompactantes	$0,28 < a/c < 0,65$

Tabla 16. Elección de aditivo superplastificante (MONOGRAFÍA 16 ACHE)

En el Artículo 29º de la Instrucción EHE-08 se limita el contenido de aditivo en un 5% del peso de cemento.

2.7.3.2. Agentes modificadores de viscosidad

Los aditivos cohesionantes o agentes modificadores de viscosidad son compuestos químicos cuyo objetivo es modificar la cohesión de la mezcla de hormigón para evitar la segregación y la exudación del agua.

Su uso no es indispensable en la fabricación del hormigón autocompactante si se dispone de la cantidad de finos suficiente, pero es muy aconsejable ya que mejora la robustez del HAC frente a cambios del contenido de agua y el módulo de finura de la arena.

El rango de dosificación de estos productos es muy variable y depende de la naturaleza del aditivo modificador de la viscosidad. En general, este suele variar entre el 0,05 – 2%.

2.7.3.3 Otros

Se pueden emplear cualquiera de los aditivos definidos en la norma UNE-EN 934-2:2002 dependiendo de los requerimientos de cada aplicación. Existen otros aditivos que se pueden emplear en el hormigón autocompactante que no están contemplados en dicha norma como son los aditivos reductores de retracción cuyo objetivo es la reducción de las deformaciones por retracción. Estos últimos proporcionan una disminución de la retracción por secado del hormigón de entre un 30 – 50 %.

2.7.4 Adiciones

Como ya se ha dicho anteriormente, se pueden emplear adiciones en lugar de filler para dar cohesión y trabajabilidad a la mezcla evitando la segregación de los áridos gruesos y la exudación del agua.

Según el Artículo 30º de la Instrucción EHE-08, las adiciones son materiales inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente que, finamente divididos, pueden ser añadidos al hormigón con el objetivo de mejorar alguna de sus propiedades. Sólo se contempla el empleo de ceniza volante y humo de sílice en cantidades no superiores al 35% y 10%, respectivamente, por peso de cemento. Y, además, se establece que sólo se pueden usar junto con un cemento tipo CEM I.

2.7.4.1 Ceniza volante

La ceniza volante es una adición puzolánica, se trata de un material con propiedades no definidas, ya que su composición química y tamaño varía mucho dependiendo de su procedencia. Su forma esférica contribuye a la fluidez del hormigón ya que se optimiza el empaquetamiento de las partículas sólidas en estado fresco proporcionando una alta cohesión a la mezcla.

Según la EHE-08, se limita el contenido en la mezcla de la ceniza al 35% del peso del cemento en elementos no pretensados y, al 20% para hormigón pretensado.

Además la Instrucción EHE-08 recomienda controlar la finura de las cenizas y medir la expansión por el ensayo de las agujas de Le Chatelier.

2.7.4.2 Humo de sílice

El humo de sílice, dada su extremada finura y riqueza en óxido de silicio tiene aplicación fundamentalmente en la fabricación de hormigones de alta resistencia. Se comporta como un filler que densifica la matriz del hormigón y, al igual que la ceniza volante, contribuye al desarrollo de la resistencia a largo plazo.

Además mejora las propiedades del hormigón en estado fresco incrementando la estabilidad frente a segregación y exudación. Es importante señalar que se produce un aumento en la demanda de agua debido a su alta superficie específica.

Según la EHE-08 la máxima cantidad de humo de sílice permitida es del 10% respecto al peso de cemento, pero se suele emplear aproximadamente el 8% por peso de cemento.

2.7.4.3. Otras adiciones

Existen otras adiciones no contempladas en la Instrucción EHE-08 como es la escoria granulada de alto horno. Son partículas que tienen un bajo calor de hidratación. Su empleo debe realizarse en bajas proporciones para evitar problemas de estabilidad.

El metacaolín y las puzolanas naturales deberán ser evaluados mediante ensayos previos para poder ser empleados en la fabricación del HAC.

2.7.5 Agua

No se requieren prescripciones específicas para la fabricación del hormigón autocompactante, salvo las generales que se establecen para el hormigón convencional en la Instrucción EHE-08:

“El agua utilizada, tanto para el amasado como para el curado de hormigón en obra, no debe contener ningún ingrediente perjudicial en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras a la corrosión.

En general, podrán emplearse todas las aguas sancionadas como aceptable con la práctica.

Cuando no se posean antecedentes de su utilización, o en caso de duda, deberán analizarse las aguas.”

2.7.6 Fibras

“La adición de fibras es admisible en hormigones en masa, armados o pretensados, y se puede hacer con cualquiera de los diversos sistemas, sancionados por la práctica, de incorporación de las fibras al hormigón.” (Anejo 14. EHE-08)

“El límite superior del contenido en fibras se fija en el 1,5% en volumen del hormigón. El empleo de dosificaciones muy elevadas exige modificar sensiblemente la estructura granular del hormigón. Para estos casos se recomienda la consulta de bibliografía especializada.” (Anejo 14. EHE-08)

2.7.7 Pigmentos

Los pigmentos son sólidos muy finos basados en óxidos metálicos, sirven para el coloreado tanto de los hormigones convencionales como de los autocompactantes. Debido a su elevada finura crean una masa más cohesiva, modificando así las propiedades reológicas del hormigón.

Puesto que son más propensos a la aparición de eflorescencias, es conveniente utilizar aditivos hidrófugos o específicos para evitar dicho efecto.

2.7.8 Ventajas y desventajas del uso de materiales

La composición del hormigón autocompactante reforzado con fibras es compleja, ya que hay que encontrar el equilibrio entre la docilidad y la trabajabilidad del hormigón autocompactante y la dosificación de fibras, ya que al añadirlas aumentamos su resistencia pero si no se realiza en la cantidad apropiada pueden formarse “erizos” provocando un descenso de las propiedades citadas anteriormente.

Si la cantidad de material es la correcta, presentará ciertas ventajas, sin embargo un exceso del mismo puede provocar ciertas desventajas, como pueden ser segregación, exudación y descohesión.

A continuación se exponen los pros y contras de cada uno de los componentes del hormigón autocompactante reforzado con fibras.

MATERIAL	HORMIGÓN FRESCO		HORMIGÓN ENDURECIDO	
	VENTAJAS	DESVENTAJAS (en exceso)	VENTAJAS	DESVENTAJAS (en exceso)
Cemento	Aporta finura a la mezcla. Evita zonas de aire ocluido	Aporta temperatura y favorece la evaporación del agua	Favorece la unión entre los elementos. Resistencia.	Provoca retracciones.
Agua	Favorece la trabajabilidad.	Provoca descohesión y segregación en la masa.	Medio acuoso para que continúe la reacción química.	Crea poros disminuyendo así la resistencia del hormigón.
Árido grueso	Puede provocar mayor expansión en la masa.	Empeora la trabajabilidad y provoca segregación.	Mejora la resistencia a compresión.	Crea poros internos reduciendo la capacidad resistente.
Árido fino	Aporta fluidez, cohesión y trabajabilidad.	---	Aporta compacidad y traba entre los materiales.	Reduce la resistencia
Filler	Aporta cohesión a la mezcla, evitando la segregación.	Suele acelerar el fraguado y dar una consistencia mas trabada.	Favorece la compacidad del hormigón.	---
Aditivo	Aporta gran docilidad al hormigón.	Efecto de duración determinado. En exceso aporta demasiada fluidez provocando descohesión y segregación.	---	---
Fibras	---	Propensas a crear erizos reduciendo la fluidez y trabajabilidad, creando una masa heterogénea.	Mejora resistencias y en mayor medida reduce la retracción plástica y las fisuras.	Favorece la oclusión de aire.

Tabla 17. Ventajas y desventajas de los materiales

2.8 Análisis del comportamiento a cortante en vigas

La fuerza a cortante viene a ser el resultado de la acción de fuerzas verticales que actúan en una sección determinada de una viga y tienden a cortarla. La fuerza a cortante resultante genera esfuerzos horizontales y verticales iguales, por lo que los momentos generados serán igualmente proporcionales impidiendo que la viga rote y generando esfuerzos de compresión y de tracción diagonal.

El efecto de las tensiones tangenciales, creadas por el cortante, es las tensiones principales de tracción con respecto a la directriz de la pieza. Para cargas reducidas, estas tensiones de tracción no superan la resistencia a tracción del hormigón, y es fácil calcular el estado tensional. Cuando aumentan las cargas el hormigón se fisura y se produce un complejo reajuste de tensiones entre hormigón y armaduras, que varía conforme la fisuración aumenta hasta llegar a la rotura. Esta puede producirse de diversas formas, que se representan esquemáticamente, para el caso de una viga esbelta, en la figura 9:

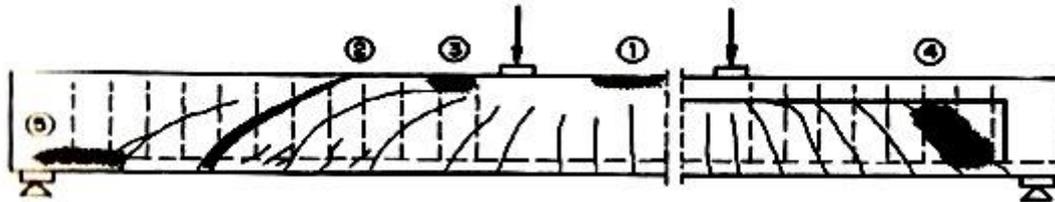


Figura 9. Formas de rotura de una viga esbelta. (Rüsch, 1972).

- **Rotura por flexión pura**, que se produce, en vigas armadas con cuantías normales, al alcanzarse una deformación excesiva de la armadura de tracción, que origina una subida de la fibra neutra hasta que el hormigón comprimido es incapaz de equilibrar las tracciones. Si la cuantía de la armadura en tracción es alta puede romperse el hormigón sin que la armadura llegue a alcanzar su límite elástico.

- **Rotura por cortante**, producida por las fisuras inclinadas debidas a las tensiones principales de tracción. Cuando las armaduras transversales de la viga son claramente insuficientes, la zona comprimida de hormigón debe resistir una parte importante del cortante; si éste crece, la fisura progresa hasta el borde superior.

- **Rotura por flexión y cortante**. Si las armaduras transversales de la viga son ligeramente insuficientes, las fisuras suben más en la zona sometida a flexión y cortante que en la zona en flexión pura, produciéndose una disminución de la capacidad resistente del hormigón comprimido que puede llevar a la rotura aunque el momento no sea máximo.

- **Rotura por compresión del alma**. Puede producirse en las secciones en T o doble T de alma delgada si las tensiones principales de compresión llegan a superar la resistencia del hormigón.

- **Rotura por deslizamiento de las armaduras**. Las tensiones de la armadura en tracción crecen del apoyo hacia el centro de la viga. Este aumento, proporcional al esfuerzo cortante, se consigue gracias a las tensiones de adherencia entre hormigón y acero. Si el cortante aumenta y las armaduras longitudinales no están suficientemente ancladas, puede producirse su deslizamiento en las proximidades del apoyo, donde el cortante es máximo.

Una de las mejores maneras de interpretar los esfuerzos en el hormigón armado es observar y analizar el comportamiento de las fisuras que se producen en sus elementos estructurales. (PFC Estefanía Cuenca Asensio)

La armadura de cortante se dispone con la finalidad de asegurar que se pueda desarrollar toda la capacidad a flexión de la pieza. Antes de que se produzcan las fisuras a cortante, la deformación de los estribos es la misma que la del hormigón, de modo que éstos se encuentran sometidos a tensiones muy bajas. Cuando se produce la fisuración es cuando los cercos empiezan a trabajar, de modo que la armadura transversal no evita la aparición de estas fisuras pero sí ayuda a mantenerlas lo más cerradas posible.

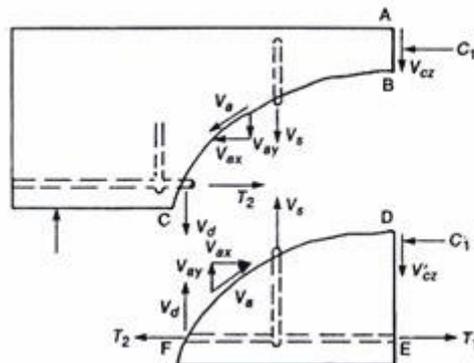


Figura 10.: Fuerzas de transferencia de cortante en una viga con armadura de cortante

Las fuerzas internas de una pieza con armadura de cortante son las mismas que para el caso de elementos sin armadura de cortante con la diferencia que ahora aparece una nueva fuerza vertical, V_s , que recoge la contribución de los estribos. En la Fig. 2.7. se adjunta el esquema de fuerzas que transfieren el cortante en una viga con estribos propuesto por MacGregor (1988). (S Salvat Solé - 2008)

2.8.1 Clasificación de las fisuras según armado

En la siguiente figura se muestran las distintas fisuras según si están producidas por un esfuerzo flector y de esfuerzo cortante.

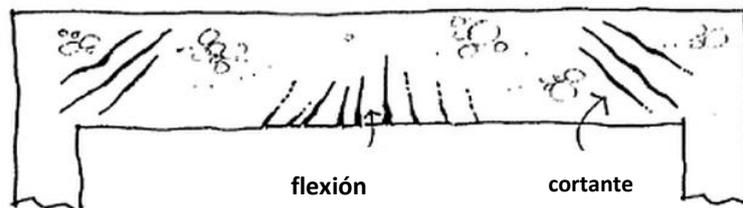


Figura 11. Tipos de fisuras

Estas fisuras se pueden clasificar en dos grandes familias, de flexión que se ubican en la zona media de la viga y de cortante que se ubican más cercanas a los apoyos. A continuación analizamos la manera en que se forman las fisuras, en función del armado.

- **Fisuras en vigas sin armadura en el alma:** En este caso la viga posee únicamente armadura inferior longitudinal para resistir la flexión. El efecto de corte en este tipo de viga produce una única fisura que se forma la falta de capacidad del hormigón de soportar los esfuerzos de tracción en el alma de la viga.

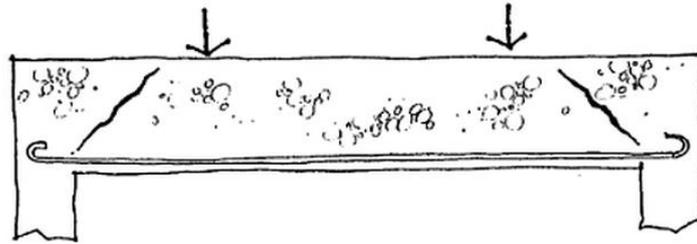


Figura 12. Tipos de fisuras en vigas sin armadura en el alma

La rotura final de la viga puede sobrevenir por:

- Agotamiento de la capacidad resistente del hormigón de la zona superior comprimida
- Por falta de adherencia entre hormigón y acero
- Por fluencia del acero traccionado

- **Fisuras en vigas con escasa armadura de cortante:** Al existir armadura en el alma en vez de aparecer una fisura en el alma aparecen varias y de menor tamaño.

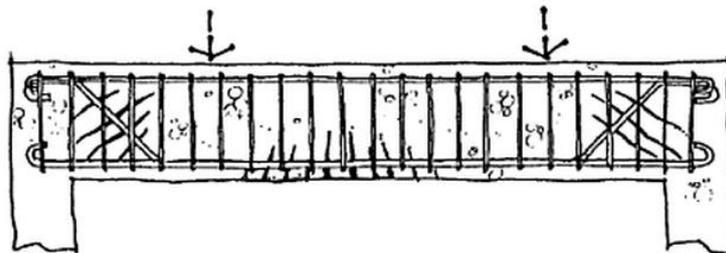


Figura 13. Fisuras en vigas con escasa armadura de cortante

La armadura transversal por ser mínima puede entrar en fluencia, en ese caso las grietas se agrandarían notablemente y la rotura de la viga se produciría por:

- Rotura de las armaduras del alma
- Agotamiento del hormigón por compresión en la zona de aplicación de cargas

- **Fisuras en vigas con elevada armadura a cortante:** En los casos en los que los esfuerzos de tracción quedan totalmente cubiertos por el armado, puede suceder que las bielas comprimidas entre las fisuras, fallen por compresión en forma brusca, por estallido. Este tipo de rotura depende de la calidad del hormigón y la forma de la viga.

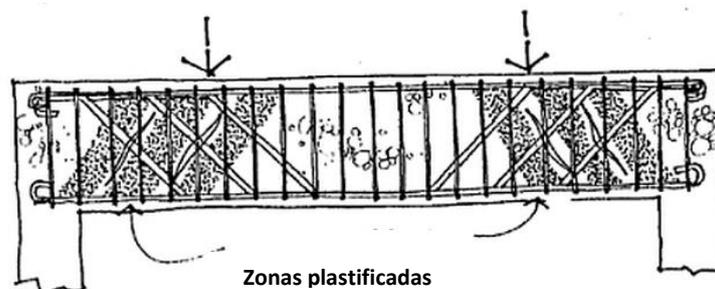


Figura 14. Fisuras en vigas con elevada armadura a cortante

- **Fisuras en vigas con inadecuados anclajes:** para elevados esfuerzos de cortante las bielas comprimidas que se apoyan en el cordón inferior de la viga transmiten a estos esfuerzos tan grandes que tienden a deslizar la armadura del hormigón. Esto es debido a una falta de adherencia hormigón - acero cuando los anclajes no están correctamente diseñados o ejecutados.

La rotura por deficiencia de anclaje se produce de forma brusca, sin previo aviso.

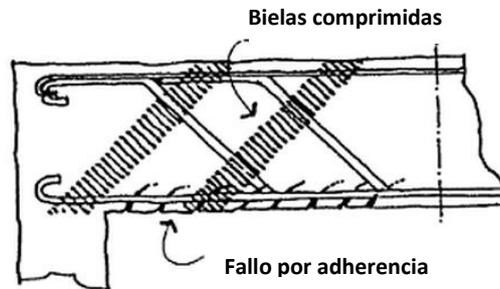
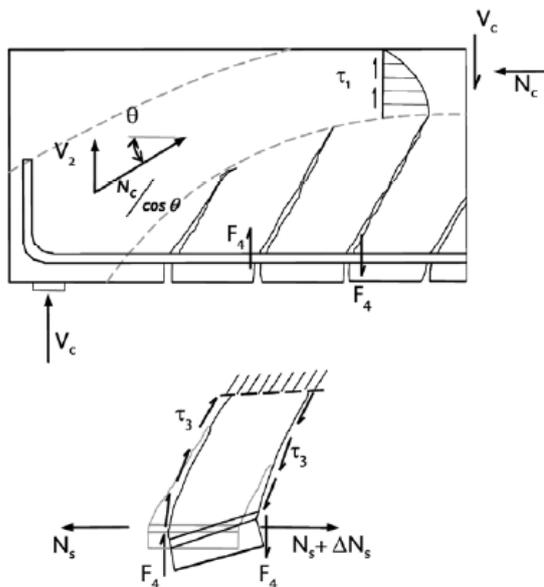


Figura 15. Fisuras en vigas con inadecuados anclajes

- **Fisuras por mala disposición de estribos:** Los mecanismos de rotura también pueden ser influenciados por la disposición de los estribos. Es fundamental que los estribos envuelvan a la armadura traccionada, ya que evitan fisuras de tracción transversales al mantener en su posición a dichas barras. (Vigas, Ing Jorge R Bernal)

2.8.2 Mecanismos para la transmisión de cortante

Los mecanismos para transmitir cortante en una viga sin estribos son los siguientes: tensiones de corte en el hormigón no fisurado, cortante-fricción entre las caras de fisura, efecto dovela introducido por la armadura longitudinal y efecto arco. No está clara la importancia relativa que tiene cada uno de estos factores en cuanto a la resistencia a cortante, ya que estará determinada por la tipología de viga analizada.



1. Resistencia a cortante de la cabeza no fisurada entre 20-40%
2. Efecto arco- Máximo cerca del apoyo, depende de a/d y de la armadura longitudinal de apoyo
3. Engranamiento de los áridos entre el 30-50% y depende del tamaño del árido y del canto
4. Efecto pasador entre el 15-25% y depende de la armadura longitudinal

Figura 16. Mecanismos básicos que se movilizan para resistir el esfuerzo cortante (Álvaro Picazo Iranzo, 2010)

En cuanto a la cabeza de un elemento no fisurado el cortante se transfiere por las tensiones principales de tracción y de compresión.

En la figura se representa la dirección que tienen las tensiones principales, es decir que indican el flujo de tensiones en el elemento.

Debido a que la resistencia a tracción del hormigón es menor que la de compresión las fisuras serán siempre perpendiculares a la dirección de las tensiones principales de tracción. Como la tensión principal de compresión es perpendicular a la de tracción, las fisuras serán paralelas a las tensiones de compresión.

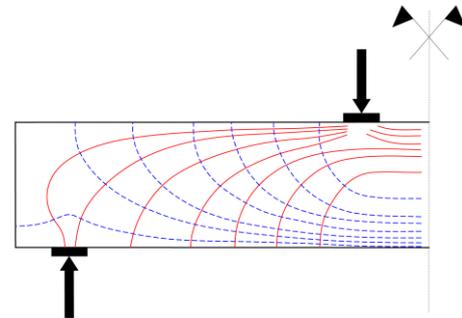


Figura 17. Trayectoria de tensiones principales de compresión y tracción en una viga apoyada sometida a dos cargas

- Efecto pasador es el desplazamiento entre caras del plano de ensayo y supone la aparición de esfuerzos de flexión y cortante frente a los que actúa la armadura pasante. El efecto dovela introducido por la armadura longitudinal o efecto pasador no será muy importante en elementos sin armadura de cortante, ya que el cortante máximo en una dovela está limitado por la resistencia a tracción del hormigón que soporta la dovela. No obstante, este efecto puede ser significativo en elementos con grandes cantidades de armadura longitudinal, especialmente si ésta se distribuye en capas.

- El efecto arco vendrá determinado por la relación entre la luz de cortante y el canto efectivo de la pieza (a/d), siendo este efecto más marcado cuanto menor sea la relación citada.

- Engranamiento de áridos y fricción es el resultado de la rugosidad entre caras de fisura. Esta contribución puede ser local, cuando afecta a una fisura de longitud inferior al tamaño de los áridos o global, para longitudes superiores.

Aunque la matriz granular del hormigón autocompactante es más fina que la del hormigón convencional y se produce una ligera disminución del efecto de engranamiento entre áridos a ambos lados de una fisura, también se constata la mayor compacidad de la interfase árido-pasta de cemento. Este conjunto de circunstancias no altera sustancialmente el comportamiento resistente del hormigón autocompactante respecto del hormigón convencional. En ensayos de elementos de hormigón autocompactante sometidos a esfuerzo cortante se ha observado una ligera disminución (12%) del efecto de engranamiento, en relación con el observado en los mismos elementos hormigonados con hormigón convencional.

Por otra parte, el hormigón autocompactante contiene menor cantidad de árido grueso que el hormigón convencional y, a la vez, presenta una pasta más compacta que la correspondiente a este último. Estas circunstancias afectan, con signo contrario, de modo que en algunas dosificaciones y con determinados materiales componentes pueden compensarse ambos efectos. (EHE-08)

Además de esto se ha de tener en cuenta que en los hormigones reforzados con fibras, las fibras contribuyen a la mejora del comportamiento en cuanto al engranamiento de los áridos.

2.8.3 Factores que afectan a la resistencia a cortante

Los motivos que modifican la capacidad portante al corte de una viga son numerosos, los más significativos o de mayor influencia son:

- **Tipo de carga:** las cargas concentradas provocan mayor efecto de corte. Estas cargas aumentan el efecto corte, entre un 20 a un 30 por ciento.

- **Ubicación de la carga:** existe una zona de máximo efecto para las cargas concentradas. La misma se ubica a una distancia aproximada de: $a = 3 \cdot h$

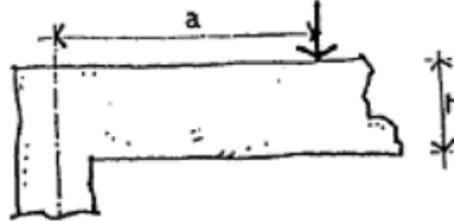


Figura 18. Ubicación de la carga

- **Cargas inferiores:** las cargas distribuidas ubicadas en la parte inferior de la viga, generan tracción en el alma y en ese caso la armadura de sostén debe ser complementaria a la de corte y calculada por separado. Es el caso que se presenta en las denominadas “vigas invertidas”.

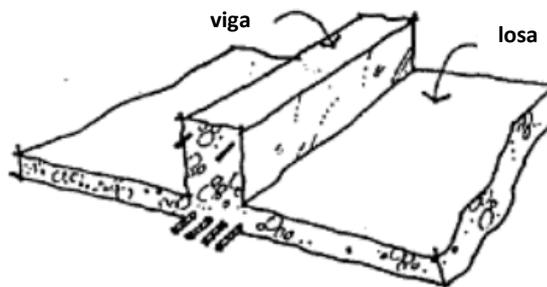


Figura 19. Cargas inferiores

- **Esbeltez de la viga:** En el caso de las cargas distribuidas, la capacidad de corte aumenta para esbelteces $l/h < 10$. Es decir, a mayor altura de la viga, es mejor la resistencia al corte, porque se inclinan más las bielas comprimidas ideales de hormigón, por lo que la fisuración de la viga se producirá antes a medida que aumente el canto de la misma. Esto se debe a que, a medida que aumenta el tamaño de la viga, el ancho de fisura en los puntos por encima de la armadura principal tiende a aumentar, produciendo una disminución de la imbricación de los áridos en la fisura y reduciendo su capacidad de resistir el esfuerzo cortante.

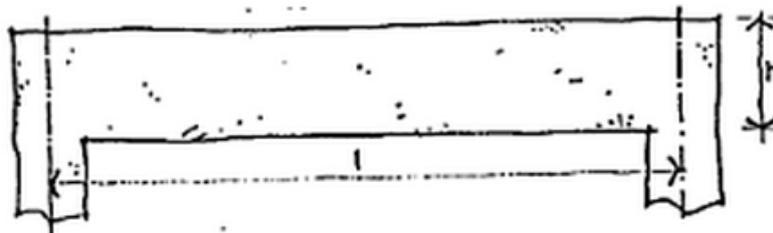


Figura20. Esbeltez de la viga

Este efecto tamaño es bastante apreciable para elementos sin armadura de cortante pero no lo es tanto para elementos con estribos ya que estos impiden, en parte, la apertura de las fisuras.

- **Forma de la sección:** de ensayos realizados se determinó una notable variación de las tensiones de tracción en los estribos de las vigas, en función de la forma de su sección.

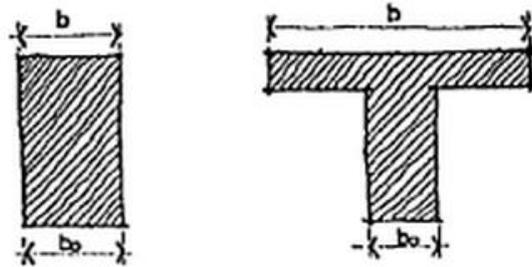


Figura 21. Forma de la sección

Las vigas rectangulares casi cuadradas con b/b_0 aproximadamente 1 demostraron ser las más efectivas, ya que los estribos trabajan más holgados y acompañan a la viga hasta las cargas de rotura. Mientras que en vigas esbeltas las tensiones de los estribos aumentan en algunos casos casi al doble.

- **Cargas indirectas:** En aquellos casos donde dos vigas se unen transfiriendo sus cargas en toda su altura, tal como se muestra en la figura, se producen las denominadas cargas indirectas. En este caso de cargas es necesario disponer de armaduras especiales en la zona de unión. (Vigas, Ing Jorge R Bernal)

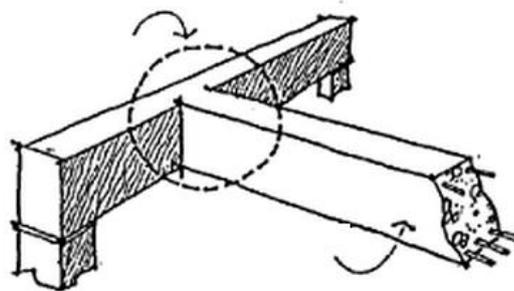


Figura 22. Cargas indirectas

- **Resistencia a tracción del hormigón:** la carga necesaria para producir las fisuras inclinadas depende de la resistencia a tracción del hormigón. En caso de que la fisuración por flexión precediera a la fisuración inclinada, se alteraría el campo de tensiones elásticas existente inicialmente hasta el extremo que la fisuración inclinada se produciría para una tensión principal de tracción, basada en la sección sin fisurar, de aproximadamente un tercio de la resistencia a tracción del hormigón.

- **Cuantía de armadura longitudinal:** tendremos mayor resistencia a cortante a medida que aumente la cuantía de armadura longitudinal. Esto se debe a que, para una cuantía menor de armadura longitudinal, las fisuras de flexión se abren más y se extienden hasta una altura mayor en el alma de la viga provocando, según lo explicado anteriormente, que la fisuración inclinada aparezca antes.

- **Relación a/d :** este cociente influye muy significativamente en el tipo de rotura y en el modo de resistir los esfuerzos cortantes que presenta la viga.

- **Fuerzas axiales:** la carga de fisuración inclinada disminuye para elementos sometidos a tensiones axiales de tracción, y tiende a aumentar si los elementos están sometidos a tensiones axiales de compresión.

- **Cuantía de armadura transversal:** tendremos mayor resistencia a cortante a mayor cuantía de armadura transversal. (S Salvat Solé - 2008)

2.8.4 Resistencia a cortante en hormigón reforzado con fibras

Según M-2 ACHE, en vigas de mortero o de hormigón, con o sin fibras o estribos, el modelo de fisuración por cortante es similar, sobre todo entre vigas con estribos o con fibras (Serna 1984). No obstante las fibras incrementan el efecto pasador de la armadura longitudinal y la resistencia a tracción generada a través de las fisuras oblicuas, todo lo cual produce un incremento de la resistencia a cortante, cuya magnitud depende de diversos factores (Li 1992):

a) La relación a/d entre la distancia a desde el punto de aplicación de la carga y eje del apoyo y el canto útil d de la pieza: cuanto mayor es el valor de a/d , menor es la resistencia a cortante y mayor, sin embargo, el incremento resistente suministrado por las fibras respecto de las vigas no reforzadas con fibras.

b) La cuantía (de la armadura de tracción: si aumenta, también lo hacen las resistencias a cortante a primera fisura oblicua y la resistencia última a cortante.

c) El canto útil d de las vigas, cuyo incremento se traduce en mermas de la capacidad resistente a corte.

d) La resistencia a tracción indirecta obtenida mediante ensayo brasileño, cuyo aumento conduce a mejorar la resistencia a cortante.

Experimentalmente se ha obtenido también que la resistencia a cortante de las piezas lineales aumenta si:

a) crece el contenido de fibras (ACI committe 544, 1988a) (Li, 1992) (Valle, 1993) (Khaloo, 1997) o la esbeltez de éstas (Khaloo, 1997);

b) se utilizan fibras de adherencia mejorada (ACI committe 544, 1988a);

c) aumenta la resistencia a compresión de la matriz, probablemente por la mejora de adherencia fibras-matriz (Valle, 1993) (Khaloo, 1997)

Con las fibras se produce un incremento de la deformabilidad del material compuesto, tanto cuando se inicia la fisuración como en el agotamiento, incremento que crece con la resistencia de la matriz, con el contenido en fibras y, sobre todo, con la esbeltez de éstas, dando lugar a agotamientos de naturaleza menos frágil que el hormigón en masa (Khaloo, 1997). Las fibras, pues, dotan al compuesto de cierta tenacidad a cortante, del orden de 5 veces (Valle, 1993) a 11 veces superior (Khaloo, 1997) a la del hormigón sin fibras.



El aumento relativo es mayor con hormigones de alta resistencia, donde se acusa, de modo más pronunciado que en los ordinarios, el aumento del contenido en fibras y de la esbeltez de estas (Khaloo, 1997).

La eficacia del uso combinado de estribos y fibras conduce a notables incrementos de la ductilidad, aunque se obtienen aumentos resistentes a corte poco significativos (del 0,0% al 15% para hormigones ordinarios o de alta resistencia, respectivamente) respecto de las vigas con solo estribos como refuerzo frente al esfuerzo cortante (Valle, 1993).



3. Programa experimental

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

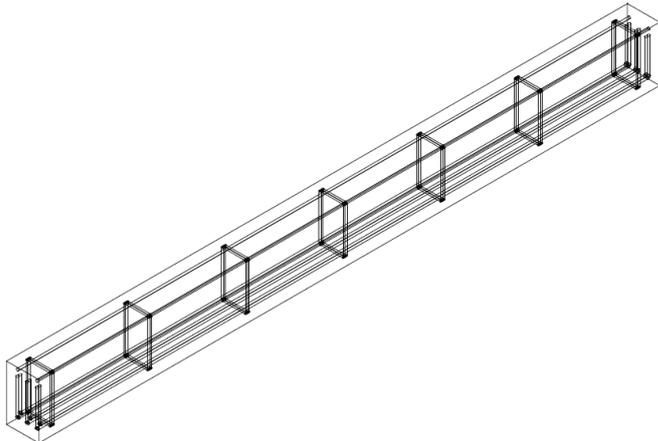
3.1 Programación

Para la determinación de la acción estructural de las fibras poliméricas como sustitutas del acero pudiendo resultar más económico y/o refuerzo del mismo con el fin de obtener una mayor resistencia procederemos a la realización de vigas con dos tipos de armado variando la cantidad de armadura transversal y el contenido de fibras para ver su respuesta a cortante. Este armado se calculará para que falle a cortante, dejando una distancia entre estribos de 30cm y armando la viga en la zona de flexión con 6 redondos de diámetro 8 para evitar que se produzca un fallo por flexión.

Realizaremos 7 amasadas, con cada una fabricaremos una viga y 4 probetas (2 cilíndricas y 2 prismáticas) para caracterizar el material. Las dimensiones de la viga, el armado y la dosificación de las fibras para cada amasada será:

TIPOS DE ARMADO EN VIGAS

ARMADO PATRÓN



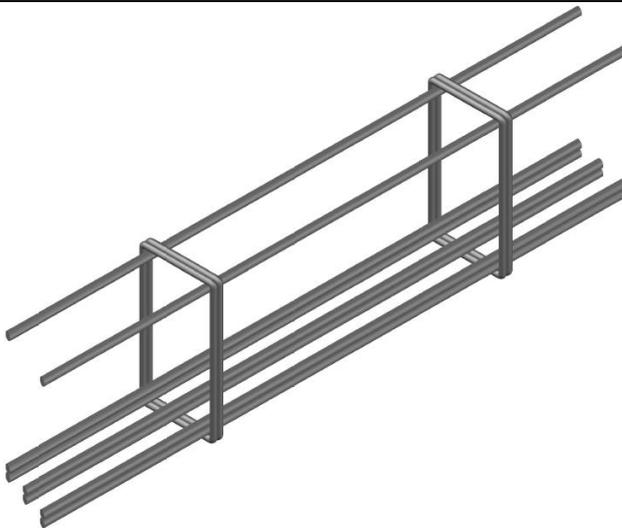
Dimensiones Viga

Base = 10 cm

Altura = 17 cm

Longitud = 192 cm

DETALLE ARMADO PATRÓN



Armado longitudinal:

Superior: 2Ø8

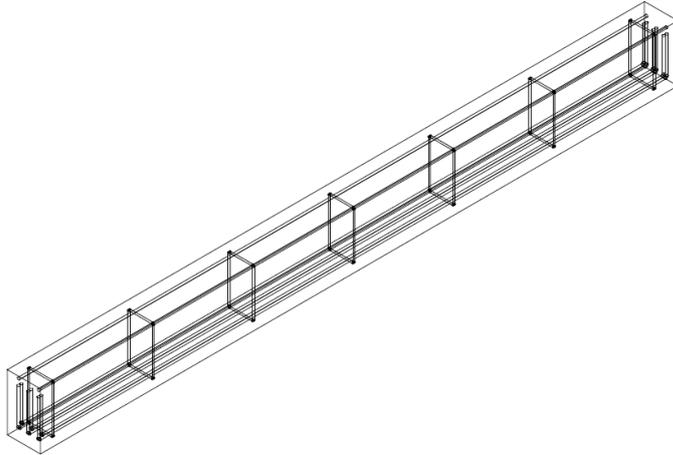
Inferior: 6Ø8 (acabado en patilla)

Armado transversal:

7Ø6 c/30cm (cercos dobles)

TIPOS DE ARMADO EN VIGAS

ARMADO ½ PATRÓN



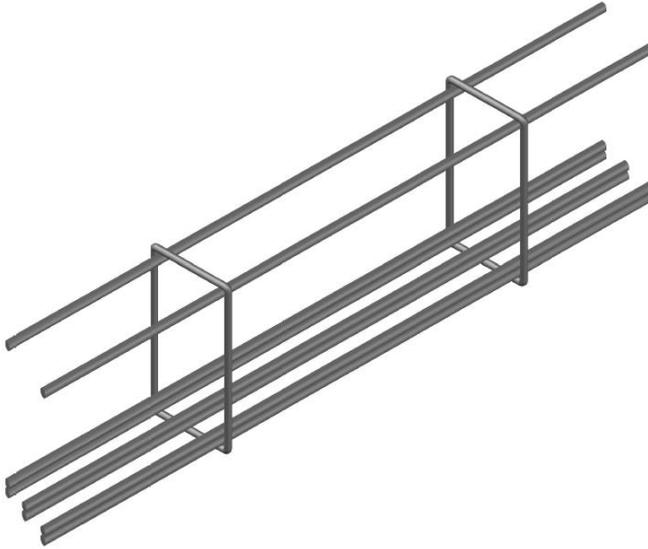
Dimensiones Viga

Base = 10 cm

Altura = 17 cm

Longitud = 192 cm

DETALLE ARMADO ½ PATRÓN



Armado longitudinal:

Superior: 2Ø8

Inferior: 6Ø8 (acabado en patilla)

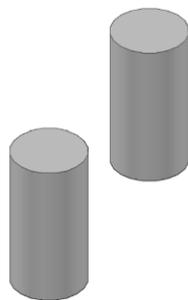
Armado transversal:

7Ø6 c/30cm (cercos simple)

Tabla 18. Tipos de armado

Características probetas

2 Cilíndricas

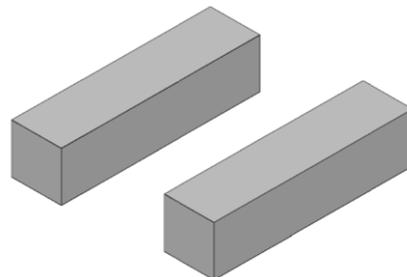


Dimensiones:

Diámetro = 150 mm

Altura = 300 mm

2 Prismáticas



Dimensiones:

Base x altura = 100x100 mm

Longitud = 400 mm

Tabla 19. Características de las probetas

Nº Amasada	Cantidad de fibras	Tipo de armado	Viga	Probetas fabricadas
Amasada 1	0 Kg/m ³	Patrón	V.1.1	2 cilíndricas + 2 prismáticas
Amasada 2	12,4 Kg/m ³	Patrón	V.1.2	2 cilíndricas + 2 prismáticas
Amasada 3	9 Kg/m ³	Patrón	V.1.6	2 cilíndricas + 2 prismáticas
Amasada 4	6,2 Kg/m ³	Patrón	V.1.3	2 cilíndricas + 2 prismáticas
Amasada 5	12,4 Kg/m ³	½ Patrón	V.1.7	2 cilíndricas + 2 prismáticas
Amasada 6	9 Kg/m ³	½ Patrón	V.1.4	2 cilíndricas + 2 prismáticas
Amasada 7	6,2 Kg/m ³	½ Patrón	V.1.5	2 cilíndricas + 2 prismáticas

Tabla 20. Programación de las amasadas

Cada viga y sus correspondientes probetas irán identificadas con etiquetas indicando:

Número de viga	Ejemplo:	PFG_VIGAS V.1.2
Fecha de hormigonado		06/05/2013
Esfuerzo a estudiar		CORTANTE
Tipo de armado + Cantidad de fibras (kg/m ³)		Patrón + 12,4
Armadura longitudinal		2Ø8 + 6Ø8
Armadura transversal		7Ø6 c/30cm. Dobles
Tipo de fibra		polimérica

Tabla 21. Identificación de las probetas

3.2 Ensayos previos

Para alcanzar la dosificación adecuada procederemos a realizar distintas pruebas de dosificación, en las que fijaremos la relación agua/cemento y el cemento.

Constante	Propuesta A	Propuesta B
Relación a/c	0,4	0,6
Cemento (Kg/m ³)	500	325

Tabla 22. Relaciones a/c

A partir de esta base iremos cambiando el resto de variables, principalmente modificaremos el porcentaje y tipo de aditivo y la cantidad de finos. Variaremos dichas cantidades hasta conseguir la dosificación deseada para nuestro hormigón autocompactante reforzado con fibras.

Se proponen estas dos variables, la segunda como alternativa de la primera debido a la alta cantidad de cemento, ya que encarece el hormigón.

3.3 Fabricación de las vigas y probetas

Como primer paso a realizar fabricaremos los encofrados de nuestras vigas, cortaremos, doblaremos y ataremos el armado según la EHE-08.

Posteriormente procederemos a la elaboración del hormigón, caracterizando el material en estado fresco mediante los siguientes ensayos:

- Ensayo de escurrimiento sin fibras
- Ensayo de escurrimiento con fibras
- Ensayo del anillo J
- Ensayo del embudo en V
- Ensayo de contenido de aire

Tras los ensayos se hormigonarán vigas y probetas, se esperarán 24 h para el desencofrado de las mismas y serán trasladadas a la cámara húmeda para su curado. Allí permanecerán hasta el momento del ensayo, que se realizará 28 días después para determinar las resistencias que ha alcanzado el hormigón.

La cámara conservará las probetas a una humedad relativa $\geq 95\%$, con una temperatura de 18-22°C.



Imagen 5. Termómetro cámara de curado



Imagen 6. Exterior cámara de curado



Imagen 7. Interior cámara de curado

3.4 Ensayo de hormigón endurecido

Para la caracterización del material de cada una de las vigas efectuaremos dos probetas cilíndricas y dos prismáticas. Transcurridos los 28 días procederemos a realizar los ensayos pertinentes tanto en probetas como en vigas.

3.4.1 Probetas

Los ensayos descritos a continuación los desarrollaremos en cada serie de probetas, dos prismáticas y dos cilíndricas.

3.4.1.1 Ensayo a flexión

Realizaremos en las probetas prismáticas de 100x100x400 mm según norma un ensayo a flexión en tres puntos mediante el cual obtendremos la gráfica tensión deformación.

De las cuatro mitades obtenidas tras el ensayo, guardaremos dos, una mitad de cada probeta para la comparación final con el resto de las mitades y las mitades restantes se apartarán para ensayarlas a compresión.

3.4.1.2 Ensayo a compresión en probetas prismáticas

Realizaremos este ensayo con las dos mitades obtenidas del ensayo a flexión, para determinar resistencia media del material dato necesario para poder realizar el ensayo del módulo de elasticidad.

3.4.1.3. Ensayo del módulo de elasticidad

Ensayaremos las dos probetas cilíndricas para determinar el módulo de elasticidad al 40% de la resistencia máxima obtenida en el ensayo de compresión en probetas prismáticas.

3.4.1.4 Ensayo a compresión en probetas cilíndricas

Con las probetas cilíndricas del ensayo anterior procederemos a la realización del ensayo a compresión hasta llevarlas a su carga máxima, provocando la rotura, obteniendo así la grafica tensión deformación.

3.4.2 Vigas

Tras el proceso de curado realizaremos un ensayo a flexión en el que analizaremos el esfuerzo de cortante. Para ello se reducirá la armadura transversal, es decir la armadura de refuerzo a cortante para provocar que la viga rompa a cortante.

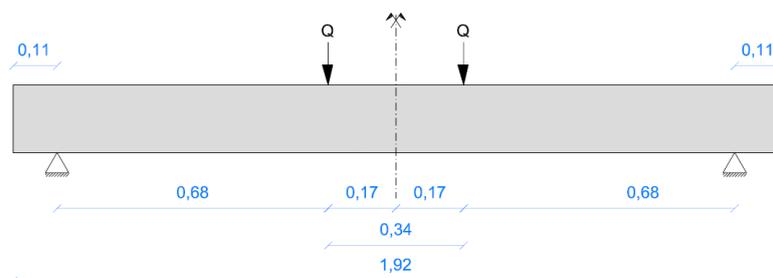


Figura 23. Situación de las cargas y los apoyos



4. Metodología

4. METODOLOGÍA

En este apartado del proyecto caracterizamos todos los materiales empleados en la realización del hormigón autocompactante reforzado con fibras, los ensayos previos hasta llegar a la dosificación adecuada, la dosificación definitiva, la fabricación de vigas y probetas, su posterior desmoldado y curado y finalmente los ensayos realizados tanto en vigas como en probetas.

4.1 Caracterización de los materiales

Para la realización de nuestras vigas de hormigón empleamos los siguientes materiales

4.1.1 Áridos

El conjunto de áridos empleados para la composición del hormigón han sido: grava, arena gruesa y arena fina.

4.1.1.1 Árido grueso

Se ha empleado como árido grueso una grava caliza de tamaño máximo 12,5 mm cuya granulometría se describirá a continuación.

El procedimiento para la determinación de la granulometría ha sido el siguiente:

Previamente al tamizado de la grava se mojó e introdujo la muestra en la estufa para el secado y con ello la evaporación de la humedad. Seguidamente cuarteamos la muestra que a continuación pesamos y tamizamos.



Imagen 8. Secado de áridos



Imagen 9. Cuarteado de áridos



Imagen 10. Serie de tamices

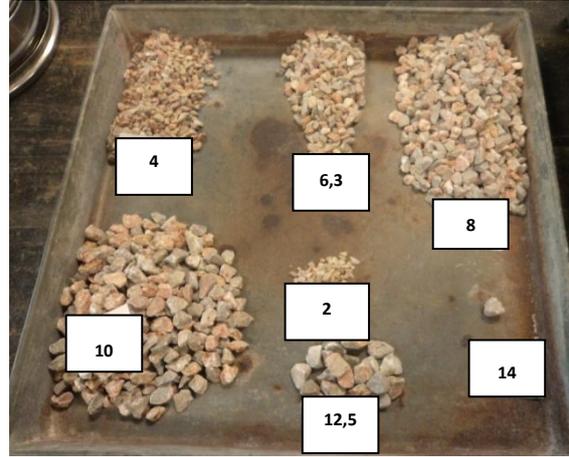
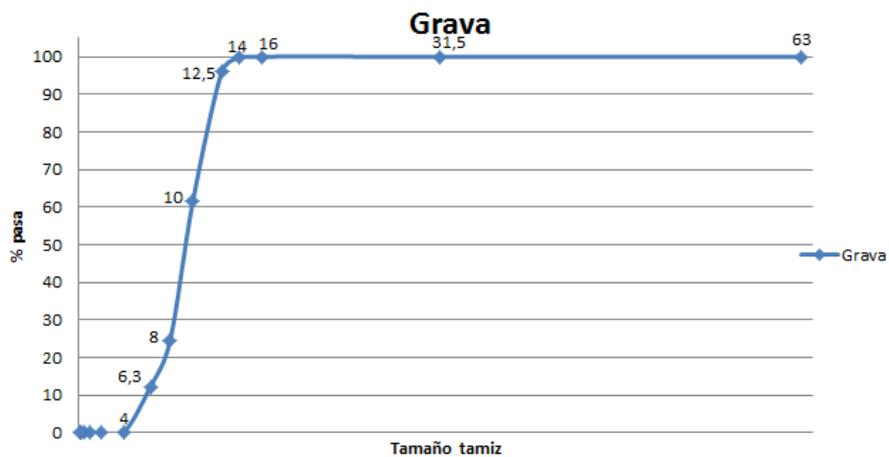


Imagen 11. Resultado tamizado grava en mm

Granulometría obtenida tras el tamizado:

Tamiz	Retenido (g)	Retenido acumulado (g)	%R G	%RA G	%P G
63	0	0	0	0	100
31,5	0	0	0	0	100
16	0	0	0	0	100
14	3,5	3,5	0,19	0,19	99,81
12,5	69,6	73,1	3,87	4,06	95,94
10	615	688,1	34,18	38,24	61,76
8	671,9	1360	37,34	75,58	24,42
6,3	217,9	1577,9	12,11	87,69	12,31
4	216,2	1794,1	12,01	99,70	0,30
2	5,4	1799,5	0,30	100	0
1	0	1799,5	100	100	0
0,5	0	1799,5	100	100	0
0,25	0	1799,5	100	100	0
0,125	0	1799,5	100	100	0
P muestra	1799,5				

Tabla 23. Granulometría grava



Grafica 1. Granulometría grava

4.1.1.2 Arena

Para la dosificación del hormigón empleamos dos tipos de arenas calizas distintas, arena gruesa 0/4 y arena fina 0/2.

Antes del tamizado de la arena se cuarteó y pesó la muestra, se lavó para la eliminación de finos e introdujo en la estufa para el secado y con ello la evaporación de la humedad. Tras un día en la estufa se pesó de nuevo y realizamos el tamizado de la misma.

4.1.1.2.1 Arena gruesa 0/4



Imagen 12. Lavado arena 0/4

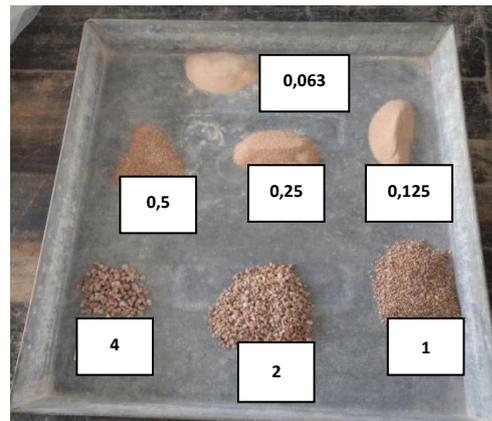


Imagen 13. Resultado tamizado arena 0/4 en mm

Granulometría obtenida tras el tamizado:

El peso de la muestra antes del lavado fue 543,68 g y al sacarlo de la estufa 490,4 g.

Tamiz	Retenido (g)	Retenido acumulado (g)	%R G	%RA G	%P G
4	52,3	52,3	10,66	10,66	89,34
2	178,9	231,2	36,48	47,15	52,85
1	86,4	317,6	17,62	64,76	35,24
0,5	46,3	363,9	9,44	74,20	25,80
0,25	37,4	401,3	7,63	81,83	18,17
0,125	40,1	441,4	8,18	90,01	9,99
0,063	49	490,4	9,99	100	0
P muestra	490,4	% finos = 543,68 - 490,4 = 53,28 g = 9,8 %			

Tabla 24. Granulometría arena 0/4

4.1.1.2.2 Arena fina 0/2



Imagen 14. Lavado arena 0/2

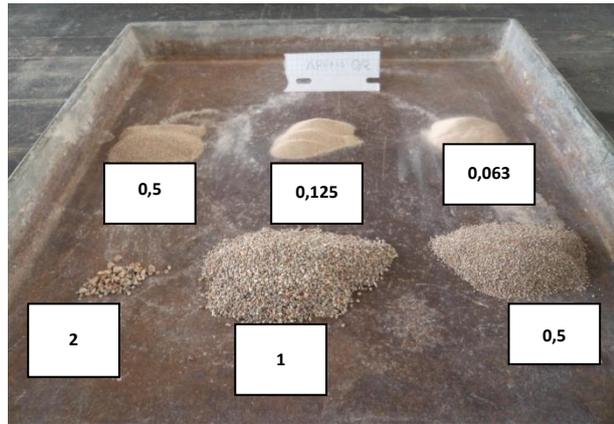


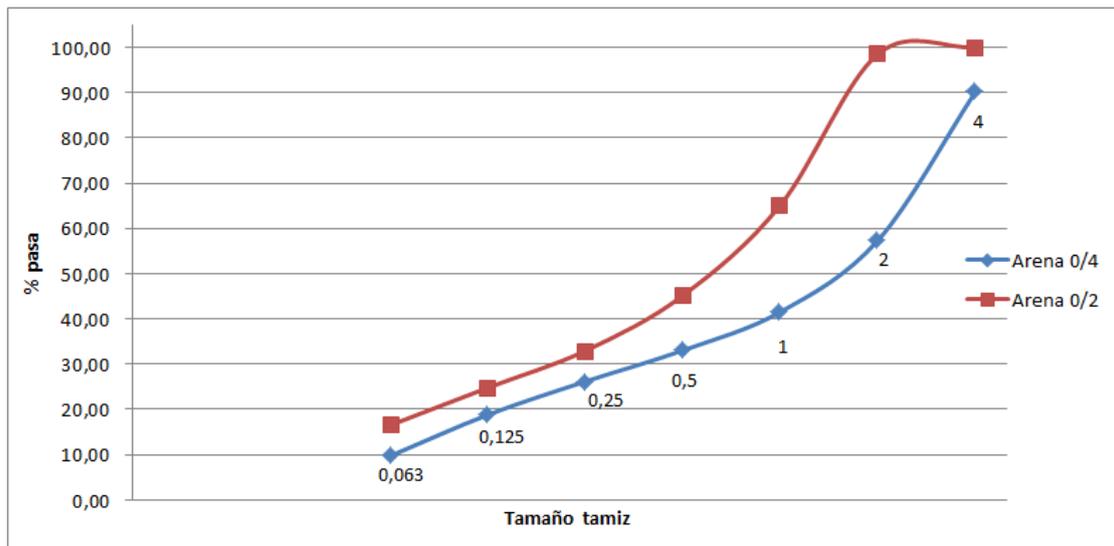
Imagen 15. Resultado tamizado arena 0/2 en mm

Granulometría obtenida tras el tamizado:
El peso de la muestra antes del lavado fue 485,49 g y al sacarlo de la estufa 404,9 g.

Tamiz	Retenido (g)	Retenido acumulado (g)	%R G	%RA G	%P G
4	0	0	0	0	100
2	6,7	6,7	1,65	1,65	98,35
1	162	168,7	40,01	41,66	58,34
0,5	97,4	266,1	24,06	65,72	34,28
0,25	59,3	325,4	14,65	80,37	19,63
0,125	39,7	365,1	9,80	90,17	9,83
0,063	39,8	404,9	9,83	100	0
P muestra	404,9	% finos = 485,49 - 404,9 = 80,59 g = 16,6 %			

Tabla 25. Granulometría arena 0/2

La gráfica siguiente es una comparativa entre las distintas arenas.



Gráfica 2. Granulometría arenas 0/4 y 0/2

4.1.1.3 Granulometría compuesta de los 3 áridos

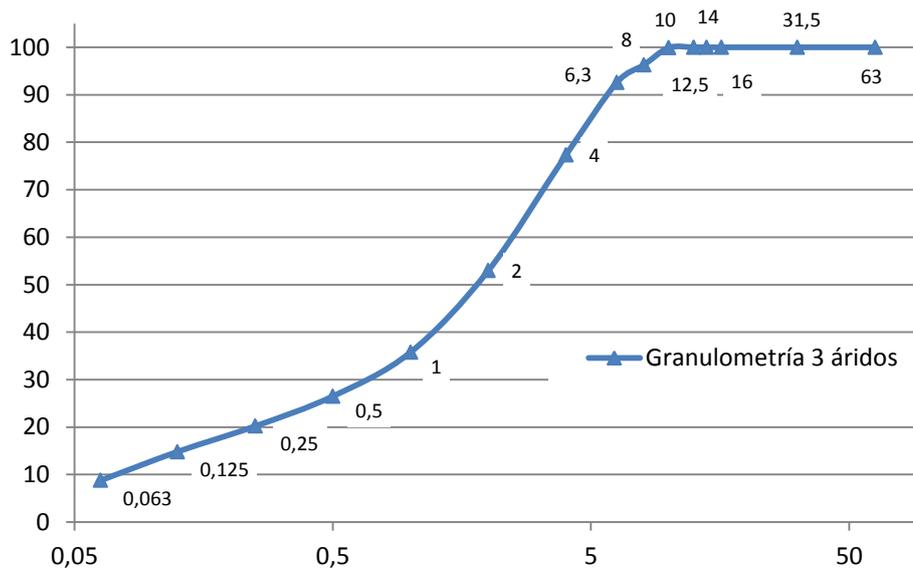
Tras la realización de las granulometrías de la grava, la arena gruesa 0/4 y la arena fina 0/2, procedimos a la realización del cálculo granulométrico de los tres áridos en conjunto.

Nuestro árido compuesto por los tres árido contendrá:

- Arena fina 0/2 → 28,3 %
- Arena gruesa 0/4 → 41,4 %
- Grava → 30,3 %

Serie	% Pasa			Total
	arena 0/2 28,3%	arena 0/4 41,4%	grava 30,3%	
63	28,30	41,40	30,30	100
31,5	28,30	41,40	30,30	100
16	28,30	41,40	30,30	100
14	28,30	41,40	30,30	100
12,5	28,30	41,40	30,30	100
10	28,30	41,40	30,21	99,91
8	28,30	41,40	26,57	96,27
6,3	28,30	41,40	22,90	92,60
4	28,30	37,43	11,59	77,31
2	27,90	23,81	1,23	52,94
1	18,48	17,22	0,06	35,76
0,5	12,79	13,70	0	26,50
0,25	9,34	10,85	0	20,19
0,125	7,02	7,78	0	14,80
0,063	4,70	4,06	0	8,76

Tabla 26. Granulometría todos de los áridos



Grafica 3. Granulometría todos los áridos

4.1.2 Cemento

El cemento utilizado ha sido:

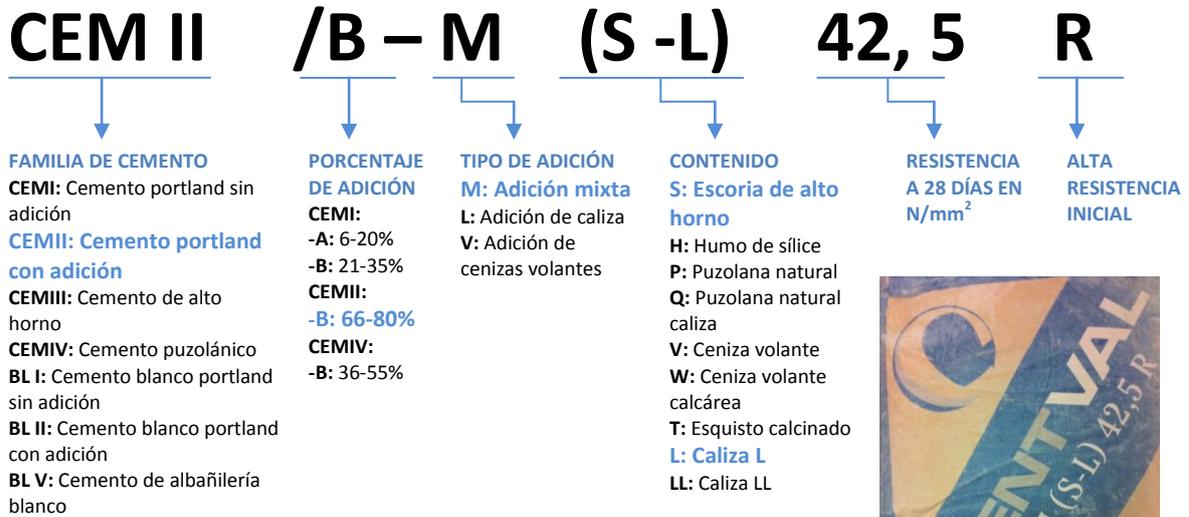


Imagen 16. Tipo de cemento

Según la UNE-EN 197-1 las características de un cemento CEM II/B-M (S -L) 42,5 R

Características		Especificaciones UNE-EN 197-1
Componentes	Clinker (%)	65 – 79
	Caliza (%)	21 – 35
	Escorias (%)	
	Componentes minoritarios (%)	0 – 5
Químicas	Sulfato (%)	≤ 4
	Cloruro (%)	≤ 0,1
Físicas	Principio de fraguado (min)	≥ 60
	Final de fraguado (min)	--
	Expansión (mm)	≤ 10
Mecánicas	Resistencia a compresión 2 días (N/mm ²)	≥ 20
	Resistencia a compresión 7 días (N/mm ²)	--
	Resistencia a compresión 28 días (N/mm ²)	42,5 – 62,5

Tabla 27 Especificaciones del cemento según UNE-EN 197-1

4.1.3 Aditivo

El aditivo empleado para la realización de nuestro hormigón ha sido Sika ViscoCrete 3425, superplastificante de alto rendimiento que se suele emplear para hormigones con necesidad de reducción de agua y buena fluidez, prefabricados y autocompactantes, como es el caso del nuestro.

Las características que aporta este aditivo son:

- Reducción del agua de amasado dando al hormigón alta densidad, altas resistencias y gran impermeabilidad
- Buena plasticidad, mejorando la fluidez, colocación y compactación
- Disminuye la retracción
- No retarda el fraguado

Características técnicas:

- Apariencia/color: líquido incoloro
- Composición química: Policarboxilato modificado en base acuosa
- Densidad: $1,05 \text{ kg/l} \pm 0,01$
- Valor del pH 4 ± 1
- Exento de cloruros



Imagen 17. Tipo de aditivo

La dosificación adecuada para una relación a/c baja y para hormigón autocompactante es de 1-1,7% del peso del cemento. La sobredosificación puede provocar exudación.

Según la EHE-08 “el aumento de la consistencia debido al uso de las fibras debe ser compensado siempre con la adición de aditivos reductores de agua, sin modificar la dosificación prevista de agua”

4.1.4 Agua

El agua empleada para la realización de nuestro hormigón fue el agua potable obtenida de la red considerada como apta para la realización y curado del hormigón por la práctica.

4.1.5 Finos

En el hormigón autocompactante reforzado con fibras que realizamos, empleamos un pequeño porcentaje de filler calizo con el fin de que nuestro hormigón no tuviera problemas de exudación ni segregación, tomamos esta decisión debido a los ensayos previos que se detallan en el punto 4.2.1. Se trata de carbonato cálcico natural molido cuyo tamaño máximo es de 63μ .

4.1.6 Fibras

Las fibras que hemos utilizado en la realización de nuestro hormigón han sido SikaFiber T60, que han sido diseñadas para aumentar la durabilidad del hormigón, evitar la fisuración y aportar resistencias estructurales específicas.

Las características que aportan estas fibras son las siguientes:

- Incrementa la absorción de energía y la resistencia a tracción, aportando resistencias residuales a flexo-tracción superiores a las mínimas exigidas, por lo que se consideran fibras estructurales.
- Asegura la distribución homogénea de las tensiones en el hormigón, evitando la aparición de fisuras por retracción.
- Reduce el riesgo de disgregación de la masa.
- Aumenta la impermeabilidad
- No absorbe agua

Características técnicas:

- Composición química: 100% poliolefinas
- Densidad (20º): aprox. 0,92 kg/l
- Diámetro: 0,92 mm aprox.
- Longitud: 60mm
- Esbeltez: 65 mm
- Resistencia a la tensión: 560Mpa
- Elongación: 7%
- Módulo de elasticidad: 20,5 GPa



Imagen 18. Fibras con envoltura



Imagen 19. Fibras sueltas



Imagen 20. Longitud de las fibras

4.1.7 Acero

El acero empleado para el armado de nuestras vigas ha sido un B 500 SD cortado y doblado en el laboratorio de materiales de la universidad. Este material se tuvo que caracterizar en dos ocasiones ya que tuvo procedencia de dos fábricas distintas.

Tipo B 500 SD

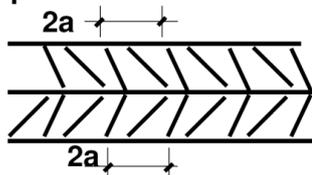


Figura 24. Tipo de acero

- B** Acero para hormigón
- 500** Límite elástico MPa
- S** Condición de soldabilidad
- D** Ductilidad elevada

1^{er} suministro



Imagen 21. Tipo de acero del primer suministro

2^o suministro



Imagen 22. Tipo de acero del segundo suministro

El primer acero que se nos suministró tenía el siguiente código, por lo que procedía de Portugal del fabricante número 34.



Imagen 23. Código acero del primer suministro

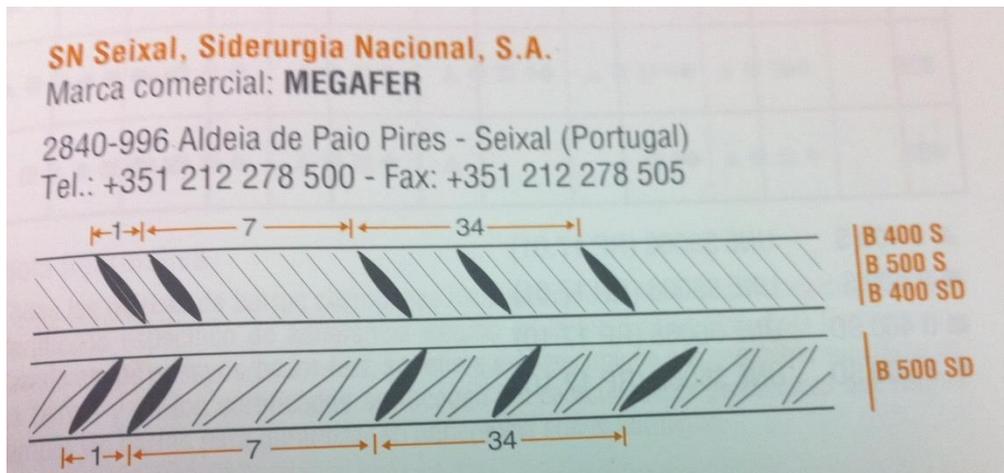


Imagen 24. Código fabricante SN Seixal, Siderurgia Nacional, S.A.

A: inicio B: País: (Portugal) :7 C:Fabricante : (SN Seixal) : 34

El acero que se nos suministró en segundo lugar tenía el siguiente código, por lo que procedía de Portugal del fabricante número 34.



Imagen 25. Código del acero del segundo suministro

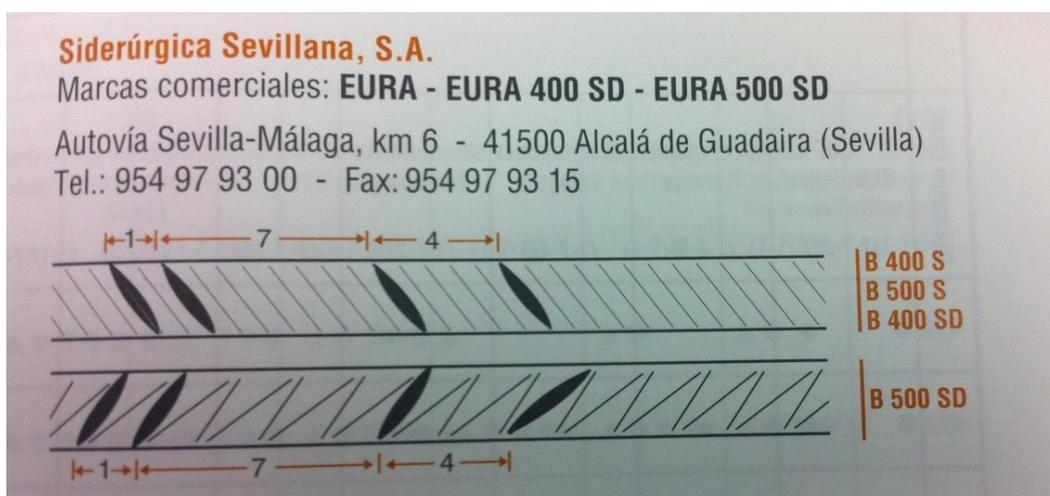


Imagen 26. Código fabricante Siderúrgica Sevillana, S.A.

A: inicio B: País: (España) :7 C: Fabricante:(Siderúrgica Sevillana, S.A) : 4

4.1.7.1 Ensayos para caracterización del acero

Para caracterizar el material realizaremos los siguientes ensayos establecidos en la UNE 36068:

4.1.7.1.1 Determinación de las características geométricas del acero

Los ensayos que se van a realizar para la determinación de las características geométricas son:

- Sección equivalente
- Altura de corrugas
- Separación de corrugas
- Inclinación de corrugas
- Área proyectada de corruga (f_r)

4.1.7.1.2 Ensayo de tracción del acero

Previamente a la realización del ensayo se medirá la longitud de la barra a ensayar y se pesará, seguidamente se realizarán marcas a lo largo de toda la barra a una distancia igual a 5 veces el diámetro para obtener el alargamiento de rotura tras la realización del ensayo.



Imagen 27. Ensayo de tracción del acero

Tras el ensayo se medirá la distancia entre las marcas realizadas anteriormente para calcular el alargamiento que se ha producido.

Con el ensayo obtendremos:

- Fuerza
- Resistencia
- Limite elástico
- Relación f_s/f_y
- Alargamiento de rotura
- Alargamiento total bajo carga máxima

4.2 Dosificación

Para la fabricación del hormigón autocompactante reforzado con fibras de nuestras vigas, tendremos que hacer numerosos ensayos previos hasta dar con la dosificación adecuada para garantizar que se trataba verdaderamente de un hormigón autocompactante y que este iba a ser capaz de fluir en el encofrado y entre el armado de nuestras vigas una vez se le añadiesen las distintas cantidades de fibras programadas en el programa experimental.

Para llegar a la dosificación deseada, partiremos de las dos propuestas descritas en el programa experimental proporcionadas por los tutores del taller José Ramón Albiol Ibáñez y Luis García Ballester.

Material	Dosificación kg/m ³	
	Propuesta A	Propuesta B
Cemento	500	325
H ₂ O	190	195
Finos	--	65
Arena 0/2	507,5	486
Arena 0/4	507,5	678
Grava	650	650
Aditivo Sika ViscoCrete 20 HE (2%)	10	3.25
Volumen	1001	1001
A/C	0,4	0,6

Tabla 28. Propuestas de dosificación

Los procedimientos a seguir para el amasado serán los mismos que para la realización de las distintas amasadas de las vigas, por lo que se especificarán más adelante, fundamentalmente son:

- Cálculo y modificación de la humedad
- Determinación de los litros necesarios
- Preparación y peso de los materiales componentes de la amasada
- Vertido y mezclado de los materiales en la amasadora
- Realización de los ensayos en fresco para la caracterización del autocompactante
- Aceptación o rechazo de la dosificación realizada

Según la EHE-08 un hormigón autocompactante debe estar entre los siguientes parámetros:

Ensayo	Parámetro medido	Rango admisible
Ecurrimiento	T ₅₀	T ₅₀ ≤ 8 s
	df	550 ≤ df ≤ 850 mm
Embudo en V	TV	4 s ≤ TV ≤ 20 s
Caja en L	C _{bL}	0,75 ≤ C _{bL} ≤ 1,00
Ecurrimiento con anillo J	d _{Jf}	≥ df-50 mm

Tabla29. Requisitos generales para la autocompactabilidad (Anejo 17.EHE-08)

Para la fabricación de nuestro HAC hemos reducido los rangos propuestos por la EHE-08 a los siguientes:

Ensayo	Rango admisible	Valor ideal
Escurrimiento	T50 2-8 s	2-4 s
	Df 650 - 750 mm	700mm
Embudo en V	TV 6-10seg	-
Escurrimiento con anillo J	$\geq df-50$ mm	-

Tabla 30. Valores ideales para nuestro HAC

Se realizará sólo el ensayo de anillo J ya que este es sustitutivo de la caja en L.

Además de los ensayos mencionados, también se tendrá en cuenta el índice de inspección visual, siendo de vital importancia la segregación, la exudación y la cohesión de la masa.

Una vez realizada la amasada, si los resultados no son los deseados procederemos a las siguientes modificaciones con el fin de corregir la dosificación:

Ensayo	Problema	Modificación
Escurrimiento	$\emptyset > 700$ mm	Reducción de aditivo o aumento de finos
	$\emptyset < 700$ mm	Aumento de aditivo o reducción de finos
	T50 > 4 s	Aumento de aditivo o reducción de finos
Embudo en V	Tv > 10 s	Aumento de aditivo o reducción de finos
Escurrimiento anillo J	$\emptyset < 65$ mm	Aumento de aditivo o reducción de finos
Índice de inspección visual	Segregación	Reducción de aditivo o aumento de finos
	Exudación	Reducción de aditivo o aumento de finos

Tabla 31. Problema-solución dosificación

4.3 Fabricación de vigas y probetas

Para la fabricación de las vigas se siguieron los siguientes pasos:

4.3.1 Elaboración de encofrados

Los encofrados de las vigas los realizaremos con tabloneros de conglomerado acabados con melamina blanca para evitar la adherencia del hormigón. Por motivos de suministro tuvimos que realizar tres con melamina y uno de contrachapado. Sus dimensiones son:

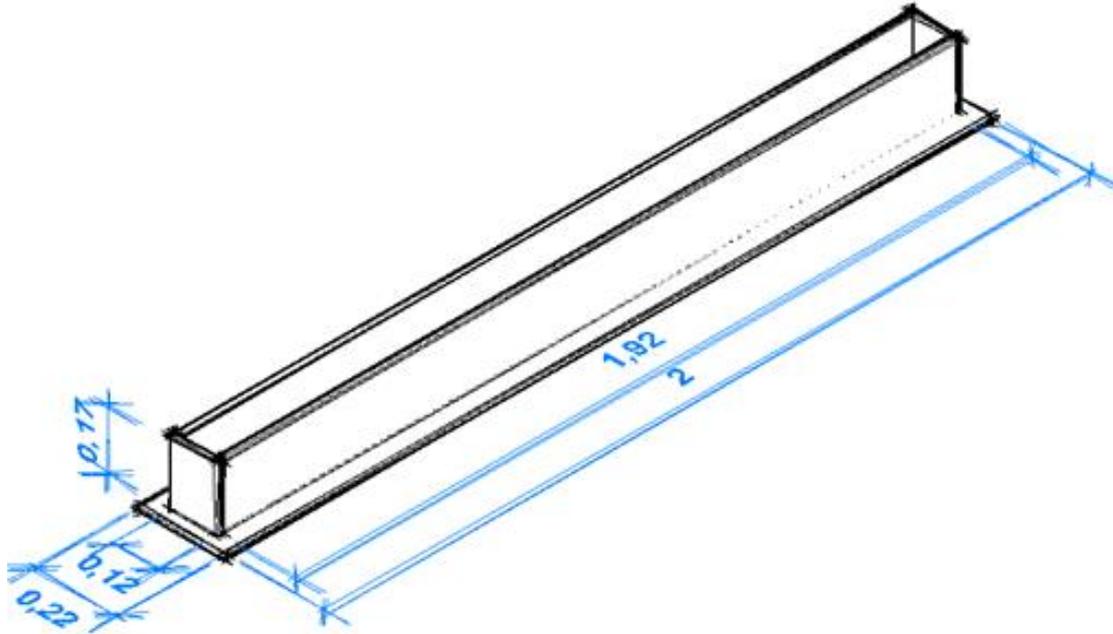


Figura 25. Encofrado



Imagen 28. Encofrado

Para evitar que a la hora del hormigonado de la viga el encofrado pudiera deformarse y/o levantarse de la base debido a la presión que ejerce la masa, se colocarán gatos en la parte superior para asegurar que el ancho de la viga sea de 10 cm y listones en los lados atornillados a la base y a los laterales con el fin de mantener el encofrado totalmente estanco.

4.3.2 Montaje de armado

Se realizaron en el laboratorio los procesos para ferrallar las vigas, es decir, el doblado, cortado y atado de las armaduras.



Imagen 29. Doblado de ferralla



Imagen 30. Cortado de ferralla



Imagen 31. Atado de la ferralla



Imagen 32. Atado de la ferralla

Armado longitudinal: en la parte inferior de la viga se colocan seis barras del diámetro 8 y en la parte superior dos barras del mismo diámetro. En cuanto al armado transversal, se colocan siete cercos simples o dobles de diámetro 6 colocados cada 30 cm a lo largo de la viga. La medida y disposición de las barras son:

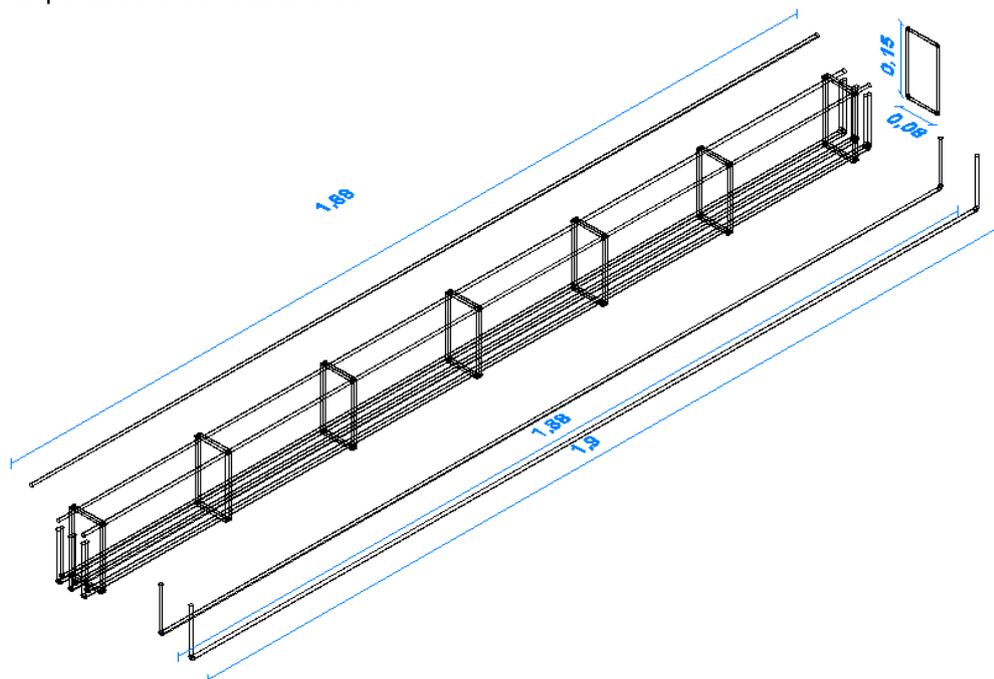


Figura 26. Despiece armado

4.3.3 Preparación de moldes y encofrados

Antes de hormigonar para facilitar posteriormente la tarea de desencofrado procederemos a “pintar” tanto los encofrados de vigas como los moldes de las probetas de aceite mineral, para asegurar así la no adherencia del hormigón a estos.



Imagen 33. Aceitado de los moldes

Imagen 34. Aceitado del encofrado

A la hora de colocar el armado de las vigas dentro de los encofrados colocamos separadores para asegurar que las vigas tengan un recubrimiento mínimo. Estos separadores los fabricaremos de hormigón para perder la menor resistencia posible. Colocaremos los separadores previamente a la armadura, para que esta no toque ni el fondo ni las paredes del encofrado, ya que estas están cubiertas de aceite y se perdería la adherencia entre el hormigón y el armado.



Imagen 35. Colocación de los separadores

4.3.4 Confección del hormigón

4.3.4.1 Obtención y corrección la humedad

Antes de la realización de la amasada se tendrá que calcular la humedad libre de los áridos y rectificar la cantidad de agua de la dosificación. Para la obtención de la humedad haremos distintas pesadas de cada uno de los áridos a emplear:

1. Paella + espátula (R)
2. Paella + espátula + árido húmedo (Mh)

Tras poner la paella en el fuego y esperar a que se evapore la humedad total de los áridos se realizará una nueva pesada:

3. Paella + espátula + árido seco (Ms)



Imagen 36. Pesado de paella+espátula



Imagen 37. Pesado de paella+espátula+árido húmedo



Imagen 38. Secado del árido

Para la obtención de la humedad libre emplearemos las siguientes fórmulas y consideraremos que la absorción es igual a 1.

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

$$\%H \text{ Libre} = H \text{ Total} - \text{Abs}$$

Tras el cálculo de la humedad libre se procederá a la corrección del agua en la amasada.

En la dosificación no se tiene en cuenta la humedad libre de los áridos, por lo que para la amasada se deberá corregir el peso seco del árido incrementando la cantidad de agua superficial del mismo.

Seguidamente, se corregirá el agua restando el incremento de peso de los áridos, para no variar la relación agua/cemento establecida.

Se seguirá la misma metodología descrita en esta dosificación para la obtención de la humedad y corrección de la misma y de la amasa en las posteriores dosificaciones.

4.3.4.2 Proceso de amasado

Una vez determinados los litros de amasada que necesitamos, precedemos al pesado de los distintos materiales.



Imagen 39. Pesado grava



Imagen 40. Pesado arena 0/2



Imagen 41. Pesado arena 0/4



Imagen 42. Pesado Filler calizo



Imagen 43. Pesado cemento



Imagen 44. Fibras poliméricas



Imagen 45. Pesada agua



Imagen 46. Pesada aditivo

Tras el pesado de los materiales procedemos al amasado del hormigón.

En primer lugar se procederá al vertido de la grava, seguidamente una de las arenas, a continuación el cemento y por último la arena restante y los finos. Con estos materiales se realizará un preamasado, al cabo de unos minutos se irá vertiendo la mitad del agua y minutos después el agua restante junto con el aditivo mezclado.



Imagen 47. Vertido de materiales en amasadora

En caso de que el hormigón a realizar contenga fibras estas se incorporaran a la amasadora en último lugar, una vez realizado los ensayos pertinentes de la masa exenta de fibras.

El tiempo de amasado desde la introducción de las fibras será el suficiente para que la masa se muestre homogénea.



Imagen 48. Amasado

4.3.5 Realización de ensayos de hormigón fresco para caracterización del autocompactante

Para la toma de muestra de los siguientes ensayos tendremos en cuenta las especificaciones marcadas en la UNE-EN 12350-1:2009.

Los ensayos a realizar en el hormigón fresco son:

4.3.5.1 Ensayo del escurrimiento

Los instrumentos empleados para la realización de este ensayo son los siguientes:

- Placa base
- Cono
- Collar

Para realizar el ensayo es necesario asegurarse de que la superficie de apoyo es completamente horizontal y carece de pendientes.

Se limpian la placa y el cono, y se humectan antes del ensayo, pero evitando un exceso de agua.

Se coloca el cono centrado en la placa base y se mantiene en esa posición mientras se llena el cono sin ninguna agitación ni compactación mecánica, y se enrasa la parte superior del cono retirando el exceso de hormigón. Seguidamente se levanta el cono de forma vertical sin interferir en el flujo del hormigón, formándose así la llamada “torta”.

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

- T_{50} : 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.



Imagen 49. Instrumentos para el ensayo de escurrimiento



Imagen 50. Proceso ensayo de escurrimiento

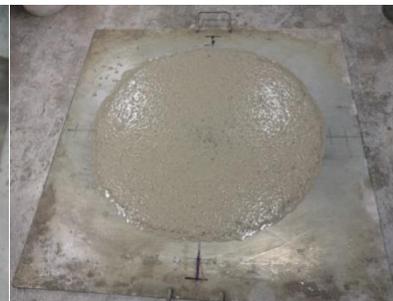


Imagen 51. Resultado de ensayo de escurrimiento

4.3.5.2 Ensayo del anillo J

Los instrumentos empleados para la realización de este ensayo son los siguientes:

- Placa base
- Cono
- Anillo J

Previamente a la realización del ensayo se limpian la placa y el cono, y se humectan, pero evitando un exceso de agua.

Se coloca el cono en el centro de la placa base y el anillo J concéntricamente a este. Se mantiene en esa posición mientras se llena el cono de una y sin ninguna compactación mecánica. Seguidamente se levanta el cono de forma vertical y una vez la muestra ha dejado de expandirse se toman los siguientes datos:

- Diámetro mayor del flujo (d_1) y su perpendicular (d_2).
- Altura entre la superficie superior de la muestra y del anillo en los 4 puntos exteriores situados en los ejes de la placa base.
- Altura comprendida entre la cara superior de la masa en el centro del anillo y la cara superior de este.

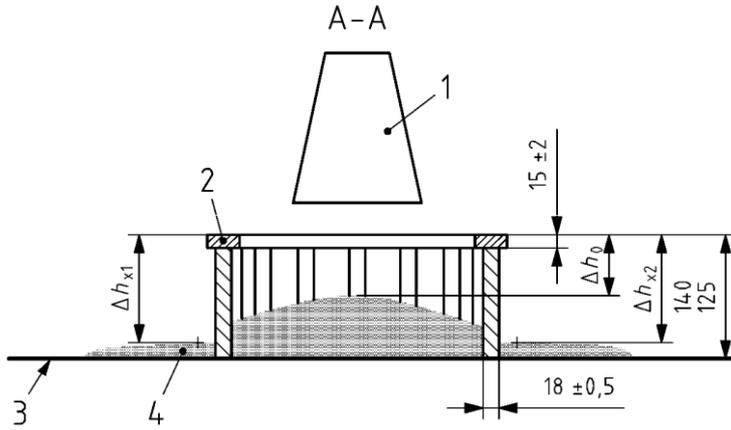


Figura 27. Ensayo de escurrimiento

Leyenda

- 1 Cono
- 2 Anillo japonés
- 3 Placa base
- 4 Hormigón

Δh Diferencia de altura entre la parte superior del anillo japonés y la altura máxima del hormigón en los puntos indicados

FORMULAS

Capacidad de paso PJ

$$PJ = \frac{(\Delta hx1 + \Delta hx2 + \Delta hy1 + \Delta hy2)}{4} - \Delta h0$$

Escurrimiento SFJ

$$SFJ = \frac{d1 + d2}{2}$$

Leyenda

PJ es la capacidad de paso calculada mediante el escalón de bloqueo, en milímetros;
 Δh son las medidas de las alturas, en milímetros;

Leyenda

SFJ es el escurrimiento, en milímetros;
 $d1$ es el mayor diámetro del flujo expandido, en milímetros;
 $d2$ es la medida del flujo expandido a 90º de $d1$, en milímetros.

Tabla 32. Fórmulas escurrimiento



Imagen 52. Instrumentos para el ensayo de anillo J



Imagen 53. Proceso ensayo anillo J



Imagen 54. Resultado de ensayo de anillo J

4.3.5.3 Ensayo del embudo en V

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

Previamente a realizar el ensayo humidificamos el embudo evitando un exceso de agua.

El ensayo consiste en el llenado completo del embudo en V con la muestra vertida de una sola vez y sin compactación mecánica una vez cerrada la compuerta inferior de este. Posteriormente se abre la compuerta inferior cronometrando el tiempo transcurrido desde su apertura hasta el vaciado total del embudo. A este tiempo lo denominaremos t_v .

El flujo de la muestra 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.



Imagen 55. Instrumentos para el ensayo del embudo en V



Imagen 56. Proceso y resultado de ensayo anillo J

4.3.5.4 Ensayo de determinación de contenido de aire (mediante el método del manómetro)

El ensayo consiste en introducir en un recipiente estanco agua hasta una altura predeterminada sobre una muestra de hormigón de volumen conocido y aplicar una presión de aire predeterminada sobre el agua. Esta presión se mide mediante un manómetro.

Proceso

1. Llenado y enrasado del recipiente
2. Cerrado y ajustado del recipiente
3. Introducción de agua en el sistema
4. Obtención del aire ocluido



1



2



3



4

Imagen 57. Conjunto de imágenes del ensayo para la determinación de contenido de aire

4.3.5.5 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 se realizará 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 33. Índice visual

4.3.6 Hormigonado de vigas y probetas



Imagen 58. Hormigonado viga

Una vez colocado el armado en los encofrados, preparados estos y la amasada realizada procedimos al hormigonado de la viga pertinente.



Imagen 59. Enrasado viga

Después de hormigonar la viga, hormigonamos dos probetas prismáticas y dos cilíndricas, para trascurridos 28 días poder realizar los ensayos de hormigón endurecido programados.



Imagen 60 y 61. Hormigonado de probetas

4.3.7 Desencofrado, desmoldado y transporte a la cámara de curado

Transcurridas 24 horas del hormigonado de probetas y de la viga, desencofraremos la viga, las cuatro probetas y las trasladaremos a la cámara de curado donde permanecerán 28 días hasta la realización de los ensayos pertinentes.



Imagen 62. Desencofrado viga



Imagen 63. Desencofrado probeta



Imagen 64. Vigas en cámara de curado



Imagen 65. Probetas en cámara de curado

4.4 Ensayos de hormigón endurecido en probetas

Las probetas permanecerán en la cámara de curado hasta momento del ensayo, es decir, 28 días después del hormigonado.

4.4.1 Preparación de probetas

Antes de realizar los ensayos prepararemos las probetas:

- Realizaremos una entalla de 10 mm por vía húmeda a las probetas prismáticas para provocar que se produzca la fisura en el centro de la probeta en el ensayo a flexión.
- Refrentaremos las probetas cilíndricas por ambas caras para asegurarnos de que las superficies de apoyo sean uniformes y no se produzcan cargas puntuales.



Imagen 66. Realización entalla probetas prismáticas



Imagen 67. Refrentado probetas cilíndricas

4.4.2 Ensayo a flexión en probetas prismáticas

Para la realización de este ensayo nos guiaremos por la UNE-EN 14651:2005+A1.

Una vez preparadas las probetas se procederá a la realización del ensayo.

En primer lugar colocaremos los apoyos a una distancia de 300mm, situaremos la probeta encima de los rodillos, lo más centrada posible. Le colocaremos en la zona de la entalla un medidor de desplazamientos (LVDT).

Posteriormente se procederá a la aplicación de la carga a una velocidad de 0,06 KN-s, la cual se realizará mediante un rodillo situado en el centro de la probeta. A su vez la máquina, dotada de un pistón, captará la deformación que determinará la progresión de la flecha.

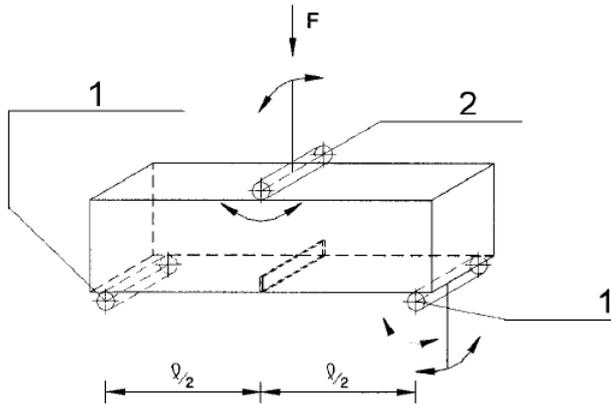


Figura 28 – Configuración de la carga sobre la probeta

Leyenda:

- 1** Rodillo de apoyo **2** Rodillo de carga



Imagen 68. Ensayo flexión en probeta prismáticas

El ensayo finalizará con la rotura de la probeta por la entalla. En el caso de que la fisura se produjera por otro lado daremos el ensayo como fallido.

La fórmula para la obtención de la tensión es:

$$\text{Tensión} = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times h^2}$$

4.4.3 Ensayo por compresión simple en probetas prismáticas

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

Este ensayo se realizará con una de las mitades obtenidas de una probeta prismática tras el ensayo de flexión. Dado que las dimensiones de la probeta objeto no son las adecuadas, se le colocará un adaptador para que las cargas actúen sobre una superficie de 100 x 100 mm.

Posteriormente se colocará cuidadosamente centrada en el plato inferior, se moverán los platos de la prensa de forma que el plato superior apoye en la cara superior del adaptador.

A continuación se aplicará la carga de forma continua y sin choques bruscos, con una velocidad de 0,6 MPa ·s. La carga se aplicará sin variación, hasta que la probeta se deforme rápidamente antes de la rotura tomándose como carga de rotura la máxima alcanzada.



Imagen 69. Ensayo compresión probeta prismática

4.4.4 Determinación del módulo de elasticidad a compresión

Para la realización de este ensayo nos guiaremos por la UNE-83316 y por la norma Hormigón (ANSI C469-65).

Una vez preparadas las probetas se procederá a la realización del ensayo.

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 incorporados en los anillos.

Para la realización del ensayo colocaremos la probeta dentro de los anillos lo más centrado posible y la fijaremos. Se coloca en la máquina de compresión y se calibra el dispositivo LVDT encargado de medir la deformación relativa entre los dos anillos.

Determinaremos la carga máxima del material mediante la rotura a compresión realizada anteriormente con las mitades de las probetas prismáticas y aplicaremos las tensiones hasta alcanzar el 40% de la resistencia a compresión del hormigón.

Durante todo el proceso se registran los movimientos relativos proporcionados por el LVDT en un ordenador, pues conociendo la distancia entre los dos anillos y el movimiento relativo entre ellos tenemos perfectamente descrita la evolución de la deformación durante el ensayo. Este ciclo de carga-descarga se produce 2 veces.



Imagen 70. Determinación del módulo de elasticidad a compresión

4.4.5 Ensayo por compresión simple en probetas cilíndricas

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

Una vez efectuado el ensayo del módulo de deformación procederemos a la rotura de las probetas cilíndricas mediante el ensayo de compresión.

Se colocará la probeta en el plato inferior, el cual tendrá marcas que sirvan de guía para un correcto centrado de la probeta y su espesor debe ser tal que asegure la indeformabilidad de los mismos durante el ensayo. Se moverán los platos de la prensa de forma que el plato superior apoye en la cara superior de la probeta.

También se colocará un dispositivo LVDT para determinar la evolución de la deformación de la probeta.

A continuación se aplicará la carga de forma continua y sin choques bruscos, con una velocidad de $0,6 \text{ MPa} \cdot \text{s}$. La carga se aplicará sin variación, hasta que la probeta se deforme rápidamente antes de la rotura tomándose como carga de rotura la máxima alcanzada.



Imagen 71. Ensayo de compresión en probetas cilíndricas

4.5 Ensayo en vigas

4.5.1 Preparación de vigas

Previamente al ensayo dejaremos una superficie completamente lisa y sin irregularidades en la zona de los apoyos y de las cargas. Se realizará una cuadrícula de 50 X 50 mm en la cara vista durante el ensayo, se marcará la situación de los cercos, de las cargas y de los apoyos. Por último se estimará la posible localización de la rotura por cortante y se colocarán los Demecs y se marcará la posición de los LVDT para calcular la deformación y/o apertura de fisura.

4.5.2 Rotura de vigas a flexión en cuatro puntos

Para la realización de este ensayo nos guiaremos por la UNE-83509.

El mecanismo para la aplicación de las cargas consistirá en dos rodillos para apoyo de la probeta y dos rodillos para aplicación de la carga. La distancia entre rodillos de apoyo será 1700 mm y la de los de carga será de 340 mm.

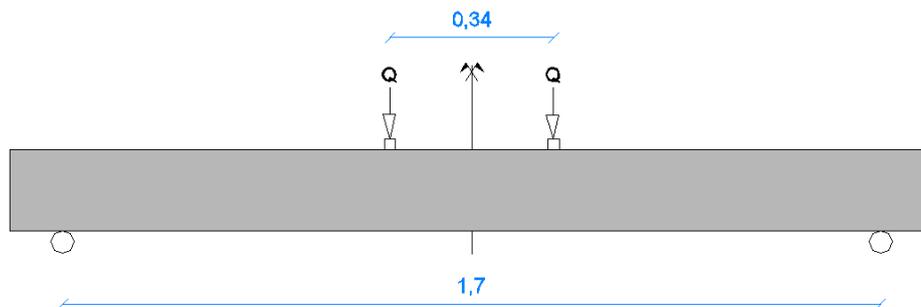


Figura 29. Situación de cargas y apoyos para ensayo a flexión en 4 puntos en viga

Una vez preparada la viga para el ensayo y colocada sobre los rodillos de apoyo lo más centrada posible se coloran en la zona marca los LVDT.

Posteriormente se procederá a la aplicación de la carga de forma uniforme a una velocidad constante de 0,06 KN·s. A su vez la máquina, dotada de un pistón, captará la deformación que determinará la progresión de la flecha.

Se debe tener en cuenta que en estos hormigones puede producirse una fisuración sin haberse alcanzado su carga de rotura; por tanto, debe continuarse el ensayo hasta que se produzca claramente la misma.



Imagen 72. Colocación Demecs

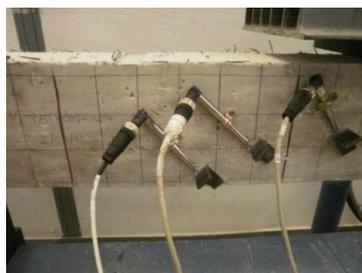


Imagen 73. Colocación LVDT



Imagen 74. Ensayo a flexión en 4 puntos



5. Análisis y resultados

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1 Ensayos previos

5.1.1 Ensayos acero

Para la determinación de las características del acero realizamos los siguientes ensayos:

5.1.1.1 Determinación de las características geométricas del acero

Previamente a la realización del ensayo tendremos en cuenta las siguientes definiciones:

Diámetro nominal (d): Número convencional sobre el que se establecen tolerancias. Se ajustarán a los diámetros siguientes. **6-8-10-12-14-16-20-25-32-40**

Área de la sección nominal (As en cm²).- Se determinará a partir del diámetro nominal $A_s = \pi \cdot d^2 / 4$ siendo **d** el diámetro nominal de la barra.

Área de la sección equivalente. (As real en cm²) El área de la sección equivalente incluye corrugas y aletas. Se determinará a partir de la masa y densidad del acero, tomando densidad de 7,85 g/cm³.

$$V = m/D$$

$$V = A \times l$$

$$A_{s \text{ real}} = \frac{m}{D \times l}$$

$A_{s \text{ real}}$	Sección en cm ² .
m	Masa de la barra en g.
l	Longitud de la barra en cm.
D	Densidad acero 7,85 g/cm ³ .

Los resultados obtenidos tras los ensayos realizados en las barras del 6 de la primera recepción de material empleados para hacer cercos son:

	Barra ϕ 6 mm (6N-1)	Rango normativo
	$A_s = 28,27$	$A_s \text{ real } 0,955 \cdot A_s$
Sección equivalente (mm ²)	$0,955 \times A_s = 27,00$	$27,54 \geq 27 \text{ mm}^2$
	$A_s \text{ real} = 27,54$	CUMPLE
Altura de corruga (mm)	0,51	$0,3 \cdot \phi$ a $0,15 \cdot \phi = 0,18 \text{ mm}$ a $0,9 \text{ mm}$
Separación de corrugas (mm)	4,6	$0,4 \cdot \phi$ a $1,2 \cdot \phi = 2,4 \text{ mm}$ a $7,2 \text{ mm}$
Inclinación de corruga 1 (°C)	39	entre 35° y 75°
Inclinación de corruga 2 (°C)	61	
Área proyectada de corruga (fr) (mm)	0,039	$fr \geq 0,039$

Tabla 34. Resultados características geométricas del acero ϕ 6N mm

Los resultados obtenidos tras los ensayos en las barras del 8 de la primera recepción de material son:

Barra \varnothing 8 mm (8N)	Rango normativo	
	As = 50,27	As real \geq 0,955 · As
Sección equivalente (mm ²)	0,955 x As = 48,01	49,52 > 48,01 mm ²
	As real = 49,52	CUMPLE
Altura de corruga (mm)	0,76	0,3· \varnothing a 0,15· \varnothing = 0,24 mm a 1,2 mm
Separación de corrugas (mm)	5,89	0,4· \varnothing a 1,2· \varnothing = 3,2 mm a 9,6 mm
Inclinación de corruga 1 (°C)	39	entre 35° y 75°
Inclinación de corruga 2 (°C)	61	
Área proyectada de corruga (fr) (mm)	0,045	fr \geq 0,045

Tabla 35. Resultados características geométricas del acero \varnothing 8N mm

Los resultados obtenidos tras los ensayos en las barras del 8 de la segunda recepción de material son:

Barra \varnothing 8 mm (8V)	Rango normativo	
	As = 50,27	As real \geq 0,955 · As
Sección equivalente (mm ²)	0,955 x As = 48,00	49,74 > 48,00 mm ²
	As real = 49,74	CUMPLE
Altura de corruga (mm)	0,73	0,3· \varnothing a 0,15· \varnothing = 0,24 mm a 1,2 mm
Separación de corrugas (mm)	5,9	0,4· \varnothing a 1,2· \varnothing = 3,2 mm a 9,6 mm
Inclinación de corruga 1 (°C)	39	entre 35° y 75°
Inclinación de corruga 2 (°C)	61	
Área proyectada de corruga (fr) (mm)	0,045	fr \geq 0,045

Tabla 36. Resultados características geométricas del acero \varnothing 8V mm

5.1.1.2 Ensayo de tracción del acero

Previamente a la realización del ensayo se midió la longitud de la barra a ensayar y se pesaron, seguidamente se realizaron marcas a lo largo de toda la barra a una distancia igual a 5 veces el diámetro para obtener el alargamiento de rotura tras la realización del ensayo.



Imagen 75 marcado barras para ensayo a tracción



Imagen 76 marcado barras para ensayo a tracción

Tras el ensayo se midió la distancia entre las marcas realizadas anteriormente para calcular el alargamiento que se ha producido.



Imagen 77. Medición tras el ensayo de tracción

Los datos obtenidos tras el ensayo realizado en una muestra de $\varnothing 6$ del primer suministro fueron:

TIPO DE FERRALLA		CODIGO
$\varnothing 6$ muestra 2 ferralla 2		Barra-6-2N
DATOS MUESTRA		
Longitud = 60,7 cm	$\varnothing = \frac{130,2}{7,85 \times 60,7} = 0,273$	
Masa = 130,2 g		
Densidad acero = 7,85 g/cm ³		
	$\varnothing_{nom} = \pi \times r^2 = 28,274$	
	Tolerancia = 28,274 x 0,945 = 26,72	
DATOS ENSAYO		
Fuerza = 18,629 KN		inf= 577,5
Resistencia = 658,9 Mpa	Limite elástico	Sup = 581,8
Módulo de elasticidad = 189315 MPa		conv= 579,7
RESULTADOS		
Alargamiento de rotura		
Datos: 37,45mm; 37,45mm	Al rotura = $\frac{37,45 - 30}{30} \times 100 = 24,833\%$	
Media: 37,45mm		
Alargamiento bajo carga máxima		
Datos: 163mm; 163mm	Media: 163mm	
	$Al = \frac{163 - 150}{150} \times 100 = 8,667 \%$	
	$X = \frac{658,9}{200.000} \times 100 = 0,329 \%$	
	Al max = 8,667 + 0,329 = 8,996 %	

 Tabla 37. Resultados ensayo tracción acero $\varnothing 6$ mm

Los datos obtenidos tras el ensayo realizado en una muestra de $\varnothing 8$ del primer suministro fueron:

TIPO DE FERRALLA		CODIGO
$\varnothing 8$ muestra 3 ferralla 1		Barra-8-3V
DATOS MUESTRA		
Longitud = 60,9 cm	$\varnothing = \frac{234,9}{7,85 \times 60,9} = 0,491$	
Masa = 234,9 g		
Densidad acero = 7,85 g/cm ³		
	$\varnothing_{nom} = \pi \times r^2 = 50,264$	
	Tolerancia = 50,264 x 0,945 = 47,50	
DATOS ENSAYO		
Fuerza = 33,238 KN		inf= 576,3
Resistencia = 661,3 Mpa	Limite elástico	sup= 586,7
Módulo de elasticidad = 214205 MPa		conv= 590,2
RESULTADOS		
Alargamiento de rotura		
Datos: 49,6mm; 49,6mm	Al rotura = $\frac{49,6 - 40}{40} \times 100 = 24,000\%$	
Media: 49,6mm		

Alargamiento bajo carga máxima	
Datos: 174mm; 174mm	Media: 174mm
$Al = \frac{174 - 160}{160} \times 100 = 8,750 \%$	
$X = \frac{661,3}{200.000} \times 100 = 0,331 \%$	
$Al \max = 8,75 + 0,331 = 9,081 \%$	

Tabla 38. Resultados ensayo tracción acero Ø8V mm

Los datos obtenidos tras el ensayo realizado en una muestra de Ø8 del segundo suministro fueron:

TIPO DE FERRALLA	CODIGO	
Ø 8 muestra 2 ferralla 2	Barra-8-4N	
DATOS MUESTRA		
Longitud= 60,8 cm	$\varnothing = \frac{238}{7,85 \times 60,8} = 0,499$	
Masa= 238 g		
Densidad acero= 7,85 g/cm ³	$\varnothing_{nom} = \pi \times r^2 = 50,264$	
	Tolerancia= 50,264 x 0,945 = 47,50	
DATOS ENSAYO		
Fuerza= 32,041 KN		inf= 545,9
Resistencia= 637,4 Mpa	Limite elástico	sup= 542,9
Módulo de elasticidad = 214203 MPa		conv= 544,1
RESULTADOS		
Alargamiento de rotura		
Datos: 51,5mm; 51,5mm	$Al \text{ rotura} = \frac{51,5 - 40}{40} \times 100 = 28,750\%$	
Media: 51,5mm		
Alargamiento bajo carga máxima		
Datos: 177,5mm; 176,5mm	Media: 177mm	
$Al = \frac{177 - 160}{160} \times 100 = 10,625 \%$		
$X = \frac{637,4}{200.000} \times 100 = 0,319 \%$		
$Al \max = 10,625 + 0,319 = 10,944 \%$		

Tabla 39. Resultados ensayo tracción acero Ø8N mm

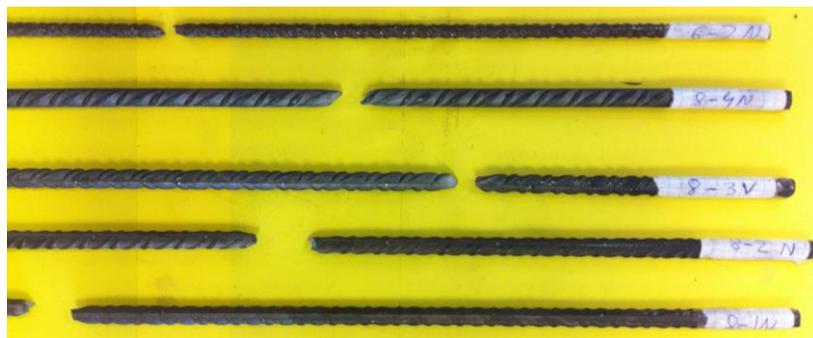


Imagen 78. Roturas barras tras ensayo tracción

5.1.2 Pruebas de dosificación

Puesto que el hormigón que hemos realizado es un hormigón autocompactante al que le vamos incorporando cantidades distintas de fibras para estudiar su efecto en el mismo, se realizaron numerosas dosificaciones hasta llegar a los valores que habíamos estimado como ideales para la confección de nuestro hormigón, tal y como se ha detallado en el punto 4.2 del proyecto.

Ensayo	Rango admisible	Valor ideal
Escurrecimiento	T50 2-8 s	2-4 s
	Df 650 - 750 mm	700mm
Embudo en V	TV 6-10seg	-
Escurrecimiento con anillo J	$\geq df-50$ mm	-

Tabla 40. Valores ideales para nuestro HAC

5.1.1.1 Dosificación 1

Para la determinación de esta primera dosificación se tomó como partida una dosificación proporcionada por los tutores del taller José Ramón Albiol Ibáñez y Luis García Ballester. Contemplada en el programa experimental como propuesta A ($a/c = 0,4$; $cem = 500$ kg/m^3).

Material	Dosificación kg/m^3	Amasada kg/N (20 l)
Cemento	500	10
H2O	190	3,8
Arena 0/2	507,5	10,15
Arena 0/4	507,5	10,15
Grava	650	13
Aditivo Sika Viscocrete 20 HE (2%)	10	0,2
Volumen	1001	20
Peso matriz	2355 (kg)	47
A/C	0,4	0,4

Tabla 41. Dosificación propuesta A

Antes de la realización de la amasada se tuvo que calcular la humedad libre de los áridos y rectificar la cantidad de agua de esta. Para la obtención de la humedad hicimos distintas pesadas tanto para la arena 0/2 como para la arena 0/4.

En la arena 0/2 obtuvimos como pesadas iniciales:

- Paella + espátula: 534,2g
- Paella + espátula + arena 0/2 húmeda: 694,8g

Tras poner la paella en el fuego y esperar a que se evaporase la humedad total de la arena obtuvimos:

Paella + espátula + arena 0/2 seca: 678g

En la arena 0/4 las pesadas iniciales fueron:

- Paella + espátula: 534,2g
- Paella + espátula + arena 0/2 húmeda: 668,3g

Tras poner la paella en el fuego y esperar a eliminar la humedad total de la arena la pesada fue:

- Paella + espátula + arena 0/2 seca: 660,5g

Para la corrección de la humedad consideramos que el árido empleado tenía una absorción del 1% y sacamos los siguientes datos:

Arena 0/2 (Obtención de la humedad libre)	Arena 0/4 (Obtención de la humedad libre)
694,8 – 678 = 16,8 g de H2O	668,3 - 660,5 = 16,8 g de H2O
694,8 - 524,2 = 170,6 g de arena H	668,3 - 524,2 = 170,6 g de arena H
Arena S = Arena H - H2O = 153,8 g de arena S	Arena S = Arena H - H2O = 136,3 g de arena S
153,8 ---> 100 x = 10,92 % de HT	136,3 ---> 100 x = 5,72 % de HT
16,8 ---> x	7,8 ---> x
Absorción = 1 % HT = Hlibre + Abs	Absorción = 1 % HT = Hlibre + Abs
H libre = 9,92 %	H libre = 4,72 %

Tabla 42. Obtención de la humedad

Tras el cálculo de la humedad libre procedimos a la rectificación de las cantidades de la amasada.

Material	Amasada Sin corregir	Amasada con Humedad corregida
	kg/N (20 l)	N =20 l (kg)
Cemento	10	10
H2O	3,8	3,8-1-0,48= 2,32
Arena 0/2	10,15	10,15x1,099= 11,15
Arena 0/4	10,15	10,15x1,047= 10,63
Grava	13	13
Aditivo Sika Viscocrete 20 HE	0,2	0,2

Tabla 43. Amasada Dosificación 1 corregida

Se seguirá la misma metodología descrita en esta dosificación para la obtención de la humedad y corrección de la misma y de la amasa en las posteriores dosificaciones.

Tras la realización de la amasada se realizó el ensayo de escurrimiento, en el cual fue correcto el diámetro máximo y el T₅₀, pero tras el vertido del hormigón en las probetas observamos que la masa exudaba, ya que como se puede observar en la foto los finos ascienden a la superficie.



Imagen 79 resultados dosificación 1

5.1.1.2 Dosificación 2

Para esta dosificación hicimos una pequeña modificación de la anterior en la cantidad de aditivo, se disminuyó este de 2 a 1% debido a que en la anterior amasada se habían observado signos de exudación. Para dicha amasada no se corrigió la humedad ya que realizó inmediatamente después de la primera, por lo que se consideró que los áridos tenían la misma humedad libre. El diámetro máximo obtenido en el ensayo de escurrimiento fue de 760mm.



Imagen 80 resultados escurrimiento dosificación 2

5.1.1.3 Dosificación 3

Tras la realización de las dos amasadas anteriores se procedió a la dosificación de la propuesta B ($a/c = 0,6$; $cem = 325 \text{ kg/m}^3$), con el fin de reducir la cantidad de cemento ya que era excesiva y poco económica. Puesto que nuestro hormigón es autocompactante y por ello necesita más cantidad de finos sustituiremos la cantidad que dejaremos de aportar con el cemento por filler calizo. Las variaciones realizadas en esta dosificación con respecto a la anterior serían el aumento de la relación agua/cemento, la disminución de cemento y la incorporación de finos a la dosificación.

La humedad libre obtenida fue:

- Arena 0/4: 2,02
- Arena 0/2: 5,28
- Grava: 0,57

Material	Kg/m ³	N = 10 L (kg)
Cem	325	3,25
Agua	195	1,53
Finos	65	0,65
Arena 0/2	486	4,86
Arena 0/4	678	6,78
Grava	650	6,5
Volumen	1001	23,57
Aditivo 1% Sika Viscocrete 20 HE	3,25	0,0325
A/C = 0,6		

Tabla 44. Amasada Dosificación 3 corregida

Tras la realización de la amasada se hizo el ensayo de escurrimiento para ver la extensión y fluidez del hormigón, comprobando a su vez la segregación y cohesión de la masa, realizando así el índice de inspección visual, obteniendo como resultados:

- $T_{50} = 3,5$ s
- $\varnothing = 730$ mm

Comprobamos que la torta se excede un poco del diámetro idea y se aprecia una pequeña segregación y falta de cohesión, por lo que procedimos a una reamasada aportando finos.



Imagen 81 resultados escurrimiento dosificación 3

5.1.1.4 Dosificación 4

Tras los resultados obtenidos en el ensayo de escurrimiento de la dosificación 3 se decidió añadirle a la misma amasada 400 g de finos, con el fin de aportarle más cohesión a la masa y así evitar la segregación de esta. Al realizar nuevamente el ensayo de escurrimiento obtuvimos:

- $T_{50} = 5,5$ s
- $\varnothing = 600$ mm

Las consecuencias del aporte de finos fueron una muestra más cohesionada, sin segregación pero con falta de fluidez, por lo que no llegamos al diámetro ideal.

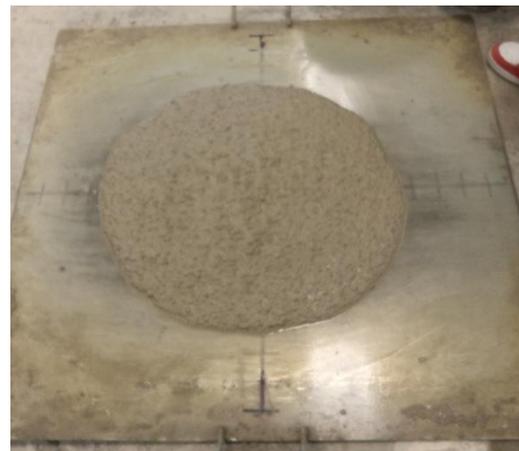


Imagen 82 resultados escurrimiento dosificación 4

5.1.1.5 Dosificación 5

Pues que no obtuvimos los resultados esperados con el aumento de finos, probaremos a reducir la cantidad de aditivo, de 1-0,8%.

Material	Kg/m ³	N = 10 L (kg)
Cem	325	3,25
Agua	195	1,53
Finos	65	0,65
Arena 0/2	486	4,86
Arena 0/4	678	6,78
Grava	650	6,5
Volumen	1001	23,57
Aditivo 0,8% Sika Viscocrete 20 HE	2,6	0,026
A/C = 0,6		

Tabla 45. Amasada Dosificación 5 corregida

Los resultados tras hacer el ensayo de escurrimiento fueron:

- $T_{50} = 4$ s
- $\varnothing = 700$ mm

Comprobamos que la torta tiene un diámetro final correcto y que presenta fluidez con buena cohesión y no muestra segregación. Por lo que procedemos a realizar más ensayos para comprobar que el hormigón está entre todos los parámetros correctos que caracterizan a un hormigón autocompactante.

Efectuamos el ensayo del embudo en V dando como resultado más de 1 minuto. Al realizar el ensayo del anillo J comprobamos que la masa no fluye en absoluto.

Deducimos que puesto que el ensayo de escurrimiento ha sido correcto el problema en los otros ensayos ha sido causado por la corta duración de efectividad del aditivo, por lo que modificaremos el tipo de aditivo.



Imagen 83 Resultados escurrimiento dosificación 5



Imagen 84. Resultados anillo J dosificación 5

5.1.1.6 Dosificación 6

Realizamos una nueva amasada manteniendo la misma dosificación pero cambiando el tipo y la cantidad de aditivo. En esta amasada empleamos un 2% de Sikaplast 380.

En el ensayo de escurrimiento obtenemos los siguientes valores:

- $T_{50} > 10$ s
- $\varnothing = 540$ mm

Por lo que comprobamos que el hormigón presenta falta de fluidez. Por ello procedemos a la modificación de la cantidad de finos.



Imagen 85 Resultados escurrimiento dosificación 6

5.1.1.7 Dosificación 7

Tras observar en el ensayo anterior falta de fluidez en la masa reduciremos la cantidad de finos de $65 \text{ kg/m}^3 - 27,3 \text{ kg/m}^3$.

Al realizar el ensayo de escurrimiento observamos:

- T_{50} : no lo alcanzó
- $\varnothing = 400\text{mm}$

Comprobamos que el hormigón es tan compacto que no fluye, por lo que procedemos a cambiar el aditivo nuevamente.



Imagen 86 Resultados escurrimiento dosificación 7

5.1.1.8 Dosificación 8

Material	Kg/m ³	N = 11 L (kg)
Cem	325	3,58
Agua	195	1,59
Finos	18,5	0,2
Arena 0/2	517	6,06
Arena 0/4	757	8,51
Grava	553,9	6,09
Volumen	1001	26,03
Aditivo 1,3% Sika Viscocrete 3425	4,225	0,0465
A/C = 0,6		

Tabla 46. Amasada Dosificación 8 corregida

Tras realizar la amasada hicimos el ensayo de escurrimiento dando como resultado:

- T_{50} : 3,5 s
- $\varnothing = 680-690\text{mm}$

Comprobamos que la torta tiene un diámetro final correcto por lo que, presenta buena fluidez con cohesión y sin muestras de segregación, por lo que procedemos a realizar los siguientes ensayos.

- Embudo en V: 12s.
- Anillo J: 660-670mm



Imagen 87 Resultados escurrimiento dosificación 8

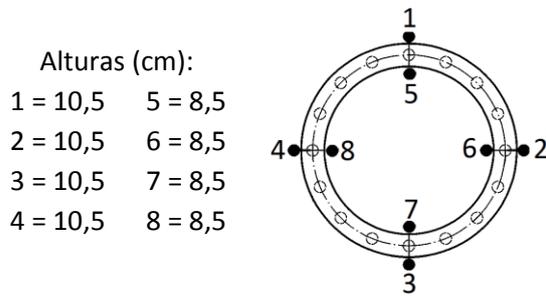


Imagen 88 Resultados anillo J dosificación 8

Consideramos esta como una buena dosificación pero seguiremos probando para intentar conseguir llegar a los valores ideales para nuestro hormigón autocompactante.

5.1.1.9 Dosificación 9

Como paso previo calculamos la humedad libre de los áridos:

- Arena 0/4: 1,56
- Arena 0/2: 2,6
- Grava: 0,06

Material	Kg/m ³	N = 12 L (kg)
Cem	325	3,9
Agua	195	1,95
Finos	18,33	0,22
Arena 0/2	537,5	6,45
Arena 0/4	769,17	9,23
Grava	554,17	6,65
Volumen	1001	28,39
Aditivo 1,4% Sika Viscocrete 3425	4,55	0,0546
A/C = 0,6		

Tabla 47. Amasada Dosificación 9 corregida

Realizamos el ensayo de escurrimiento y los datos obtenidos fueron:

- T_{50} : 3,8 s
- \varnothing = 670mm

Comprobamos que la torta tiene un diámetro correcto, presenta fluidez con cohesión y sin segregación. Así pues, procedemos a hacer los siguientes ensayos:

- Embudo en V: 17s.
- Anillo J: 490-520mm

Consideramos que la velocidad en el ensayo del embudo en V es algo lenta y que el anillo J retiene demasiado. Por lo que procedemos a realizar más amasadas de prueba.

5.1.1.10 Dosificación 10

Ya que las dosificaciones anteriores no han sido del todo satisfactorias, procederemos a realizar una nueva dosificación por el método de Bolomey. Previamente rectificamos la humedad:

- Arena 0/4: 2,2
- Arena 0/2: 8,62
- Grava: 0,42

Matetial	Kg/m3	N = 12 L (kg)
Cem	325	3,9
Agua	195	1,55
Finos	20	0,24
Arena 0/2	668,33	8,02
Arena 0/4	414,17	4,97
Grava	851,67	10,22
Volumen	1001	28,9
Aditivo 1,5% Sika Viscocrete 3425	4,875	0,0585
Bolomey a=20		

Tabla 48. Amasada Dosificación 10 corregida

Tras la realización de la amasada hicimos el ensayo de escurrimiento. El ensayo se consideró fallido por lo que no pudimos tomar datos, ya que presentaba una segregación total. Por lo que procedemos a realizar una reamasada incrementando la cantidad de finos.

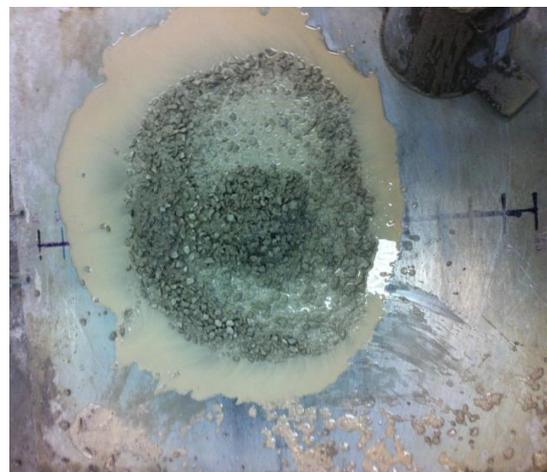


Imagen 89 Resultados escurrimiento dosificación 10

5.1.1.11 Dosificación 11

Añadimos a la dosificación anterior 500g de finos para aportarle mayor cohesión, evitando así la segregación de la masa.

Los datos obtenidos en el ensayo de escurrimiento fueron:

- T_{50} : 3,5 s
- \varnothing = 760mm

Dado que los datos obtenidos son correctos procedimos a realizar los siguientes ensayos:

- Embudo en V: 15s.
- Anillo J: 640-670mm

Consideramos que el ensayo del embudo en V ha sido demasiado lento y que el anillo J ha tenido una retención mayor de 5 cm en cuanto al diámetro, por lo que desechamos esta dosificación.



Imagen 90 Resultados escurrimiento dosificación 11



Imagen 91 Resultados anillo J dosificación 11

5.1.1.12 Dosificación 12

Matetial	Kg/m3	N = 12 L (kg)
Cem	325	3,9
Agua	195	1,43
Finos	20	0,24
Arena 0/2	825	9,9
Arena 0/4	280,83	3,37
Grava	830,83	9,97
Volumen	1001	28,81
Aditivo 1,5% Sika Viscocrete 3425	4,875	0,0585
Bolomey a=22		

Tabla 49. Amasada Dosificación 12 corregida

El ensayo de escurrimiento lo consideramos no válido ya que comprobamos que la masa segrega .Existe una falta de fino o exceso de agua y/o aditivo por lo que reamasamos y corregimos los finos.

5.1.1.13 Dosificación 13

Al presentar segregación la amasada anterior procedemos a aportar 250g de finos y reamasamos. El ensayo de escurrimiento dio:

- T_{50} : 3 s
- $\varnothing = 760-810\text{mm}$

Observamos que el diámetro obtenido es un poco superior al deseado, no obstante procedemos a realizar el ensayo del embudo en V y del anillo J, ya que con el aporte de fibras para el hormigonado de las vigas el diámetro de la torta posiblemente disminuirá.



Imagen 92 Resultados escurrimiento dosificación 13

Los datos obtenidos fueron:

- Embudo en V: 21s.
- Anillo J: 690-700mm

Consideramos que la masa descende muy lenta en el embudo en V y el anillo J retiene más de lo debido, por lo que corregiremos la dosificación.



Imagen 93 Resultados anillo J dosificación 13

5.1.1.14 Dosificación 14

Puesto que la anterior dosificación tenía un exceso de árido grueso redujimos la cantidad de este y aportamos finos para darle mayor fluidez. También disminuimos la cantidad de aditivo 1,5-1,3%

Matetial	Kg/m3	N = 12 L (kg)
Cem	325	3,9
Agua	195	1,43
Finos	40,83	0,49
Arena 0/2	825	9,9
Arena 0/4	280,83	3,37
Grava	783,33	9,94
Volumen	1001	28,49
Aditivo 1,3% Sika Viscocrete 3425	4,225	0,0507
Bolomey a=22		

Tabla 50. Amasada Dosificación 14 corregida

Con el ensayo de escurrimiento obtuvimos los siguientes datos:

- T_{50} : 3 s
- $\varnothing = 700-720\text{mm}$
-

Puesto que los datos del ensayo de escurrimiento son muy cercanos al ideal, continuamos con el ensayo de embudo en V y anillo J.

- Embudo en V: 10s.
- Anillo J: 660-650mm

Los datos obtenidos en los ensayos anteriores son satisfactorios, pero en la "torta" observamos una ligera exudación.



Imagen 94 Resultados anillo J dosificación 14

5.1.3 Dosificación definitiva

Tras repasar las dosificaciones realizadas, consideramos como óptima para la realización de las amasadas para nuestras vigas la dosificación número 8.

Material	Kg/m3
Cem	325
Agua	195
Finos	18,5
Arena 0/2	517
Arena 0/4	757
Grava	553,9
Aditivo 1,3% Sika Viscocrete 3425	4,225
A/C = 0,6	

Tabla 51. Dosificación Definitiva

5.2 Ensayos en hormigón fresco

Para la caracterización del hormigón realizamos en primer lugar el ensayo de escurrimiento sin fibras, seguidamente realizamos el mismo ensayo pero con fibras, posteriormente el ensayo del anillo J y por último el del embudo en V. Los resultados obtenidos en las distintas amasadas se detallan a continuación.

5.2.1 Amasada V.1.1 para viga y probetas

Para la realización de la amasada de la viga V.1.1 y sus probetas, primeramente se obtuvo la humedad libre de los áridos y se corrigió la cantidad de agua en la amasada.

a/c 0,6	Dosificación		Dosificación		Amasada de 60 litros		
Material	(kg/m3)	Densidad	Volumen	correc. H ₂ O	Sin corregir	Corregida	H libre
Cem	325	3	108,3	325	19,50	19,50	
Agua	195	1	195,0	140,63	11,70	8,68	
Finos	18,5	2,65	7,0	18,5	1,11	1,11	
A fina	517,0	2,65	195,1	558,82	31,02	33,06	0,0659
A grue	757,0	2,65	285,6	775,89	45,42	46,39	0,0215
Grava	553,9	2,65	209,0	553,88	33,23	33,23	0,000
Volumen	1001				141,98	141,98	
aditivo 1,3 %	4,225	1,05	4,02			0,2535	
fibras T60						SIN FIBRAS	

Tabla 52. Amasada Dosificación V.1.1 corregida

Se hizo la amasada con la dosificación descrita y se realizaron los ensayos en hormigón fresco para su caracterización.

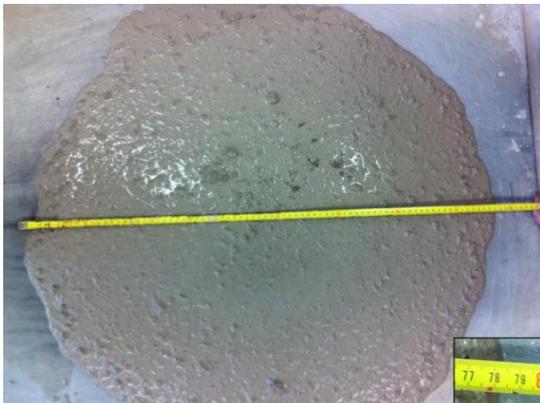


Imagen 95 Resultados escurrimiento amasada V.1.1



Imagen 96 Resultados anillo J amasada V.1.1

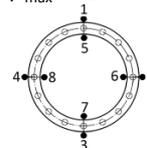
Ensayo de escurrimiento:

$T_{50} = 3$ s

$\varnothing_{\text{máx}} = 780$ mm

Ensayo Anillo J:

$\varnothing_{\text{máx}} = 715-730$ mm



Alturas (cm):

1 = 11 5 = 10
 2 = 11 6 = 9,5
 3 = 11 7 = 10
 4 = 11 8 = 10

Embudo en V: 7,5 s

5.2.2 Amasada V.1.2 para viga y probetas

Previamente a la amasada V.1.2 se calculó la humedad libre y se corrigió la cantidad de agua en la amasada.

a/c 0,6 Material	Dosificación			Dosificación correc. H ₂ O	Amasada de 55 litros		
	(kg/m ³)	Densidad	Volumen		Sin corregir	Corregida	H libre
Cem	325	3	108,3	325	17,88	17,88	
Agua	195	1	195,0	140,63	10,73	7,96	
Finos	18,5	2,65	7,0	18,5	1,02	1,02	
A fina	517,0	2,65	195,1	558,82	28,43	30,31	0,0659
A grue	757,0	2,65	285,6	775,89	41,63	42,53	0,0215
Grava	553,9	2,65	209,0	553,88	30,46	30,46	0,000
Volumen	1001				130,14	130,14	
aditivo 1,3 %	4,225	1,05	4,02			0,232375	
fibras T60	12,4					0,6820	

Tabla 53. Amasada Dosificación V.1.2 corregida

Los ensayos realizados en el hormigón fresco tras el amasado fueron:

Ensayo de escurrimiento:



Imagen 97 Resultados escurrimiento sin fibras amasada V.1.2



Imagen 98 Resultados escurrimiento con fibras amasada V.1.2

Sin fibras:

$$T_{50} = 3 \text{ s}$$

$$\varnothing_{\text{máx}} = 715-735 \text{ mm}$$

Con fibras:

Debido al exceso de fibras se dio como nulo el ensayo, por lo que no se tomaron datos, ni se realizaron los ensayos de anillo J ni del embudo en V.

Embudo en V: Nulo, debido al exceso de fibras el embudo se atascó.

5.2.3 Amasada V.1.3 para viga y probetas

La dosificación y la amasada corregida tras la obtención de la humedad libre de los áridos fue la siguiente:

a/c 0,6 Material	Dosificación		Dosificación		Amasada de 60 litros		
	(kg/m3)	Densidad	Volumen	correc. H ₂ O	Sin corregir	Corregida	H libre
Cem	325	3	108,3	325	19,50	19,50	
Agua	195	1	195,0	130,35	11,70	8,06	
Finos	18,5	2,65	7,0	18,5	1,11	1,11	
A fina	517,0	2,65	195,1	558,82	31,02	33,53	0,0811
A grue	757,0	2,65	285,6	775,89	45,42	46,54	0,0247
Grava	553,9	2,65	209,0	553,88	33,23	33,23	0,0000
Volumen	1001				141,98	141,98	
aditivo 1,3 %	4,225	1,05	4,02			0,2535	
fibras T60	6,2					0,3720	

Tabla 54. Amasada Dosificación V.1.3 corregida

Tras la amasada se realizó el ensayo de escurrimiento, el anillo J y embudo en V.

Ensayo de escurrimiento:



Imagen 99 Resultados escurrimiento sin fibras amasada V.1.3

Sin fibras:

$T_{50} = 3,3$ s
 $\varnothing_{\text{máx}} = 720-730$ mm



Imagen 100 Resultados escurrimiento con fibras amasada V.1.3

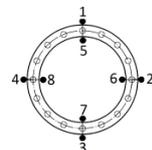
Con fibras:

$T_{50} = 5$ s
 $\varnothing_{\text{máx}} = 680-720$ mm

Ensayo Anillo J:



Imagen 101 Resultados anillo J con fibras amasada V.1.3



$\varnothing_{\text{máx}} = 500$ mm

Alturas (cm):

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

Embudo en V: 14 s

5.2.4 Amasada V.1.4 para viga y probetas

a/c 0,6	Dosificación			Dosificación	Amasada de 55 litros		
Material	(kg/m3)	Densidad	Volumen	correc. H ₂ O	Sin corregir	Corregida	H libre
Cem	325	3	108,3	325	17,88	17,88	
Agua	195	1	195,0	122,73	10,73	6,97	
Finos	18,5	2,65	7,0	18,5	1,02	1,02	
A fina	517,0	2,65	195,1	558,82	28,43	30,74	0,0812
A grue	757,0	2,65	285,6	775,89	41,63	43,08	0,0347
Grava	553,9	2,65	209,0	553,88	30,46	30,46	0,000
Volumen	1001				130,14	130,14	
aditivo 1,3 %	4,225	1,05	4,02			0,232375	
fibras T60	12,4					0,6820	

Tabla 55. Amasada Dosificación V.1.4 corregida

Los ensayos realizados para la caracterización del hormigón en estado fresco que hicimos son:

Ensayo de escurrimiento:



Imagen 102 Resultados escurrimiento sin fibras amasada V.1.4

Sin fibras:

$T_{50} = 3$ s

$\varnothing_{\text{máx}} = 735-780$ mm



Imagen 103 Resultados escurrimiento con fibras amasada V.1.4

Con fibras:

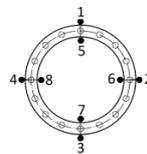
$T_{50} = 11,7$ s

$\varnothing_{\text{máx}} = 590-615$ mm

Ensayo Anillo J:



Imagen 104 Resultados anillo J con fibras amasada V.1.4



Debido al exceso de fibras se produjo una gran retención dentro del anillo por lo que no se tomaron datos, ya que se observó que la torta había disminuido más de lo debido.

Embudo en V: Nulo, debido al exceso de fibras el embudo se atascó.

5.2.5 Amasada V.1.5 para viga y probetas

a/c 0,6 Material	Dosificación (kg/m ³)	Densidad	Volumen	Dosificación correc. H ₂ O	Amasada de 60 litros		H libre
					Sin corregir	Corregida	
Cem	325	3	108,3	325	19,50	19,50	
Agua	195	1	195,0	122,73	11,70	7,61	
Finos	18,5	2,65	7,0	18,5	1,11	1,11	
A fina	517,0	2,65	195,1	558,82	31,02	33,54	0,0812
A grue	757,0	2,65	285,6	775,89	45,42	46,99	0,0347
Grava	553,9	2,65	209,0	553,88	33,23	33,23	0,000
Volumen	1001				141,98	141,98	
aditivo 1,3 %	4,225	1,05	4,02			0,2535	
fibras T60	6,2					0,3720	

Tabla 56. Amasada Dosificación V.1.5 corregida

Los ensayos realizados para la caracterización del hormigón en estado fresco que hicimos son:

Ensayo de escurrimiento:



Imagen 105 Resultados escurrimiento sin fibras amasada V.1.5



Imagen 106 Resultados escurrimiento con fibras amasada V.1.5

Sin fibras:

$T_{50} = 3,2$ s

$\varnothing_{\text{máx}} = 740-730$ mm

Con fibras:

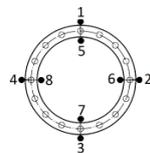
$T_{50} = 4,2$ s

$\varnothing_{\text{máx}} = 700-660$ mm

Ensayo Anillo J:



Imagen 107 Resultados anillo J con fibras amasada V.1.5



$\varnothing_{\text{máx}} = 430$ mm

Alturas (cm):

1 = 11 5 = 5,5

2 = 11,5 6 = 5

3 = 11,5 7 = 5,5

4 = 11,5 8 = 5,5

Embudo en V: 14s

5.2.6 Amasada V.1.6 para viga y probetas

a/c 0,6	Dosificación			Dosificación		Amasada de 64 litros		H libre
Material	(kg/m3)	Densidad	Volumen	correc. H ₂ O	Sin corregir	Corregida		
Cem	325	3	108,3	325	20,80	20,80		
Agua	195	1	195,0	136,81	12,48	8,98		
Finos	18,5	2,65	7,0	18,5	1,18	1,18		
A fina	517,0	2,65	195,1	558,82	33,08	35,27	0,0660	
A grue	757,0	2,65	285,6	775,89	48,45	49,65	0,0248	
Grava	553,9	2,65	209,0	553,88	35,45	35,53	0,0023	
Volumen	1001				151,44	151,41		
aditivo 1,3 %	4,225	1,05	4,02			0,2704		
Fibras T60	9					0,5760		

Tabla 57. Amasada Dosificación V.1.6 corregida

Los resultados de los ensayos de caracterización del hormigón fueron:

Ensayo de escurrimiento:



Imagen 108 Resultados escurrimiento sin fibras amasada V.1.6



Imagen 109 Resultados escurrimiento con fibras amasada V.1.6

Sin fibras:

$T_{50} = 2,5$ s
 $\varnothing_{m\acute{a}x} = 720-750$ mm

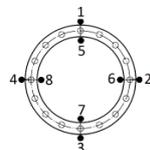
Con fibras:

$T_{50} = 3$ s
 $\varnothing_{m\acute{a}x} = 595-575$ mm

Ensayo Anillo J:



Imagen 110 Resultados anillo J con fibras amasada V.1.6



$\varnothing_{m\acute{a}x} = 400-430$ mm

Alturas (cm):

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

Embudo en V: bloqueo

5.2.7 Amasada V.1.7 para viga y probetas

a/c 0,6 Material	Dosificación			Dosificación		Amasada de 64 litros		
	(kg/m3)	Densidad	Volumen	correc. H ₂ O	Sin corregir	Corregida	H libre	
Cem	325	3	108,3	325	20,80	20,80		
Agua	195	1	195,0	136,18	12,48	8,97		
Finos	18,5	2,65	7,0	18,5	1,18	1,18		
A fina	517,0	2,65	195,1	558,82	33,08	35,38	0,0694	
A grue	757,0	2,65	285,6	775,89	48,45	49,66	0,0250	
Grava	553,9	2,65	209,0	553,88	35,45	35,45	0,000	
Volumen	1001				151,44	151,44		
aditivo 1,3 %	4,225	1,05	4,02			0,2704		
Fibras T60	9					0,5760		

Tabla 58. Amasada Dosificación V.1.7 corregida

Ensayo de escurrimiento:



Imagen 111 Resultados escurrimiento sin fibras amasada V.1.7



Imagen 112 Resultados escurrimiento con fibras amasada V.1.7

Sin fibras:

T₅₀ = 3 s
 $\varnothing_{\text{máx}}$ = 665-685 mm

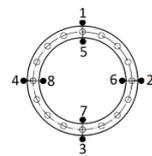
Con fibras:

T₅₀ = 4 s
 $\varnothing_{\text{máx}}$ = 510-520 mm

Ensayo Anillo J:



Imagen 113 Resultados anillo J con fibras amasada V.1.7



$\varnothing_{\text{máx}}$ = 400-480 mm

Alturas (cm):

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

Los resultados de estos ensayos se vieron condicionados por el exceso de calor a la hora del amasado y hormigonado. Existiendo una diferencia de unos 7°C con los días anteriores.

Embudo en V: nulo

Para terminar con la caracterización del hormigón se realizaron ensayos de aire ocluido en los distintos hormigones, obteniendo los siguientes resultados:

Cantidad de fibras kg/m ³	0 kg/m ³	6,2 kg/m ³	9 kg/m ³	12,4 kg/m ³
Primera toma de datos	1,9	2,6	2,2	2,4
Segunda toma de datos	-	2,4	2,6	2,5
Media	1,9	2,5	2,4	2,45

Tabla 59. Cantidad de aire ocluido

Observamos que al incorporar fibras al hormigón aumenta en contenido de aire en el mismo.

5.2.8 Análisis de la incorporación de fibras al hormigón autocompactante en estado fresco

El hormigón autocompactante que hemos confeccionado tiene unos resultados óptimos en los ensayos de caracterización del mismo, ya que fluye de forma rápida mostrando cohesión y sin señales de segregación ni de exudación. Sin embargo al incorporar fibras al hormigón observamos que disminuye su capacidad de llenado del encofrado sin compactación proporcionalmente al incremento de las fibras. Por lo tanto nos encontramos con serios problemas al incorporar una cantidad de 12,4 kg/m³ de fibras al amasar y hormigonar la viga, por lo que no se pudo estudiar el hormigón con mayor cantidad de fibras.

Con grandes cantidades de fibras observamos que los diámetros $\phi_{m\acute{a}x}$ son menores de los deseados, ya que con la incorporación de estas al hormigón reducimos su capacidad de fluir, no obstante puesto que los parámetros ideales que consideramos inicialmente eran para hormigón autocompactante la disminución de la torta no nos afecta en los resultados finales. Solo se ven afectados los ensayos en hormigón fresco al incorporar cantidades de fibras superiores a 9kg/m³ ya que el hormigón pierde la propiedad de autocompactabilidad, y con cantidades a superiores no es posible realizar el ensayo del anillo J ni el del embudo en V.



Imagen 114 Erizos en amasado con 12,4 kg/m³ de fibras



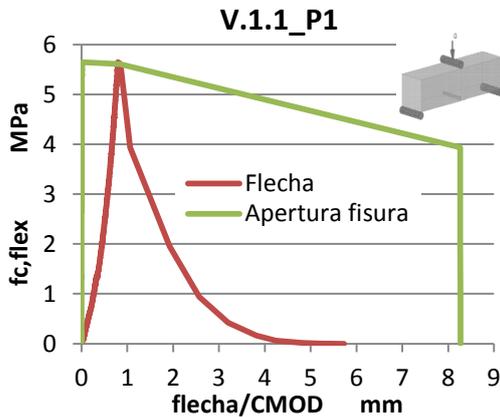
Imagen 115 Puesta en obra con 12,4 kg/m³ de fibras

5.3.1 Ensayos en probetas

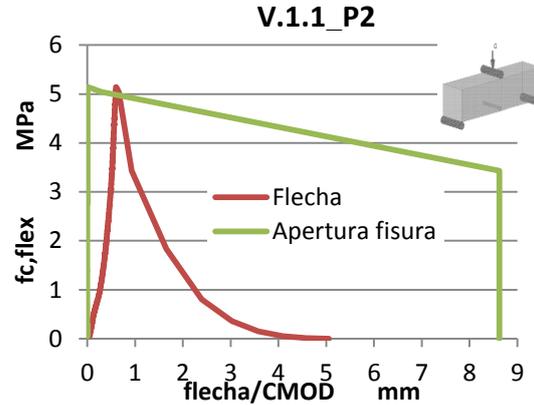
5.3.1.1 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.1

En las probetas de la amasada V.1.1 realizadas con un hormigón autocompactante con 0 kg/m^3 de fibras se procedió a la realización de un ensayo a flexión a tres puntos sobre cada una de ellas.

De la realización de este ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:



Gráfica 4. Tensión-flecha/CMOD V.1.1_P1

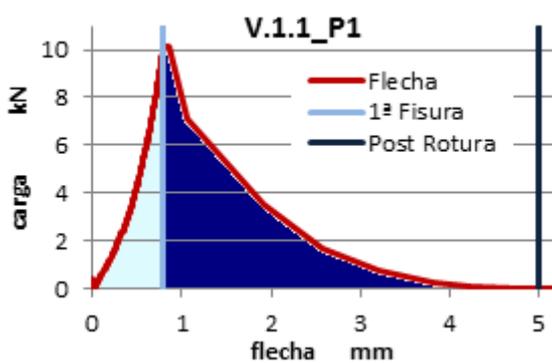


Gráfica 5. Tensión-flecha/CMOD V.1.1_P2

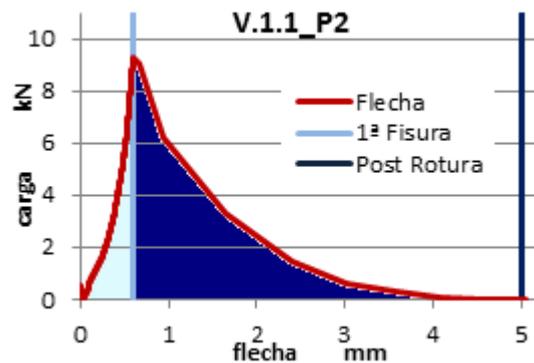
	Tensión (MPa)	Carga máxima (KN)	fc, matriz (MPa)	fc(MPa), CMOD 0,05	Fc(MPa), F1 CMOD 0,5	fc(MPa), F2 CMOD 1,5	fc(MPa), F3 CMOD 2,5	fc(MPa), F4 CMOD 3,5	fc(MPa) Flecha 0,6
V.1.1_P1 (Sin Fibras)	5,64	10,16	5,64	5,64	5,61	-	-	-	3,28
V.1.1_P2 (Sin Fibras)	5,14	9,25	5,14	5,14	5,04	-	-	-	5,11

Tabla 60 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.1.

Con las gráficas obtenidas del ensayo anterior se halló la energía absorbida en los distintos estados por los que pasa el hormigón hasta 5 mm y la tenacidad.



Gráfica 6. Tenacidad bajo curva carga-flecha V.1.1_P1

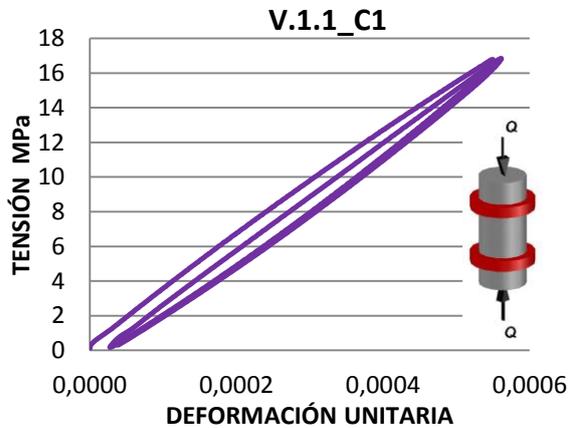


Gráfica 7. Tenacidad bajo curva carga-flecha V.1.1_P2

	Energía absorbida(N-mm)				Tenacidad (N-mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
	1ª Fisura	Ablandamiento	Endurecimiento	Post Rotura		
V.1.1_P1 (Sin Fibras)	5215,44	-	-	9941,18	17698,68	20693
V.1.1_P2 (Sin Fibras)	3662,83	-	-	8820,41	12483,24	31511,17

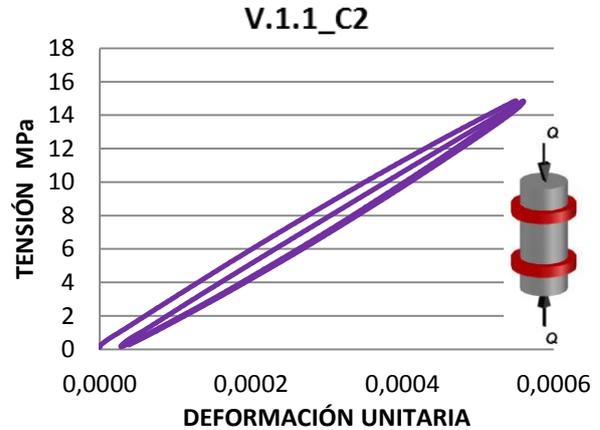
Tabla 61 Resultados gráfica tenacidad V.1.1 probetas prismáticas

Con las probetas cilíndricas obtenidas de la amasada V.1.1(0kg/m³) se realizó el ensayo de compresión para la obtención del módulo de deformación al 40% de la resistencia del hormigón obtenido mediante ensayo de compresión en las mitades sacadas de las probetas prismáticas tras el ensayo de flexión. Obteniendo los siguientes resultados:



Gráfica 8. Módulo deformación V.1.1_C1

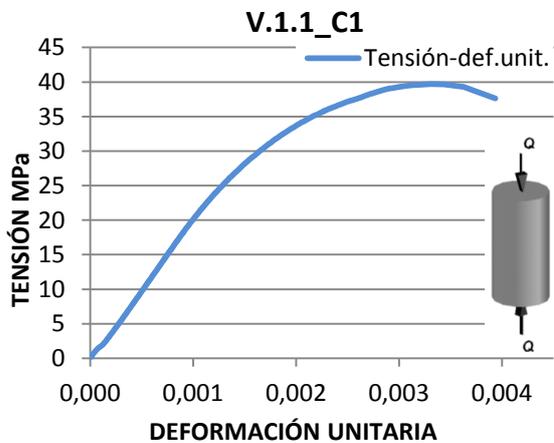
Módulo de deformación: 30053 MPa



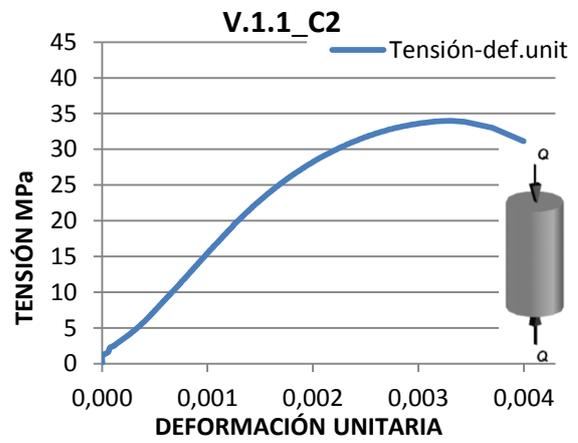
Gráfica 9. Módulo deformación V.1.1_C2

Módulo de deformación: 30049 MPa

Tras la realización del ensayo de deformación procedimos a la realización del ensayo a compresión en probetas cilíndricas para la obtención de la resistencia a este esfuerzo en las mismas y se obtuvieron los siguientes resultados:



Gráfica 10. Compresión V.1.1_C1

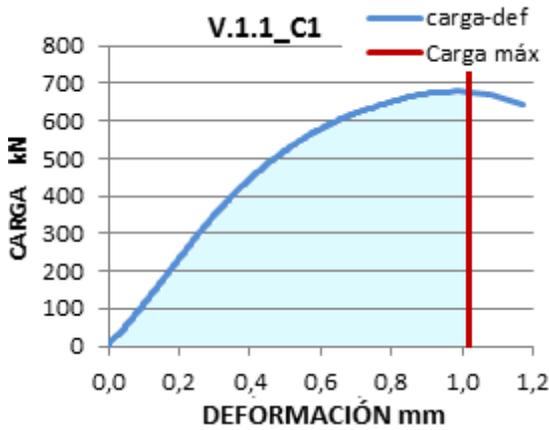


Gráfica 11. Compresión V.1.1_C2

	Tensión (MPa)	Carga máxima (kN)	Deformación en carga máxima (mm)
V.1.1_C1 (Sin Fibras)	38,38	678,2	0,98
V.1.1_C2 (Sin Fibras)	37,23	657,9	0,99

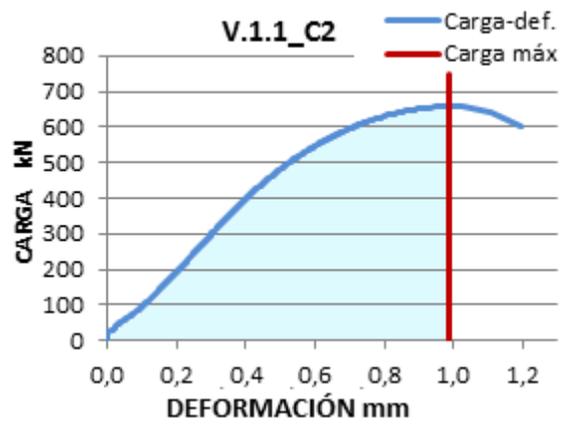
Tabla 62 Resultados gráfica compresión V.1.1 probetas cilíndricas

Con las gráficas obtenidas del ensayo de compresión se calculó la tenacidad bajo esta curva.



Gráfica 12. Tenacidad V.1.1_C1

Tenacidad: 507262,19 N·mm



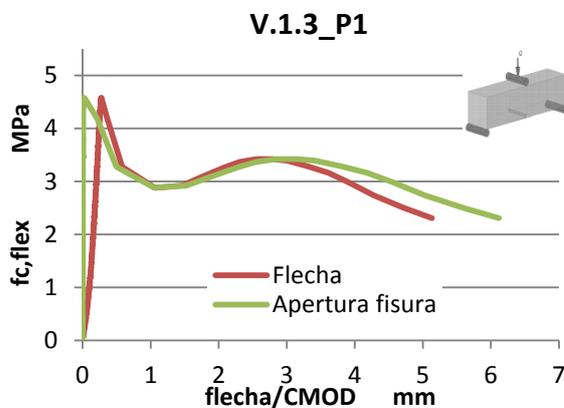
Gráfica 13. Tenacidad V.1.1_C2

Tenacidad: 443611,70 N·mm

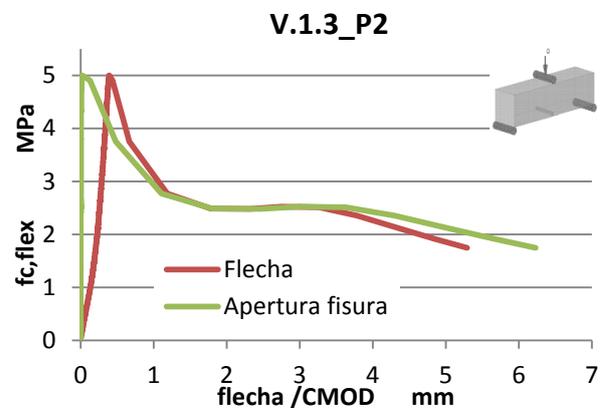
5.3.1.2 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.3

En las probetas de la amasada V.1.3 realizadas con un hormigón autocompactante reforzado con 6,2 kg/m³ de fibras se procedió a la realización de un ensayo a flexión a tres puntos sobre cada una de ellas.

De la realización de este ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:



Gráfica 14. Tensión-flecha/CMOD V.1.3_P1

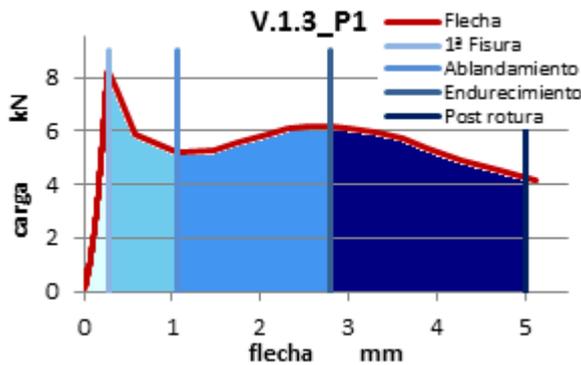


Gráfica 15. Tensión-flecha/CMOD V.1.3_P2

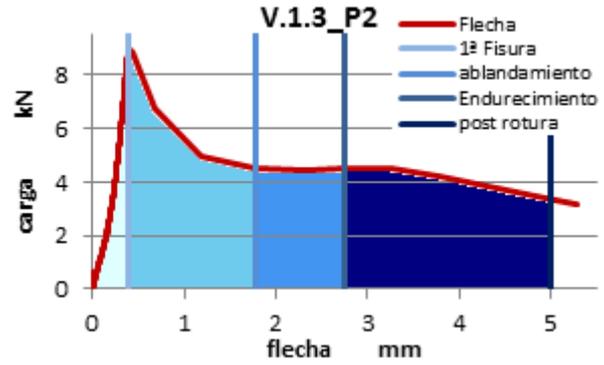
	Tensión (MPa)	Carga máxima (KN)	fc, matriz (MPa)	fc(MPa), CMOD 0,05	Fc(MPa), F1 CMOD 0,5	fc(MPa), F2 CMOD 1,5	fc(MPa), F3 CMOD 2,5	fc(MPa), F4 CMOD 3,5	fc(MPa) Flecha 0,6
V.1.3_P1 (6,2kg/m ³)	4,58	8,24	4,14	4,57	3,28	2,92	3,37	3,39	3,28
V.1.3_P2 (6,2kg/m ³)	4,99	8,99	4,29	4,99	3,75	2,49	2,48	2,51	3,75

Tabla 63 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.3.

Con las gráficas obtenidas del ensayo anterior se halló la energía absorbida en los distintos estados por los que pasa el hormigón hasta 5 mm y la tenacidad.



Gráfica 16. Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.3_P1

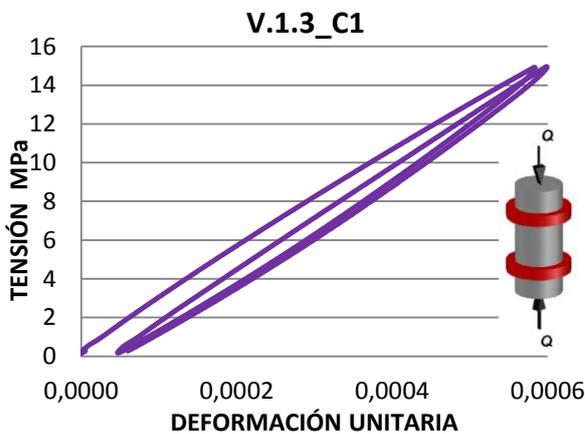


Gráfica 17. Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.3_P2

	Energía absorbida (N·mm)				Tenacidad (N·mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
	1ª Fisura	Ablandamiento	Endurecimiento	Post Rotura		
V.1.3_P1 (6,2kg/m ³)	3114,22	6963,19	9082,297	13270,58	32430,18	42323
V.1.3_P2 (6,2kg/m ³)	4093,82	10046,2	4262,88	9388,28	27790,65	34109

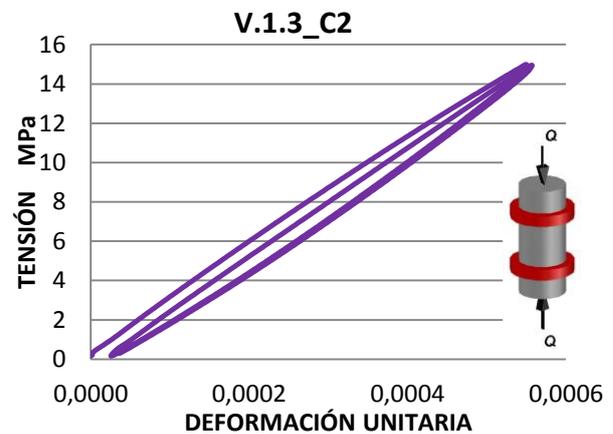
Tabla 64 Resultados gráfica tenacidad V.1.3 probetas prismáticas

Con las probetas cilíndricas obtenidas de la amasada V.1.3 (6,2kg/m³) se realizó el ensayo de compresión para la obtención del módulo de deformación. Obteniendo los siguientes resultados:



Gráfica 18. Módulo de deformación V.1.3_C1

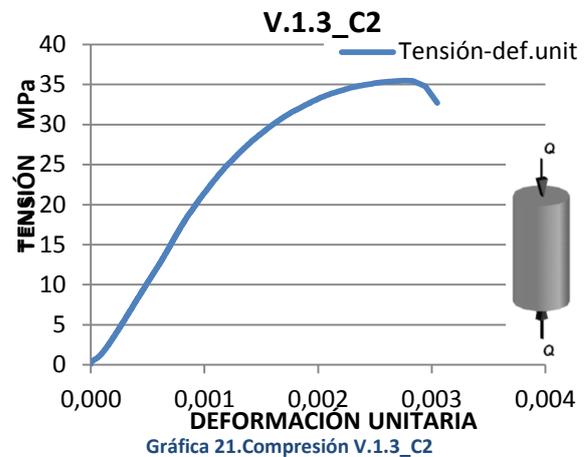
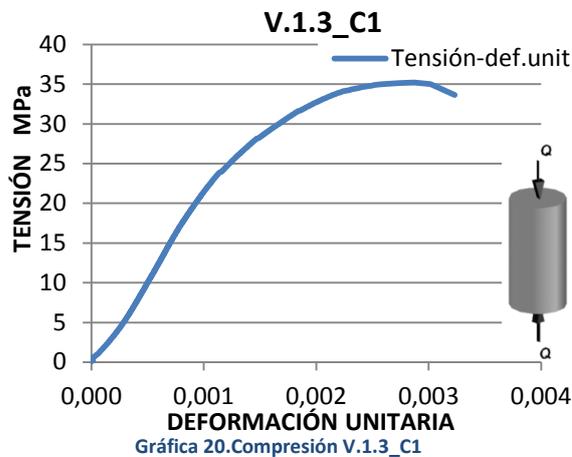
Módulo de deformación: 27247 MPa



Gráfica 19. Módulo de deformación V.1.3_C2

Módulo de deformación: 27914 MPa

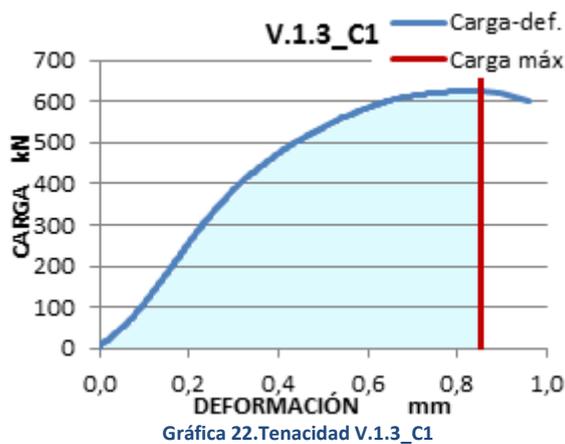
Tras la realización del ensayo de deformación se hizo el ensayo a compresión en probetas cilíndricas y obteniendo los siguientes resultados:



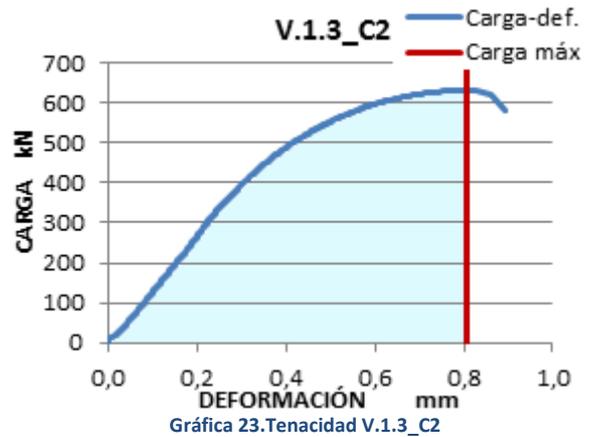
	Tensión (MPa)	Carga máxima (kN)	Deformación en carga máxima (mm)
V.1.3_C1 (6,2kg/m ³)	35,43	626,1	0,85
V.1.3_C2 (6,2kg/m ³)	35,49	631,4	0,81

Tabla 65 Resultados gráfica de compresión V.1.3 probetas cilíndricas

Con las gráficas obtenidas del ensayo de compresión se calculó la tenacidad bajo esta curva.



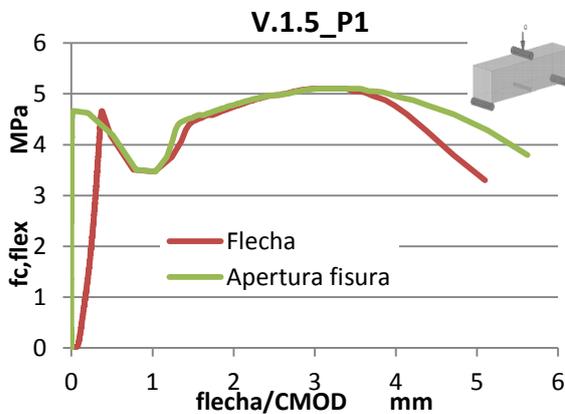
Tenacidad: 387781,47 N·mm



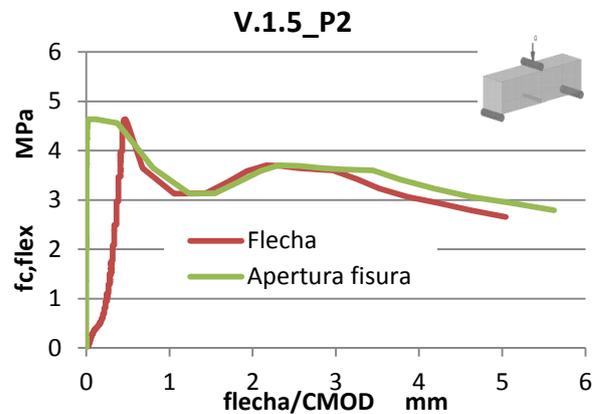
Tenacidad: 355775,78 N·mm

5.3.1.3 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.5

De la amasada V.1.5 realizada con un hormigón autocompactante reforzado con 6,2 kg/m³ de fibras se obtuvieron dos probetas prismáticas que se sometieron al ensayo de flexión a tres puntos, obteniendo:



Gráfica 24. Tensión-flecha/CMOD V.1.5_P1

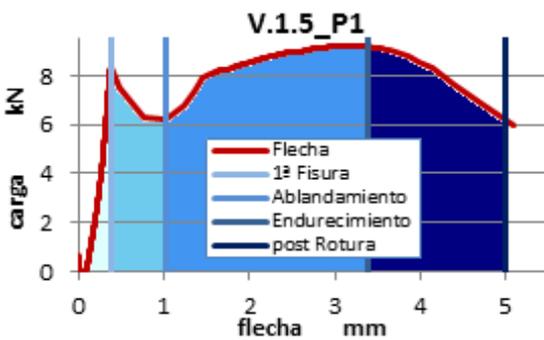


Gráfica 25. Tensión-flecha/CMOD V.1.5_P2

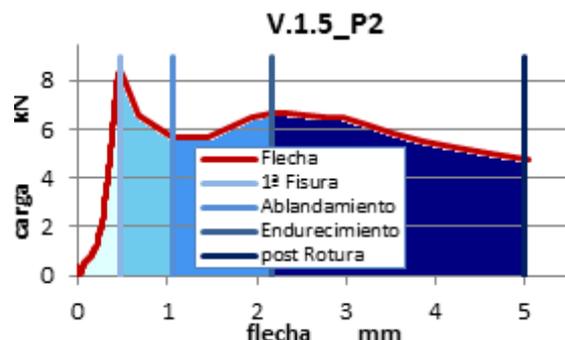
	Tensión (MPa)	Carga máxima (KN)	fc, matriz (MPa)	Fc (MPa), CMOD 0,05	Fc(MPa), F1 CMOD 0,5	fc(MPa), F2 CMOD 1,5	fc(MPa), F3 CMOD 2,5	fc(MPa), F4 CMOD 3,5	fc(MPa) Flecha 0,6
V.1.5_P1 (6,2kg/m ³)	5,11	9,19	5,11	3,51	4,56	4,97	5,11	3,51	3,51
V.1.5_P2 (6,2kg/m ³)	4,64	8,35	4,16	4,64	3,64	3,36	3,64	3,42	3,64

Tabla 66 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.5.

Con las gráficas obtenidas del ensayo anterior se halló la energía absorbida en los distintos estados por los que pasa el hormigón hasta 5 mm y la tenacidad.



Gráfica 26. Tenacidad bajo curva carga-flecha V.1.5_P1

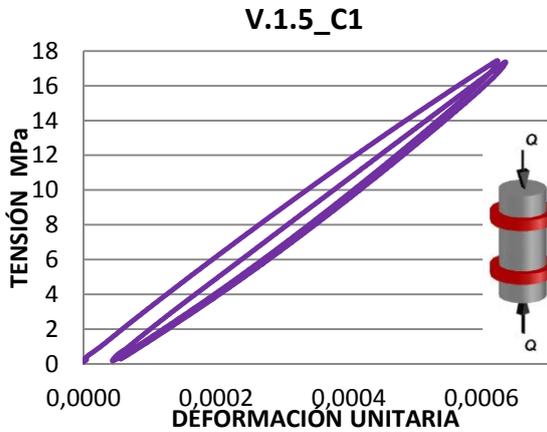


Gráfica 27. Tenacidad bajo curva carga-flecha V.1.5_P2

	Energía absorbida(N-mm)				Tenacidad (N-mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
	1ª Fisura	Ablandamiento	Endurecimiento	Post Rotura		
V.1.5_P1 (6,2kg/m ³)	3417,94	5741,57	18762,55	16658,77	44580,83	36559,89
V.1.5_P2 (6,2kg/m ³)	4960,96	5774,74	5691,41	5691,41	17682,32	31135,94

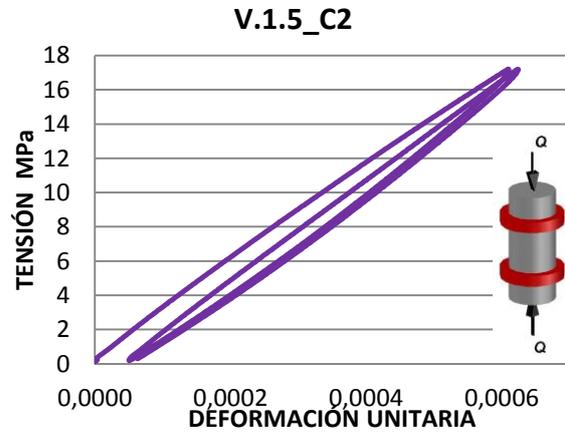
Tabla 67. Resultados gráfica tenacidad V.1.5 probetas prismáticas

Con las probetas cilíndricas obtenidas de la amasada V.1.5 ($6,2\text{kg/m}^3$) se realizó el ensayo de compresión para la obtención del módulo de deformación al 40% de la resistencia del hormigón obtenido mediante ensayo de compresión en las mitades sacadas de las probetas prismáticas tras el ensayo de flexión, obteniendo:



Gráfica 28. Módulo de deformación V.1.5_C1

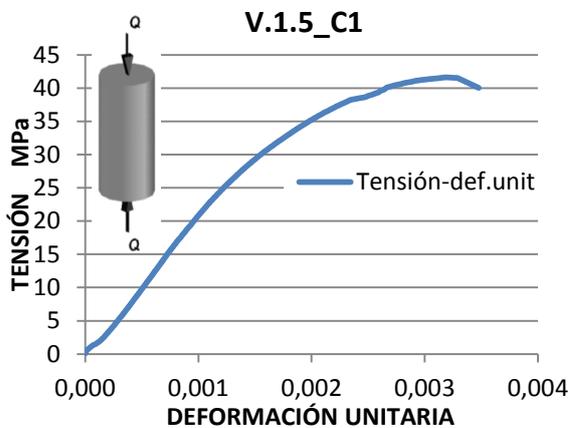
Módulo de deformación: 28788 MPa



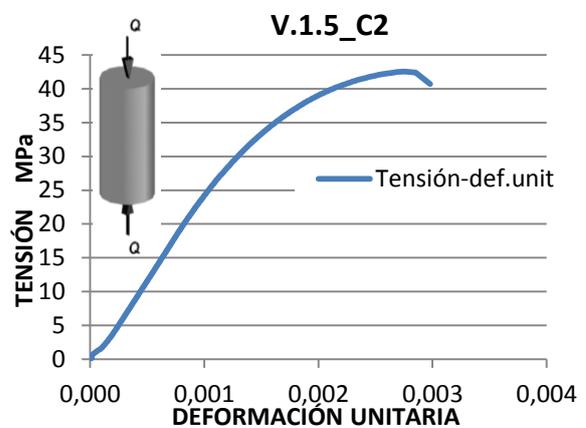
Gráfica 29. Módulo de deformación V.1.5_C2

Módulo de deformación: 30150 MPa

Tras la realización del ensayo de deformación procedimos a la realización del ensayo a compresión en probetas cilíndricas para la obtención de la resistencia a este esfuerzo en las mismas y se obtuvieron los siguientes resultados:



Gráfica 30. Compresión V.1.5_C1

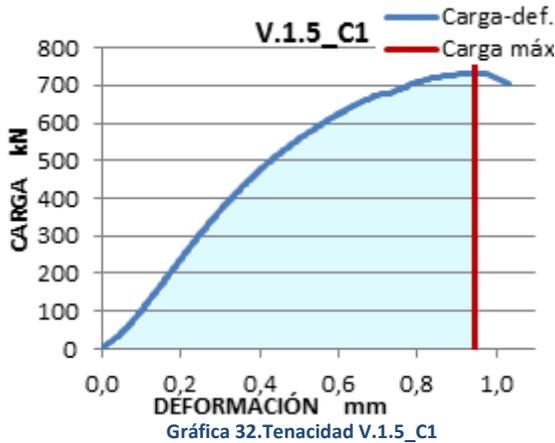


Gráfica 31. Compresión V.1.5_C2

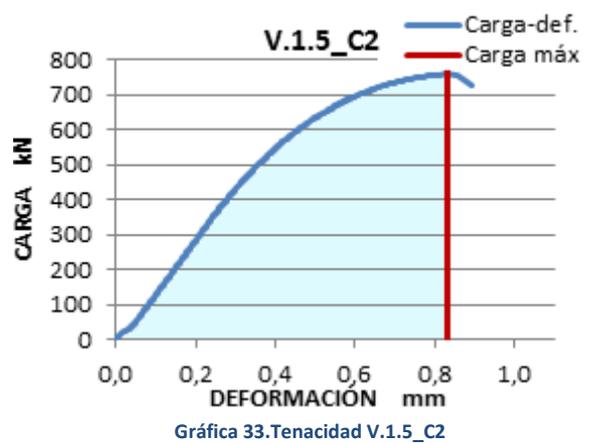
	Tensión (MPa)	Carga máxima (kN)	Deformación en carga máxima (mm)
V.1.5_C1 ($6,2\text{kg/m}^3$)	41,46	732,7	0,94
V.1.5_C2 ($6,2\text{kg/m}^3$)	42,92	758,5	0,82

Tabla 68 Resultados gráfica compresión V.1.5 probetas cilíndricas

Con las curvas obtenidas del ensayo anterior se calculó la tenacidad bajo esta curva.



Tenacidad: 466759,9 N·mm

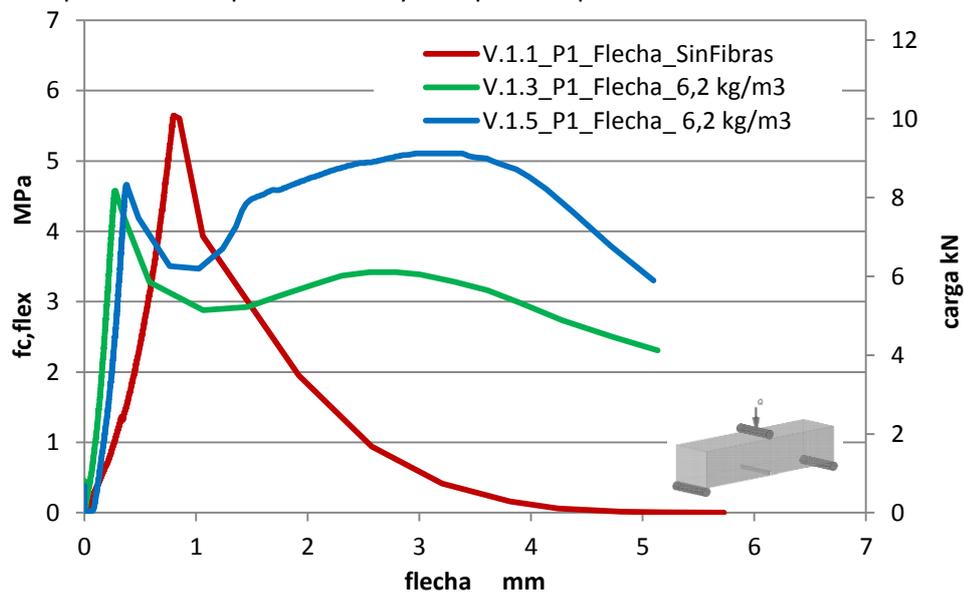


Tenacidad: 426706 N·mm

5.3.1.4 Análisis de resultados de HAC reforzado con 6,2 kg/m³ de fibras poliméricas en probetas

Este análisis lo realizamos comparando las probetas más óptimas obtenidas de las amasadas V.1.3 (6,2kg/m³) y V.1.5 (6,2kg/m³) con la V.1.1 (0kg/m³), considerada como patrón.

En primer lugar comparamos las distintas gráficas de tensión-deformación, obteniendo dos gráficas comparativas una para la flecha y otra para la apertura de fisura:



Gráfica 34. Comparativa V.1.1_V.1.3_V.1.5 Tensión-flecha.

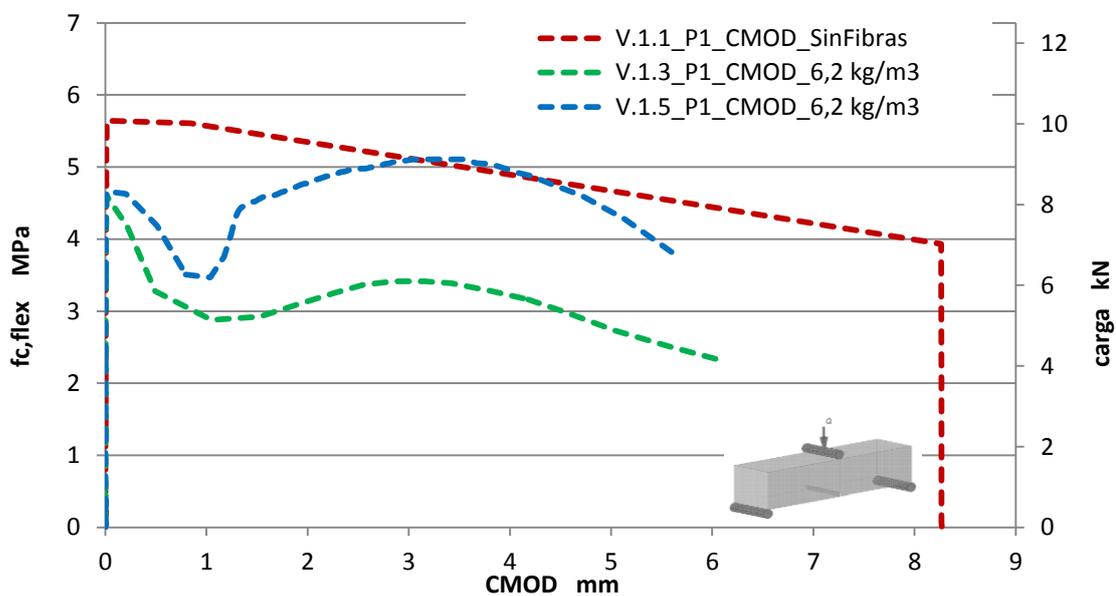
	V.1.1_P1 (Sin Fibras)	V.1.3_P1 (6,2kg/m ³)	V.1.5_P1 (6,2kg/m ³)
Carga máxima (kN)	10,16	8,24	9,19
Tensión (MPa)	5,64	4,58	5,11
fc(MPa) Flecha 0,6	3,28	3,28	3,51
Módulo de elasticidad (MPa)	20693	42323	36559,89

Tabla 69 Resultados gráfica tensión-flecha V.1.1_V.1.3_V.1.5

Podemos observar que la probeta sin fibras alcanza valores mayores que las probetas que contienen $6,2 \text{ kg/m}^3$ de fibras en cuanto a la carga máxima en el punto de primera fisura. En contra partida observamos que la probeta sin fibras no soporta cargas después de la primera fisura, sin embargo las probetas de $6,2 \text{ kg/m}^3$ tras un pequeño descenso en la curva observamos que recuperan resistencia superando su propia carga de primera fisura, controlando así la fisuración de la probeta.

Hemos establecido una flecha de $0,6 \text{ mm}$ ya que según la EHE-08 la flecha admisible para elementos estructurales es de $LUZ/500$ siendo nuestra luz de 300mm . Así pues, en la tabla de resultados observamos que la variación de carga no es significativa con la incorporación de fibras para dicha flecha.

Del mismo ensayo a flexión a tres puntos obtenemos la apertura de fisura en distintos punto:



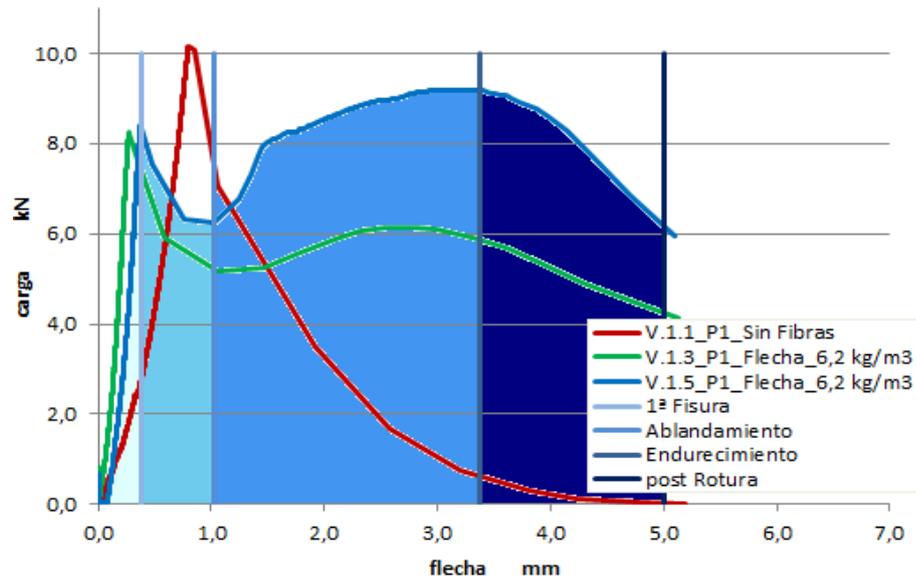
Gráfica. 35. Comparativa V.1.1_V.1.3_V.1.5 Tensión-CMOD.

	fc(MPa), CMOD 0,05	Fc(MPa), F1 CMOD 0,5	fc(MPa), F2 CMOD 1,5	fc(MPa), F3 CMOD 2,5	fc(MPa), F4 CMOD 3,5
V.1.1_P1 (Sin Fibras)	5,64	5,61	-	-	-
V.1.3_P1 (6,2kg/m ³)	4,57	3,28	2,92	3,37	3,39
V.1.5_P1 (6,2kg/m ³)	4,63	3,51	4,56	4,97	5,11

Tabla 70 Resultados gráfica tensión-CMOD V.1.1_V.1.3_V.1.5

Los datos obtenidos por el captador al tener una rotura frágil y brusca inducen a errores de medición, ya que en el momento en que fisura la matriz la apertura de fisura es súbita y catastrófica.

Con la gráfica comparativa de carga-flecha calculamos energía absorbida bajo dicha curva.



Gráfica. 36. Comparativa V.1.1_V.1.3_V.1.5 Tenacidad flexión

	Energía absorbida(N-mm)				Tenacidad (N-mm)
	1ª Fisura	Ablandamiento	Endurecimiento	Post Rotura	
V.1.1_P1 (Sin Fibras)	5215,44	-	-	9941,18	17698,68
V.1.3_P1 (6,2kg/m ³)	3114,22	6963,19	9082,297	13270,58	32430,18
V.1.5_P1 (6,2kg/m ³)	3417,94	5741,57	18762,55	16658,77	44580,83

Tabla 71 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.3_V.1.5 probetas prismáticas

En las probetas de 6,2 kg/m³ el área existente bajo curva hasta primera fisura es menor, lo cual nos indica que hasta este momento el material con fibras ha absorbido menos energía que el material sin fibras, sin embargo en el resto de fases marcadas en la gráfica el hormigón sin fibras no es capaz de absorber tanta energía como el hormigón con 6,2 kg/m³. Así pues, observamos que la tenacidad es mayor en el hormigón con contenido de fibras, puesto que las fibras cosen la matriz provocando que la rotura se produzca más tarde, permitiendo que sigan aumentando las deformaciones y la energía absorbida.

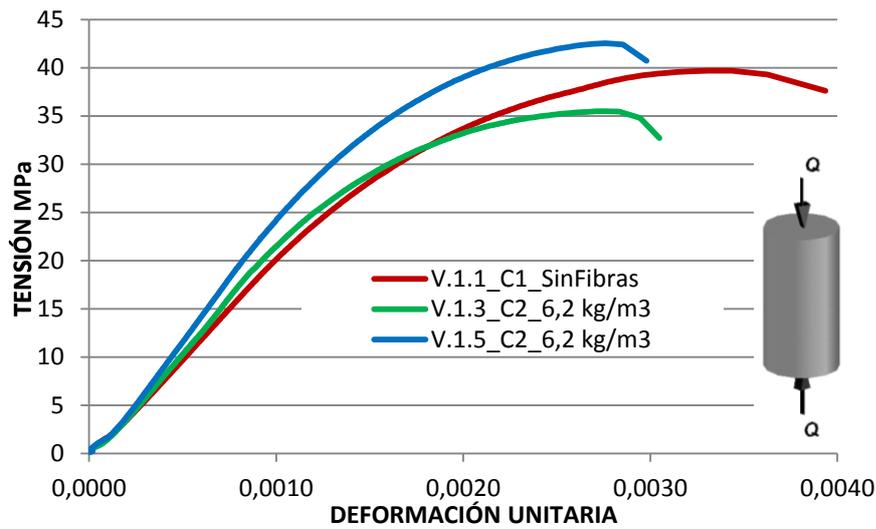
Seguidamente hacemos una comparativa de los módulos de deformación, obtenidos mediante un ensayo de compresión al 40% de la resistencia del hormigón.

	V.1.1_C1 (Sin Fibras)	V.1.3_C2 (6,2kg/m ³)	V.1.5_C2 (6,2kg/m ³)
Módulo de deformación (MPa)	30053	27914	30150

Tabla 72 Resultados Módulo deformación V.1.1_V.1.3_V.1.5

Observamos una ligera variación en el módulo de deformación, la cual no consideramos significativa. Más adelante compararemos con cantidades mayores de fibras con el fin de comprobar si varía en módulo de forma significativa con el aumento de las mismas.

A continuación comparamos la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas.



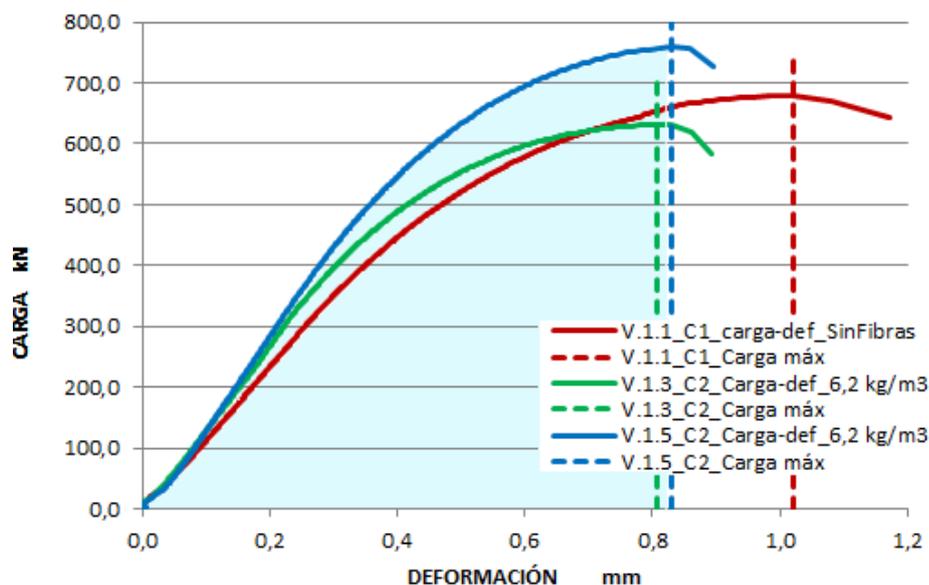
Gráfica. 37. Comparativa V.1.1_V.1.3_V.1.5 Compresión

	Tensión (MPa)	Carga máxima (KN)	Deformación en carga máxima (mm)
V.1.1_C1 (Sin Fibras)	39,69	678,2	0,99
V.1.3_C2 (6,2kg/m ³)	35,49	631,4	0,81
V.1.5_C2 (6,2kg/m ³)	42,92	758,5	0,82

Tabla 73 Resultados gráfica compresión V.1.1_V.1.3_V.1.5

Observamos ligeras variaciones en la resistencia a compresión de las probetas, tanto aumento como descenso, tal y como describe la ACI, suponemos que dichas variaciones son debidas a la dirección y distribución aleatoria de las fibras y a su vez por tratarse de fibras poliméricas que tienen menor resistencia, debilitando así la resistencia a compresión de la matriz. Siendo más notoria la menor deformación de las probetas que contienen 6,2 kg/m³ de fibras.

Seguidamente obtenemos la tenacidad bajo la gráfica comparativa anterior.



Gráfica. 38. Comparativa V.1.1_V.1.3_V.1.5 Tenacidad probetas compresión

	V.1.1_C1 (Sin Fibras)	V.1.3_C2 (6,2kg/m ³)	V.1.5_C2 (6,2kg/m ³)
Tenacidad (N-mm)	507262,19	355775,78	426706

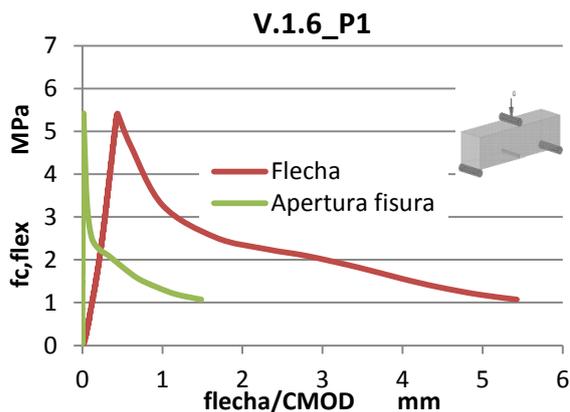
Tabla 74 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.3_V.1.5 probetas cilíndricas

Comprobamos que a compresión la tenacidad es mayor en el material sin fibras, por lo tanto, absorbe más energía que en el material con 6,2 kg/m³ de fibras, contrariamente a lo sucedido en la obtención de la tenacidad en probetas sometidas a flexión, ya que al introducir fibras poliméricas al hormigón observamos que reduce su resistencia a compresión.

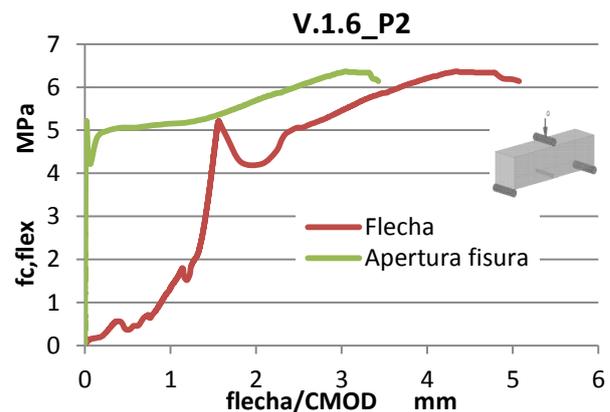
5.3.1.5 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.6

A las probetas obtenidas de la amasada V.1.6 realizadas con un hormigón autocompactante reforzado con 9 kg/m³ de fibras se procedió a realizar un ensayo a flexión a tres puntos sobre cada una de ellas.

De la realización de este ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:



Gráfica. 39. Tensión-flecha/CMOD V.1.6_P1

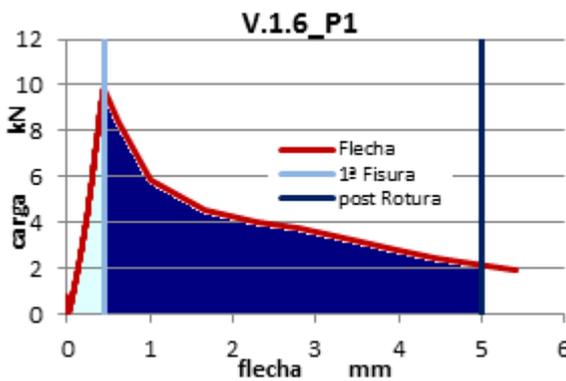


Gráfica. 40. Tensión-flecha/CMOD V.1.6_P2

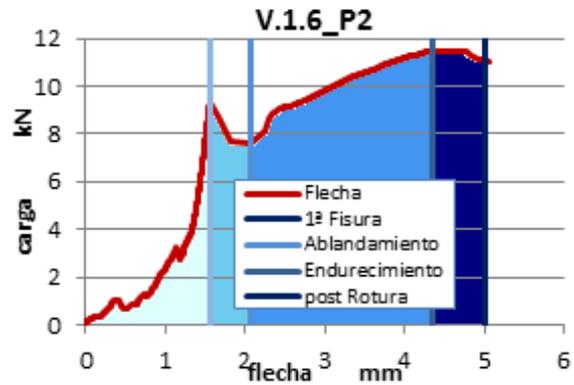
	Tensión (MPa)	Carga de rotura (KN)	fc, matriz (MPa)	fc(MPa), CMOD 0,05	Fc(MPa), F1 CMOD 0,5	fc(MPa), F2 CMOD 1,5	fc(MPa), F3 CMOD 2,5	fc(MPa), F4 CMOD 3,5	fc(MPa) Flecha 0,6
V.1.6_P1 (9kg/m ³)	5,417	9,75	4,67	2,53	1,82	1,07	0,74	0,54	4,64
V.1.6_P2 (9kg/m ³)	4,64	8,35	4,51	3,27	1,82	1,07	0,74	0,54	0,46

Tabla 75 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.6.

Con las gráficas obtenidas del ensayo anterior se halló la energía absorbida en los distintos estados por los que pasa el hormigón hasta 5 mm y la tenacidad.



Gráfica 41. Tenacidad bajo curva carga-flecha V.1.6_P1

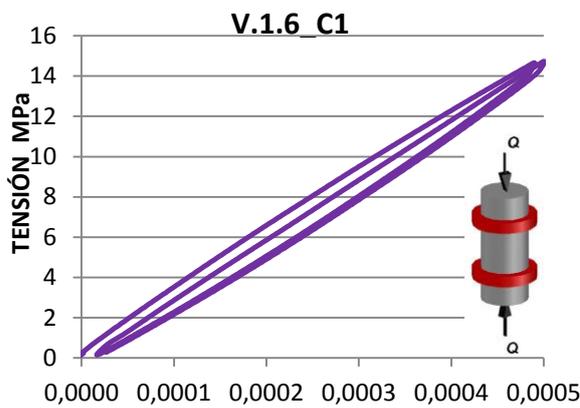


Gráfica 42. Tenacidad bajo curva carga-flecha V.1.6_P2

	Energía absorbida(N-mm)				Tenacidad (N-mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
	1ª Fisura	Ablandamiento	Endurecimiento	Post Rotura		
V.1.6_P1 (9kg/m ³)	4508,96	-	-	20625,47	25134,43	27483,67
V.1.6_P2 (9kg/m ³)	5898,66	5290,56	21804,32	8715,25	41708,79	24490,86

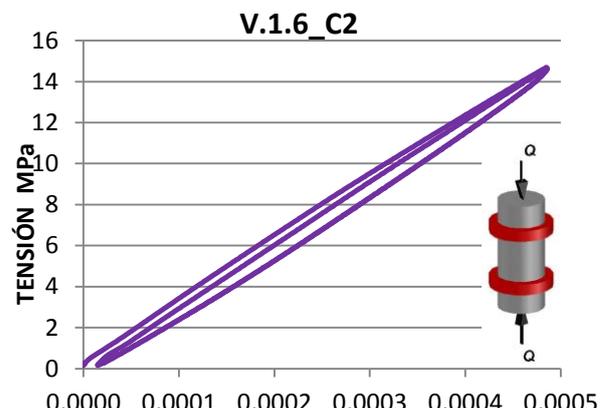
Tabla 76. Resultados gráfica tenacidad V.1.6 probetas prismáticas

Con las probetas cilíndricas obtenidas de la amasada V.1.6 (9 kg/m³) se realizó el ensayo de compresión para la obtención del módulo de deformación. Obteniendo los siguientes resultados:



Gráfica 43. Módulo de deformación V.1.6_C1

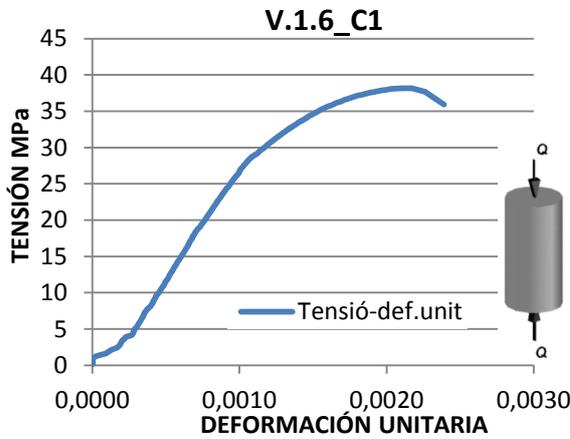
Módulo de deformación: 29817 MPa



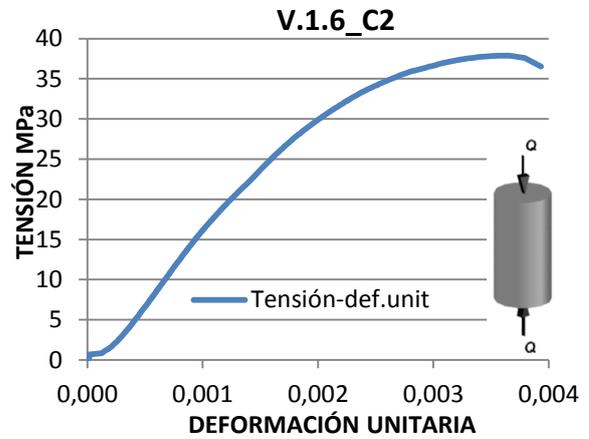
Gráfica 44. Módulo de deformación V.1.6_C2

Módulo de deformación: 30645 MPa

Tras la realización del ensayo de deformación se hizo el ensayo a compresión en probetas cilíndricas y obteniendo los siguientes resultados:



Gráfica 45. Compresión V.1.6_C1

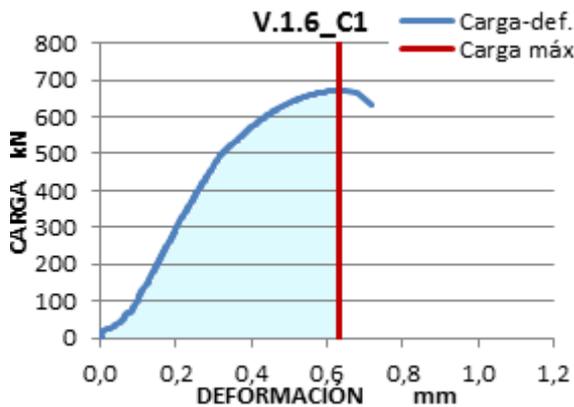


Gráfica 46. Compresión V.1.6_C2

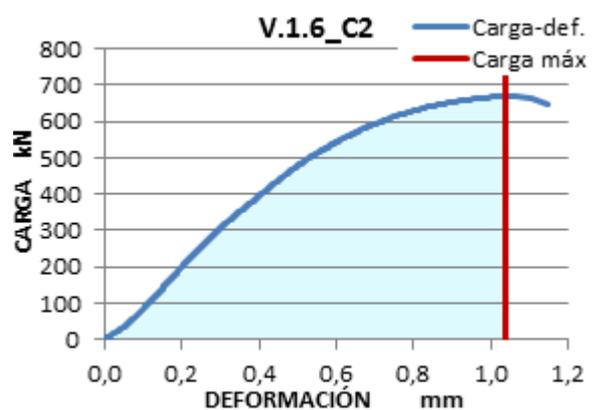
	Tensión (MPa)	Carga de rotura (KN)	Deformación en carga máxima (mm)
V.1.6_C1 (9kg/m ³)	38,04	672,2	0,63
V.1.6_C2 (9kg/m ³)	37,87	669,2	0,1

Tabla 77 Resultados gráfica compresión V.1.6 probetas cilíndricas

Con las curvas obtenidas del ensayo anterior se calculo la tenacidad bajo esta curva.



Gráfica 47. Tenacidad V.1.6_C1



Gráfica 48. Tenacidad V.1.6_C2

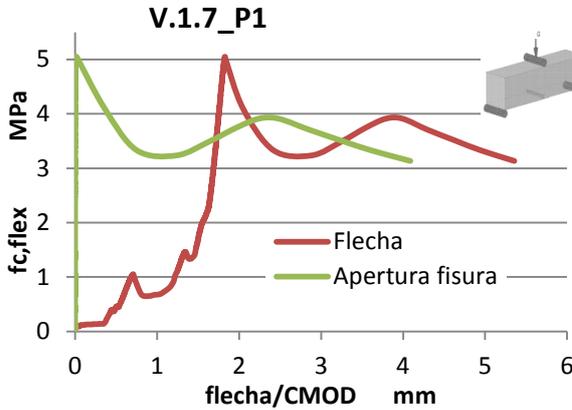
Tenacidad: 276714,5 N·mm

Tenacidad: 468467,8 N·mm

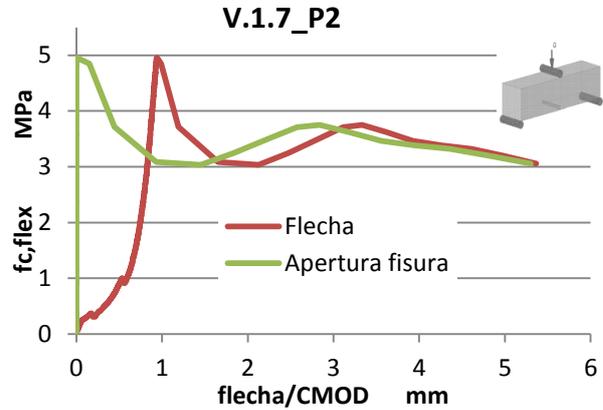
5.3.1.6 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.7

En las probetas de la amasada V.1.7 realizadas con un hormigón autocompactante con 9kg/m³ de fibras se procedió a la realización de un ensayo a flexión a tres puntos sobre cada una de ellas.

De la realización de este ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:



Gráfica 49. Tensión-flecha/CMOD V.1.7_P1

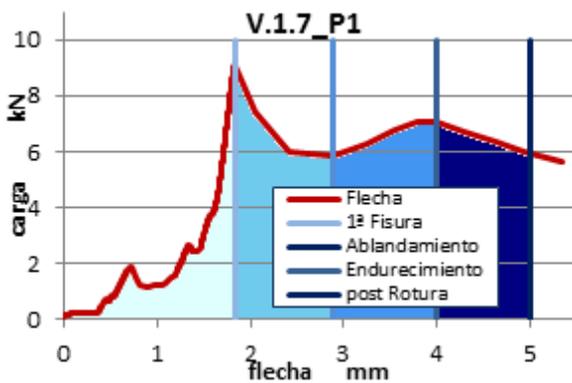


Gráfica 50. Tensión-flecha/CMOD V.1.7_P2

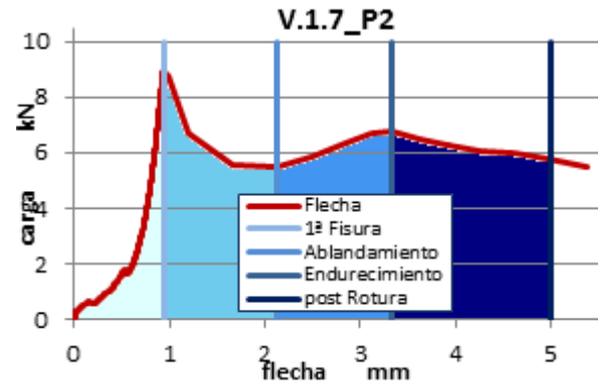
	Tensión (MPa)	Carga de rotura (KN)	fc, matriz (MPa)	fc(MPa), CMOD 0,05	Fc(MPa), F1 CMOD 0,5	fc(MPa), F2 CMOD 1,5	fc(MPa), F3 CMOD 2,5	fc(MPa), F4 CMOD 3,5	fc(MPa), Flecha 0,6
V.1.7_P1 (9kg/m ³)	5,05	9,09	3,37	5,02	4,11	3,49	3,91	3,33	0,7
V.1.7_P2 (9kg/m ³)	4,95	8,92	4,78	4,96	3,72	3,03	3,71	3,47	1,04

Tabla 78 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.7.

Con las gráficas obtenidas del ensayo anterior se halló la energía absorbida en los distintos estados por los que pasa el hormigón hasta 5 mm y la tenacidad.



Gráfica 51. Tenacidad bajo curva carga-flecha V.1.7_P1

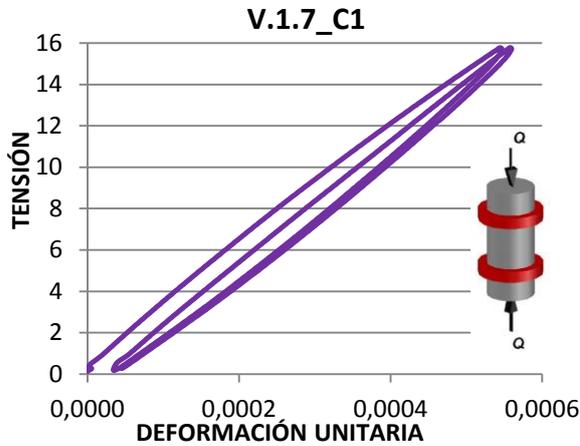


Gráfica 52. Tenacidad bajo curva carga-flecha V.1.7_P2

	Tenacidad (N·mm)				Tenacidad (N·mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
	1ª Fisura	Ablandamiento	Endurecimiento	Post Rotura		
V.1.7_P1 (9kg/m ³)	5421,75	9223,19	7072,04	8939,04	30656,04	25627
V.1.7_P2 (9kg/m ³)	4685,97	8986,98	7330,91	12828,31	41708,79	28944,12

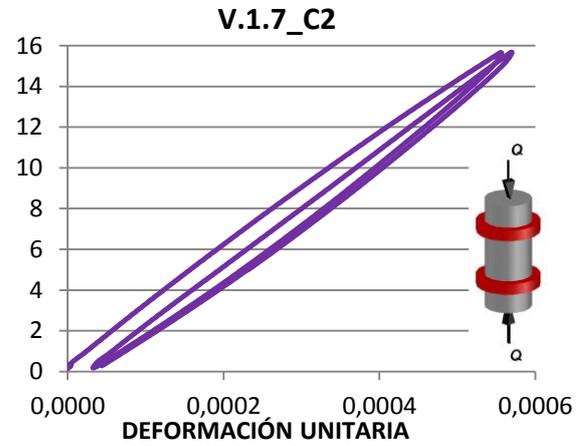
Tabla 79. Resultados gráfica tenacidad V.1.7 probetas prismáticas

Con las probetas cilíndricas obtenidas de la amasada V.1.7 (9kg/m^3) se realizó el ensayo de compresión para la obtención del módulo de deformación al 40% de la resistencia del hormigón obtenido mediante ensayo de compresión en las mitades sacadas de las probetas prismáticas tras el ensayo de flexión, obteniendo:



Gráfica 53. Módulo de deformación V.1.7_C1

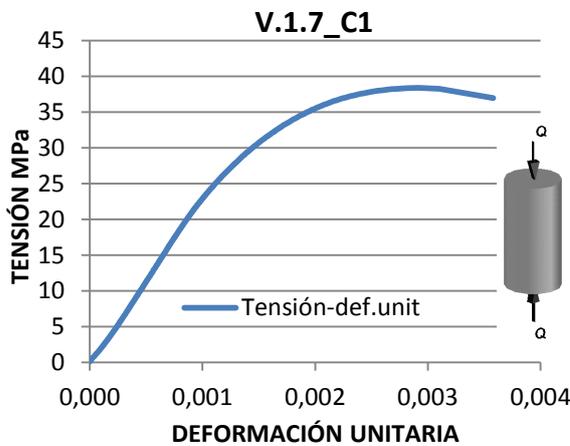
Módulo de deformación: 29606 MPa



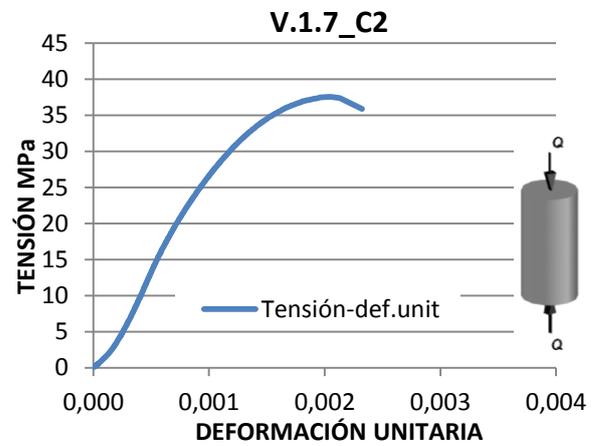
Gráfica 54. Módulo de deformación V.1.7_C2

Módulo de deformación: 28972 MPa

Tras la realización del ensayo de deformación procedimos a la realización del ensayo a compresión en probetas cilíndricas para la obtención de la resistencia a este esfuerzo en las mismas y se obtuvieron los siguientes resultados:



Gráfica 55. Compresión V.1.7_C1

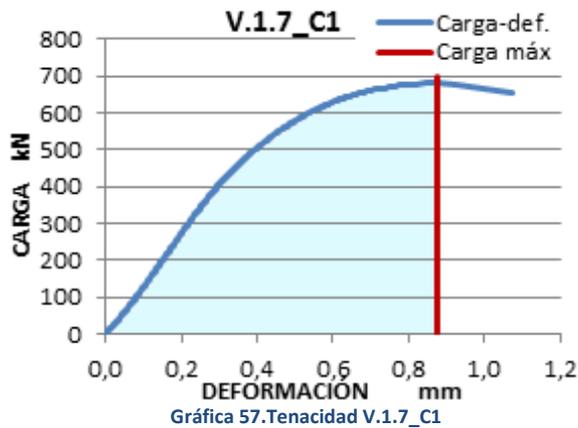


Gráfica 56. Compresión V.1.7_C2

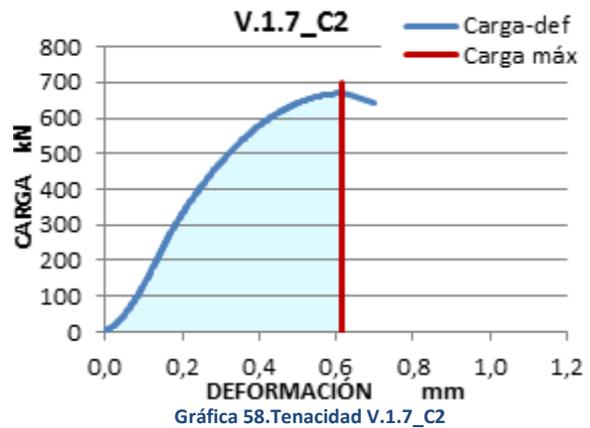
	Tensión (MPa)	Carga de rotura (KN)	Deformación en carga máxima (mm)
V.1.7_C1 (9kg/m^3)	38,37	679,1	0,87
V.1.7_C2 (9kg/m^3)	37,85	668,9	0,61

Tabla 80 Resultados gráfica compresión V.1.7 probetas cilíndricas

Con las curvas obtenidas del ensayo anterior se calculo la tenacidad bajo esta curva.



Tenacidad: 30656,04 N·mm

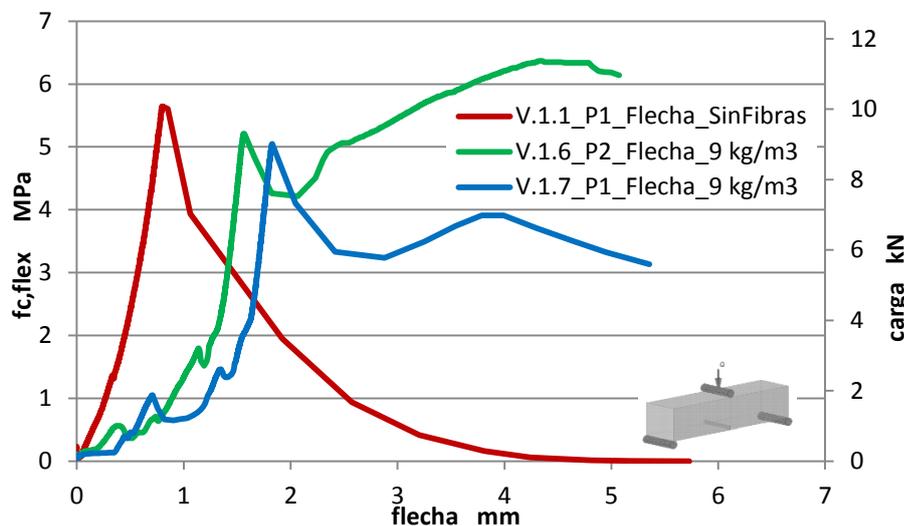


Tenacidad: 33832,16 N·mm

5.3.1.7 Análisis de resultados de HAC reforzado con 9 kg/m³ de fibras poliméricas en probetas

Realizamos una comparativa de las probetas más óptimas obtenidas de las amasadas V.1.6 (9kg/m³) y V.1.7 (9kg/m³) con la V.1.1 (0kg/m³), considerada como patrón.

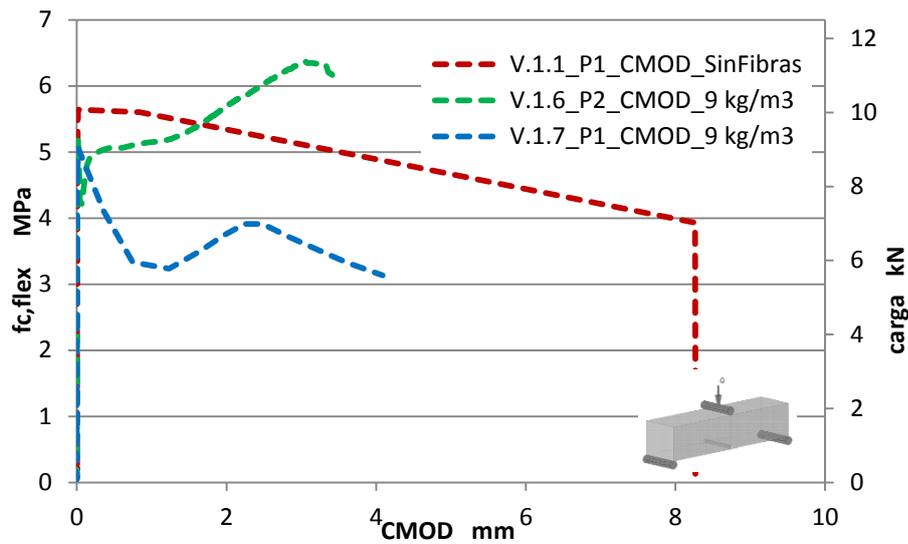
En primer lugar comparamos las distintas gráficas de tensión-deformación, obteniendo dos gráficas una para la flecha y otra para la apertura de fisura:



	V.1.1_P1 (Sin Fibras)	V.1.6_P2 (9kg/m ³)	V.1.7_P1 (9kg/m ³)
Carga máxima (kN)	10,16	8,35	9,09
Tensión (MPa)	5,64	4,64	5,05
fc(MPa) Flecha 0,6	3,28	0,46	0,7
Módulo de elasticidad (MPa)	20693	24490,86	25627

Tabla 81 Resultados gráfica tensión-flecha V.1.1_V.1.6_V.1.7

Del mismo ensayo a flexión a tres puntos obtenemos la apertura de fisura en distintos punto:

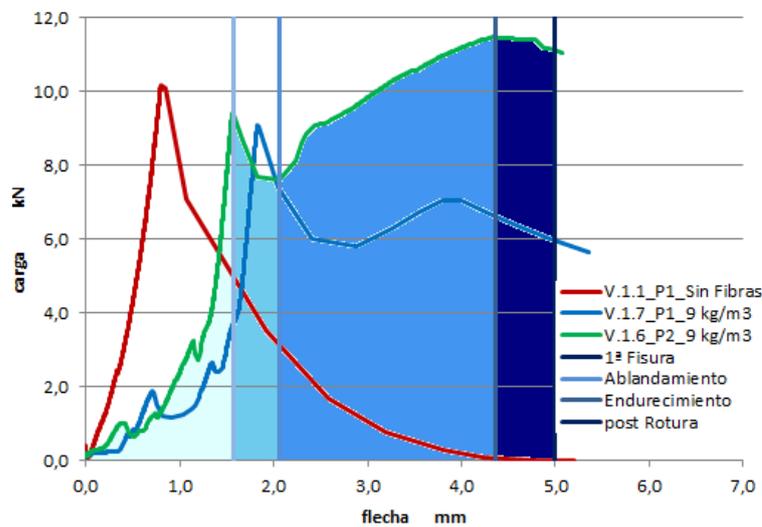


Gráfica. 60. Comparativa V.1.1_V.1.6_V.1.7 Tensión-CMOD.

	fc(MPa), CMOD 0,05	Fc(MPa), F1 CMOD 0,5	fc(MPa), F2 CMOD 1,5	fc(MPa), F3 CMOD 2,5	fc(MPa), F4 CMOD 3,5
V.1.1_P1 (Sin Fibras)	5,64	5,61	-	-	-
V.1.6_P1 (9kg/m ³)	3,27	1,82	1,07	0,74	0,54
V.1.7_P1 (9kg/m ³)	5,02	4,11	3,49	3,91	3,33

Tabla 82 Resultados gráfica tensión-CMOD V.1.1_V.1.6_V.1.7

Con la grafica comparativa de carga-flecha calculamos la tenacidad bajo dicha curva.



Gráfica. 61. Comparativa V.1.1_V.1.6_V.1.7 Tenacidad flexión

	Energía absorbida (N-mm)				Tenacidad (N-mm)
	1ª Fisura	Ablandamiento	Endurecimiento	Post Rotura	
V.1.1_P1 (Sin Fibras)	5215,44	-	-	9941,18	17698,68
V.1.6_P2 (9kg/m ³)	5898,66	5290,56	21804,32	8715,25	41708,79
V.1.7_P1 (9kg/m ³)	5421,75	9223,19	7072,04	8939,04	30656,04

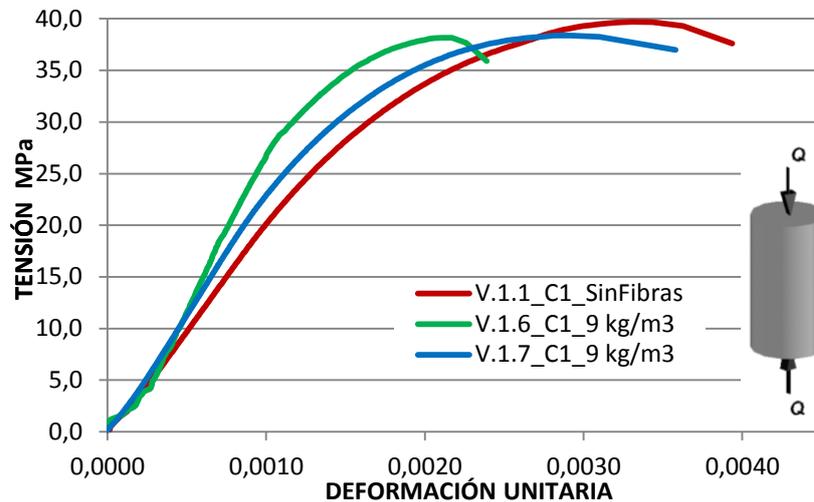
Tabla 83 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.6_V.1.7 probetas prismáticas

Seguidamente hacemos una comparativa de los módulos de deformación, obtenidos mediante un ensayo de compresión al 40% de la resistencia del hormigón.

	V.1.1_C1 (Sin Fibras)	V.1.6_C1 (9kg/m ³)	V.1.7_C1 (9kg/m ³)
Módulo de deformación (MPa)	30053	29817	29606

Tabla 84 Resultados Módulo deformación V.1.1_V.1.6_V.1.7

A continuación comparamos la resistencia a compresión de las distintas probetas cilíndricas.

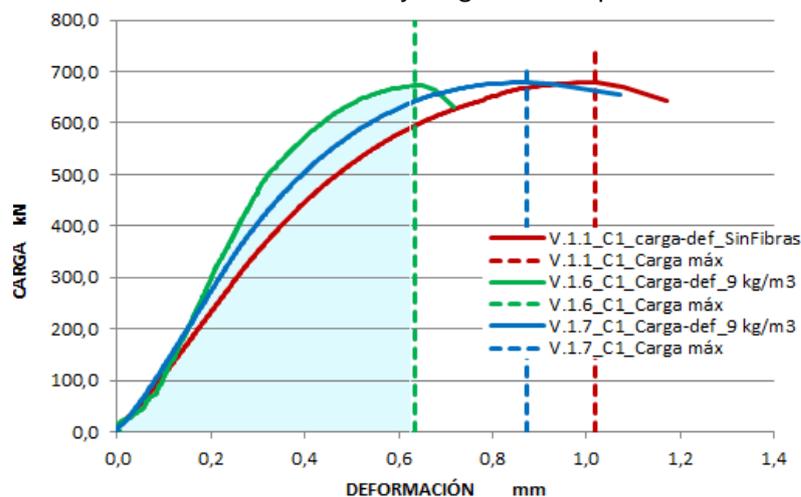


Gráfica. 62. Comparativa V.1.1_V.1.6_V.1.7 Compresión

	Tensión (MPa)	Carga máxima (KN)	Deformación en carga máxima (mm)
V.1.1_C1 (Sin Fibras)	39,69	678,2	0,99
V.1.6_C1 (9kg/m ³)	38,04	672,2	0,63
V.1.7_C1 (9kg/m ³)	38,37	679,1	0,87

Tabla 85 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.6_V.1.7 probetas cilíndricas

Seguidamente obtenemos la tenacidad bajo la gráfica comparativa anterior.



Gráfica. 63. Comparativa V.1.1_V.1.6_V.1.7 Tenacidad probetas compresión

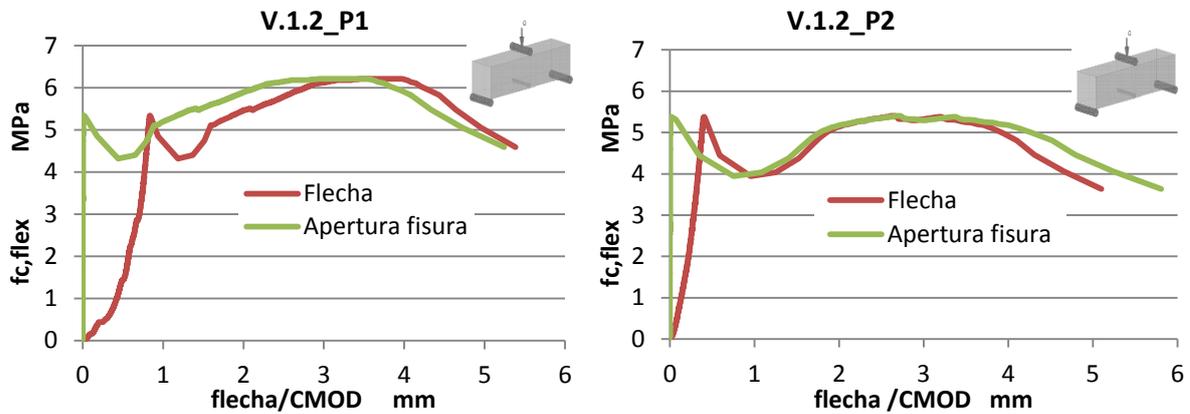
	V.1.1_C1 (Sin Fibras)	V.1.6_C1 (9kg/m ³)	V.1.7_C1 (9kg/m ³)
Tenacidad (N-mm)	507262,19	276714,5	30656,04

Tabla 86 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.6_V.1.7 probetas cilíndricas

5.3.1.8 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.2

En las probetas de la amasada V.1.2 realizadas con un hormigón autocompactante reforzado con 12,4 kg/m³ de fibras se procedió a la realización de un ensayo a flexión a tres puntos sobre cada una de ellas.

De la realización de este ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:



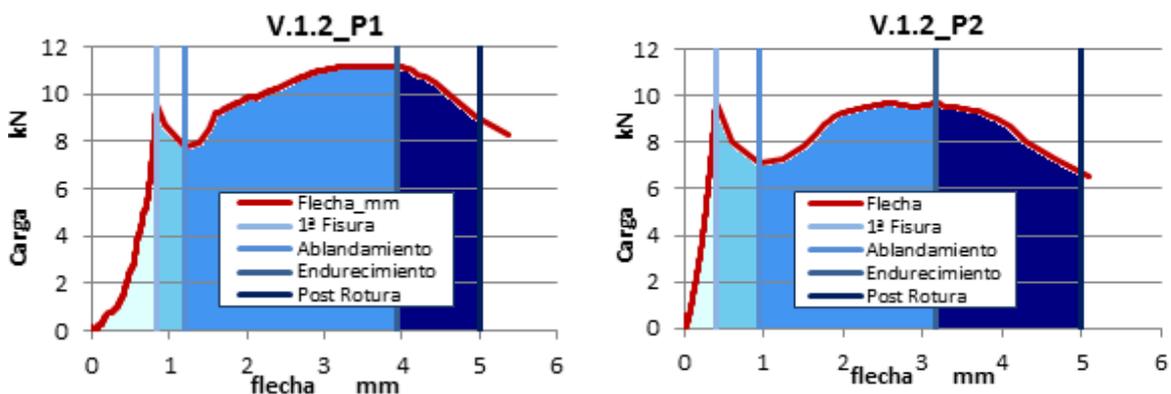
Gráfica. 64. Tensión-flexión/CMOD V.1.2._P1

Gráfica. 65. Tensión-flexión/CMOD V.1.2._P2

	Tensión (MPa)	Carga de rotura (KN)	fc, matriz (MPa)	fc(MPa), CMOD 0,05	Fc(MPa), F1 CMOD 0,5	fc(MPa), F2 CMOD 1,5	fc(MPa), F3 CMOD 2,5	fc(MPa), F4 CMOD 3,5	fc(MPa) Flecha 0,6
V.1.2_P1 (12,4kg/m ³)	6,211	11,18	3,90	5,32	4,32	5,52	6,14	6,21	2,25
V.1.2_P2 (12,4kg/m ³)	5,4	9,72	5,57	5,31	3,94	4,66	5,35	5,31	4,44

Tabla 87 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.2.

Con las gráficas obtenidas del ensayo anterior se halló la energía absorbida en los distintos estados por los que pasa el hormigón hasta 5 mm y la tenacidad.



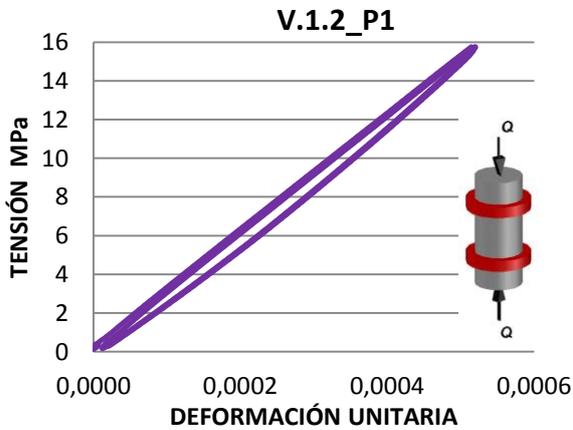
Gráfica 66.Tenacidad bajo curva carga-flecha V.1.2_P1

Gráfica 67.Tenacidad bajo curva carga-flecha V.1.2_P2

	Energía absorbida(N-mm)				Tenacidad (N-mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
	1ª Fisura	Ablandamiento	Endurecimiento	Post Rotura		
V.1.2_P1 (12,4kg/m ³)	4507,48	4488,69	26679,95	17564,54	53240,66	26659
V.1.2_P2 (12,4kg/m ³)	3988,16	6645,17	17270,71	19411,19	47315,22	36178,46

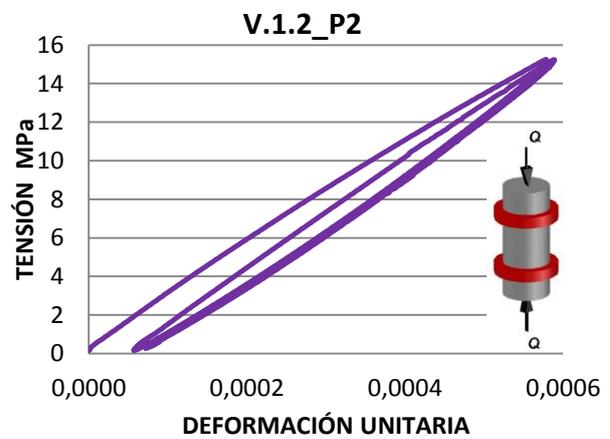
Tabla 88.Resultados gráfica tenacidad V.1.2 probetas prismáticas

Con las probetas cilíndricas obtenidas de esta amasada se realizó el ensayo de compresión para la obtención del módulo de deformación al 40% de la resistencia del hormigón. Obteniendo los siguientes resultados:



Gráfica 68. Módulo de deformación V.1.2_C1

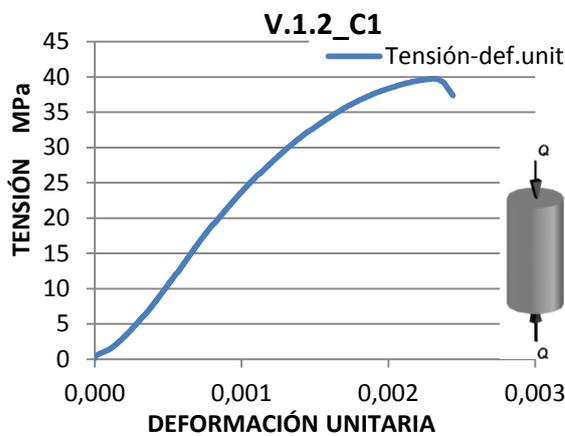
Módulo de deformación: 32326 MPa



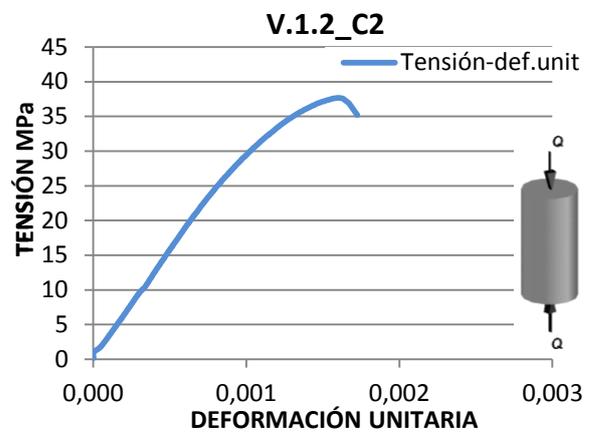
Gráfica 69. Módulo de deformación V.1.2_C2

Módulo de deformación: 30969 MPa

Tras la realización del ensayo de deformación se hizo el ensayo a compresión en probetas cilíndricas y obteniendo los siguientes resultados:



Gráfica 70. Compresión V.1.2_C1

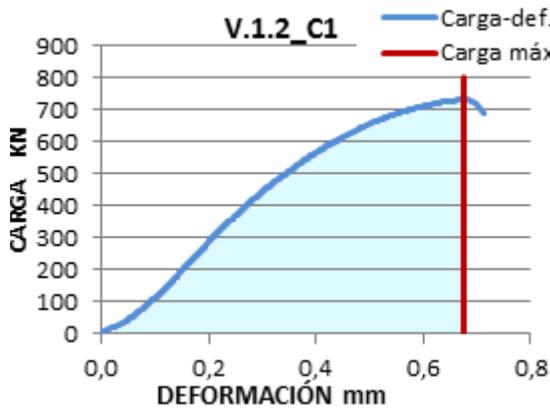


Gráfica 71. Compresión V.1.2_C2

	Tensión (MPa)	Carga de rotura (KN)	Deformación en carga máxima (mm)
V.1.2_C1 (12,4kg/m ³)	41,36	730,9	0,67
V.1.2_C2 (12,4kg/m ³)	40,23	711	0,49

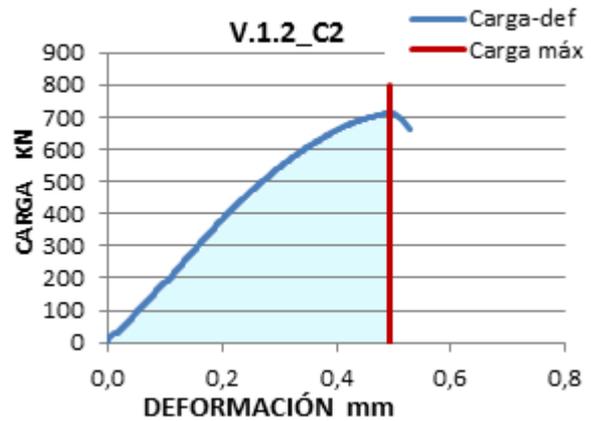
Tabla 89 Resultados gráfica compresión V.1.2 probetas cilíndricas

Con las curvas obtenidas del ensayo anterior se calculo la tenacidad bajo esta curva.



Gráfica 72. Tenacidad V.1.2_C1

Tenacidad: 303819,7 N·mm

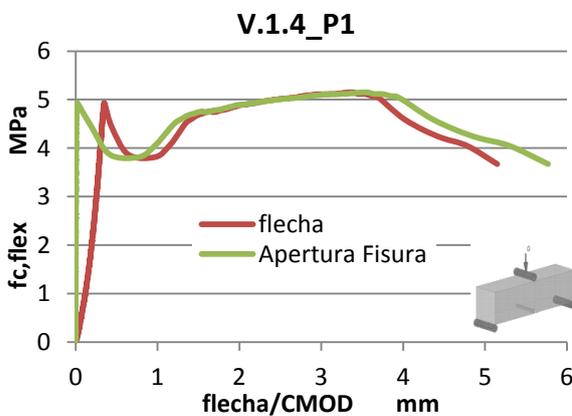


Gráfica 73. Tenacidad V.1.2_C2

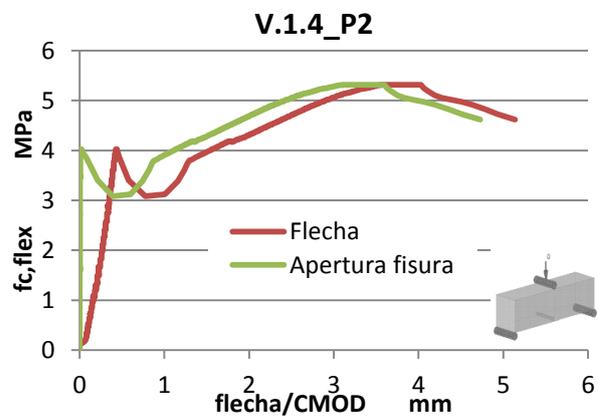
Tenacidad: 215728,1 N·mm

5.3.1.9 Resultados de los ensayos realizados en probetas de la amasada V.1.4

En las probetas de la amasada V.1.4 realizadas con un hormigón autocompactante con 12,4kg/m³ de fibras se procedió a la realización de un ensayo a flexión a tres puntos sobre cada una de ellas.



Gráfica 74. Tensión-flecha/CMOD V.1.4._P1

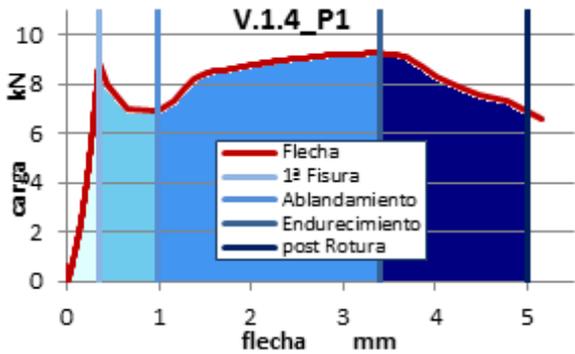


Gráfica 75. Tensión-flecha/CMOD V.1.4._P2

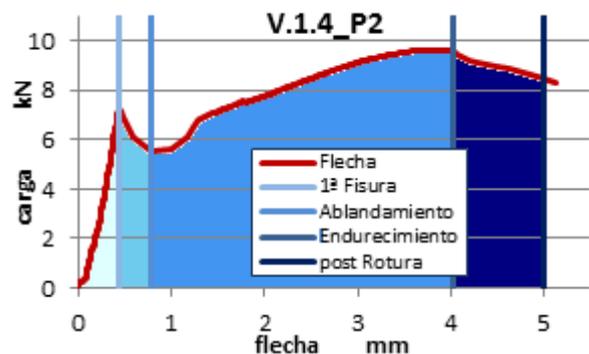
	Tensión (MPa)	Carga de rotura (KN)	fc, matriz (MPa)	fc(MPa), CMOD 0,05	Fc(MPa), F1 CMOD 0,5	fc(MPa), F2 CMOD 1,5	fc(MPa), F3 CMOD 2,5	fc(MPa), F4 CMOD 3,5	fc(MPa) Flecha 0,6
V.1.4_P1 (12,4kg/m ³)	5,15	9,27	4,08	4,91	3,87	4,74	5,01	5,15	3,87
V.1.4_P2 (12,4kg/m ³)	5,32	9,57	3,46	3,86	3,12	4,28	5,05	5,32	3,41

Tabla 90 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.4.

Con las gráficas obtenidas del ensayo anterior se halló la energía absorbida en los distintos estados por los que pasa el hormigón hasta 5 mm y la tenacidad.



Gráfica 76. Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.4_P1

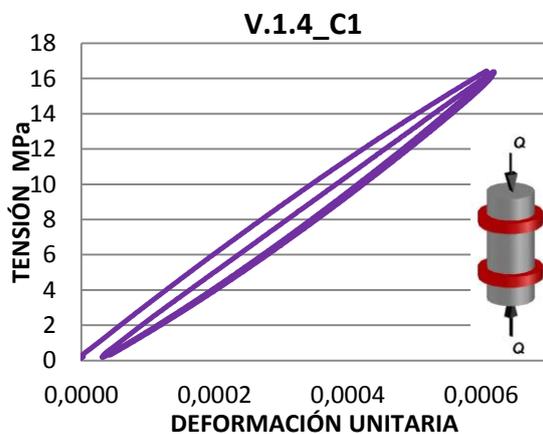


Gráfica 77. Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.4_P2

	Energía absorbida (N-mm)				Tenacidad (N-mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
	1ª Fisura	Ablandamiento	Endurecimiento	Post Rotura		
V.1.4_P1 (12,4kg/m ³)	3993,9	5740,41	20002,44	16594,47	46331,22	27365
V.1.4_P2 (12,4kg/m ³)	3777,95	3359,75	25431,8	11424,91	43994,42	28406

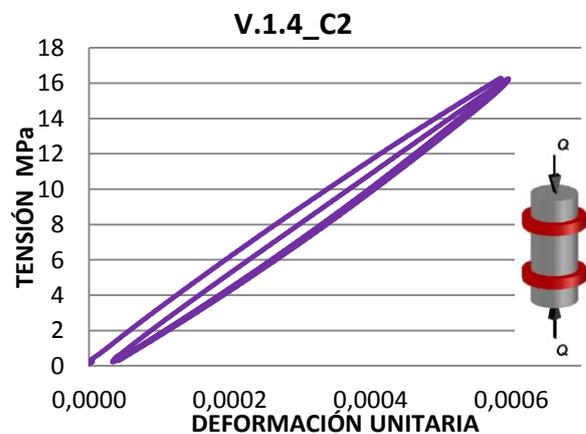
Tabla 91. Resultados gráfica tenacidad V.1.4 probetas prismáticas

Con las probetas cilíndricas obtenidas de la amasada V.1.4 (12,4kg/m³) se realizó el ensayo de compresión para la obtención del módulo de deformación. Obteniendo los siguientes resultados:



Gráfica 78. Módulo de deformación V.1.4_C1

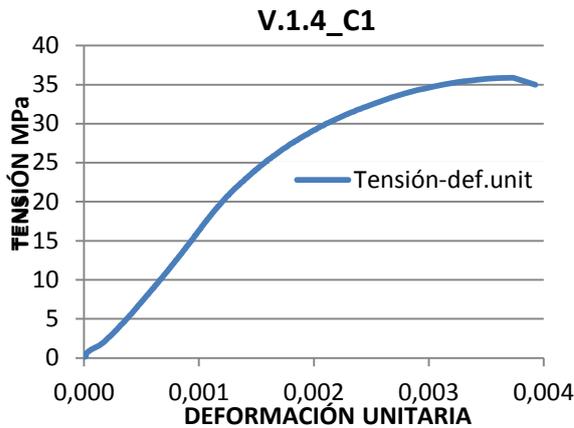
Módulo de deformación: 35298,8 MPa



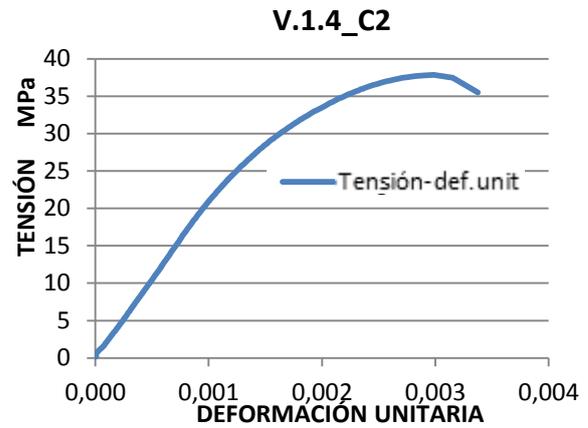
Gráfica 79. Módulo de deformación V.1.4_C2

Módulo de deformación: 21399,86 MPa

Tras la realización del ensayo de deformación se hizo el ensayo a compresión en probetas cilíndricas y obteniendo los siguientes resultados:



Gráfica 80. Compresión V.1.4_C1

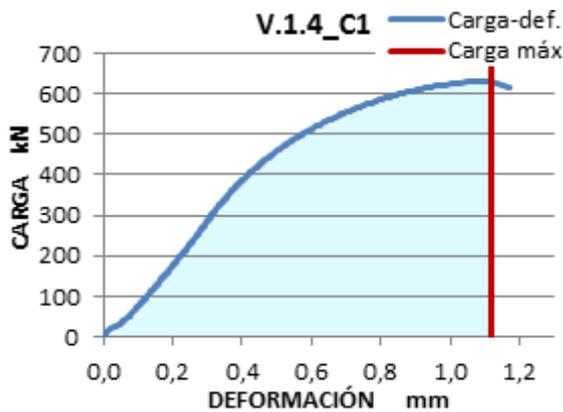


Gráfica 81. Compresión V.1.4_C2

	Tensión (MPa)	Carga de rotura (KN)	Deformación en carga máxima (mm)
V.1.4_C1 (12,4kg/m ³)	35,73	631,4	1,12
V.1.4_C2 (12,4kg/m ³)	37,939	670,4	0,9

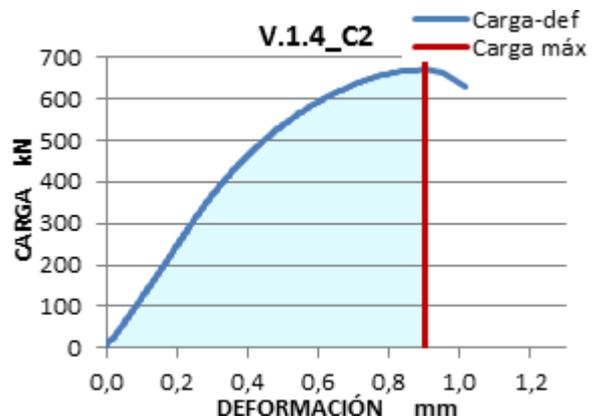
Tabla 92 Resultados gráfica compresión V.1.4 probetas cilíndricas

Con las curvas obtenidas del ensayo anterior se calculo la tenacidad bajo esta curva.



Gráfica 82. Tenacidad V.1.4_C1

Tenacidad: 504980,18 N·mm



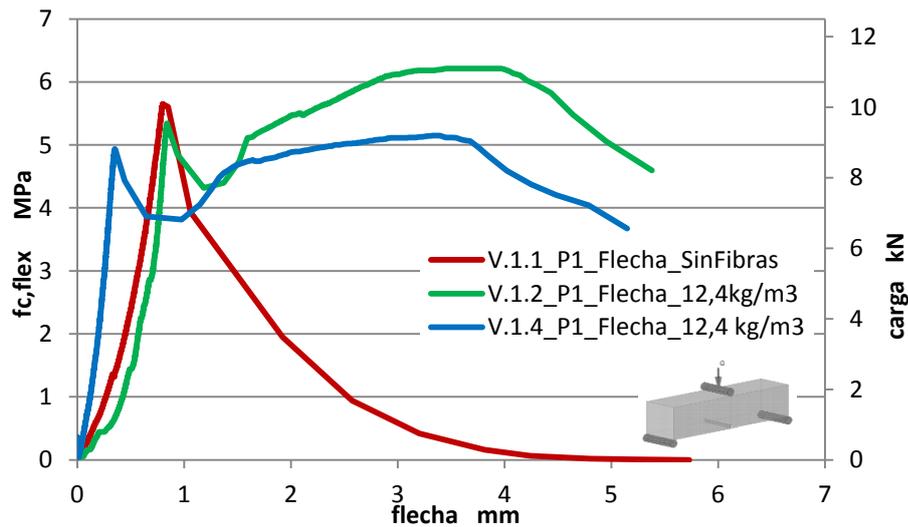
Gráfica 83. Tenacidad V.1.4_C2

Tenacidad: 429936,55 N·mm

5.3.1.10 Análisis de resultados de HAC reforzado con 12,4 kg/m³ de fibras poliméricas en probetas

Realizamos una comparativa de las probetas más óptimas obtenidas de las amasadas V.1.2 y V.1.4 con la V.1.1, considerada como patrón.

En primer lugar comparamos las distintas gráficas de tensión-deformación, obteniendo dos gráficas una para la flecha y otra para la apertura de fisura:

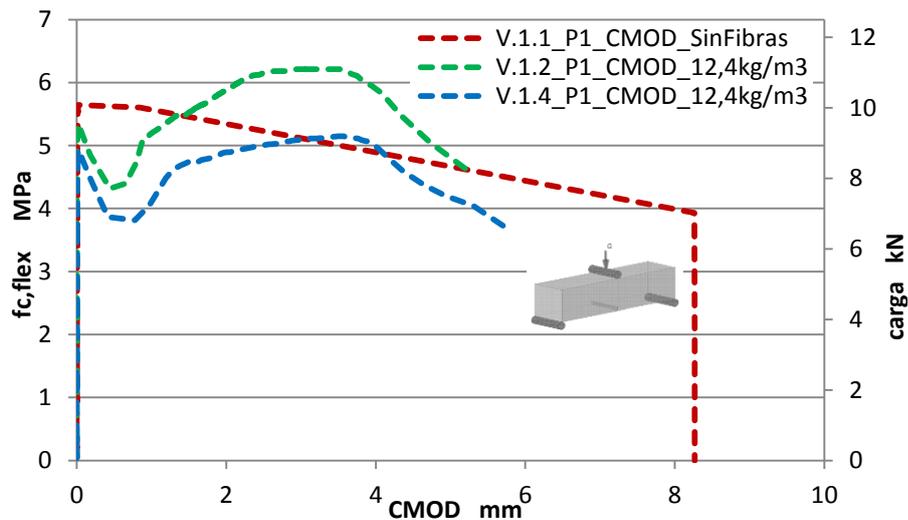


Gráfica. 84. Comparativa V.1.1_V.1.2_V.1.4 Tensión-flecha.

	V.1.1_P1 (Sin Fibras)	V.1.2_P1 (12,4kg/m ³)	V.1.4_P1 (12,4kg/m ³)
Carga máxima (kN)	10,16	6,211	5,15
Tensión (MPa)	5,64	11,18	9,27
fc(MPa) Flecha 0,6	3,28	2,25	3,87
Módulo de elasticidad (MPa)	20693	26659	27365

Tabla 93 Resultados gráfica tensión-flecha V.1.1_V.1.2_V.1.4

Del mismo ensayo a flexión a tres puntos obtenemos la apertura de fisura en distintos punto:

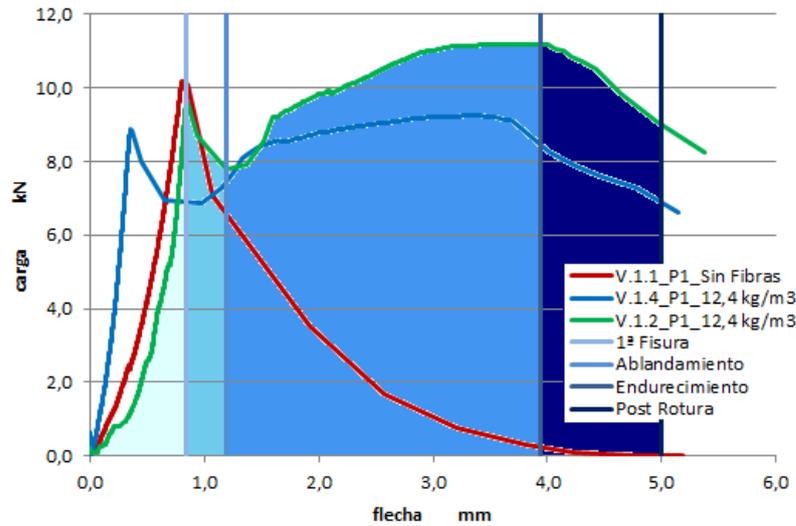


Gráfica. 85. Comparativa V.1.1_V.1.2_V.1.4 Tensión-CMOD.

	fc(MPa), CMOD 0,05	Fc(MPa), F1 CMOD 0,5	fc(MPa), F2 CMOD 1,5	fc(MPa), F3 CMOD 2,5	fc(MPa), F4 CMOD 3,5
V.1.1_P1 (Sin Fibras)	5,64	5,61	-	-	-
V.1.2_P1 (12,4kg/m ³)	5,32	4,32	5,52	6,14	6,21
V.1.4_P1 (12,4kg/m ³)	4,91	3,87	4,74	5,01	5,15

Tabla 94 Resultados gráfica tensión-CMOD V.1.1_V.1.2_V.1.4

Con la gráfica comparativa de carga-flecha calculamos la tenacidad bajo dicha curva.



Gráfica. 86. Comparativa V.1.1_V.1.2_V.1.4 Tenacidad flexión

	Energía absorbida (N-mm)				Tenacidad(N-mm)
	1ª Fisura	Ablandamiento	Endurecimiento	Post Rotura	
V.1.1_P1 (Sin Fibras)	5215,44	-	-	9941,18	17698,68
V.1.2_P1 (12,4kg/m ³)	4507,48	4488,69	26679,95	17564,54	53240,66
V.1.4_P1 (12,4kg/m ³)	3993,9	5740,41	20002,44	16594,47	46331,22

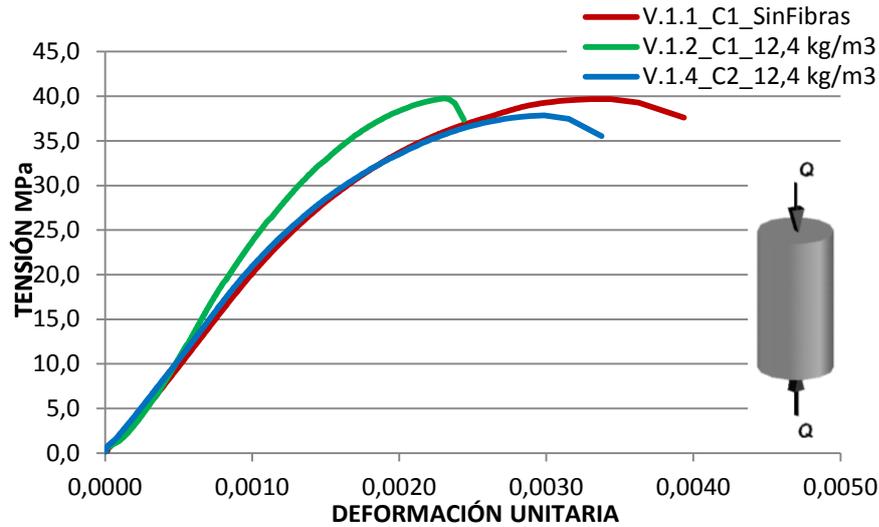
Tabla 95 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.2_V.1.4 probetas prismáticas

Seguidamente hacemos una comparativa de los módulos de deformación, obtenidos mediante un ensayo de compresión al 40% de la resistencia del hormigón.

	V.1.1_C1 (Sin Fibras)	V.1.2_C1 (12,4kg/m ³)	V.1.4_C2 (12,4kg/m ³)
Módulo de deformación (MPa)	30053	32326	21399,86

Tabla 96 Resultados Módulo deformación V.1.1_V.1.2_V.1.4

A continuación comparamos la resistencia a compresión de las distintas probetas cilíndricas.

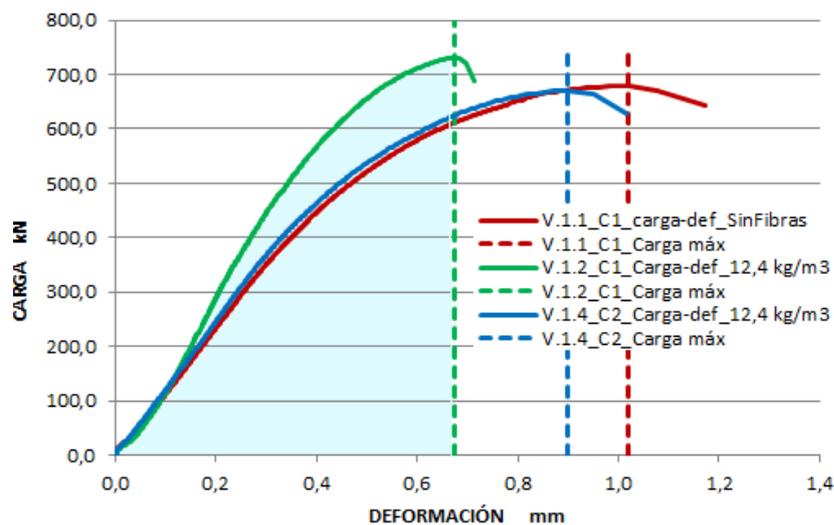


Gráfica. 87. Comparativa V.1.1_V.1.2_V.1.4 Compresión

	Tensión (MPa)	Carga máxima (KN)	Deformación en carga máxima (mm)
V.1.1_C1 (Sin Fibras)	39,69	678,2	0,99
V.1.2_C1 (12,4kg/m ³)	41,36	730,9	0,67
V.1.4_C2 (12,4kg/m ³)	37,94	670,4	0,9

Tabla 97 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.2_V.1.4 probetas cilíndricas

Seguidamente obtenemos la tenacidad bajo la gráfica comparativa anterior.



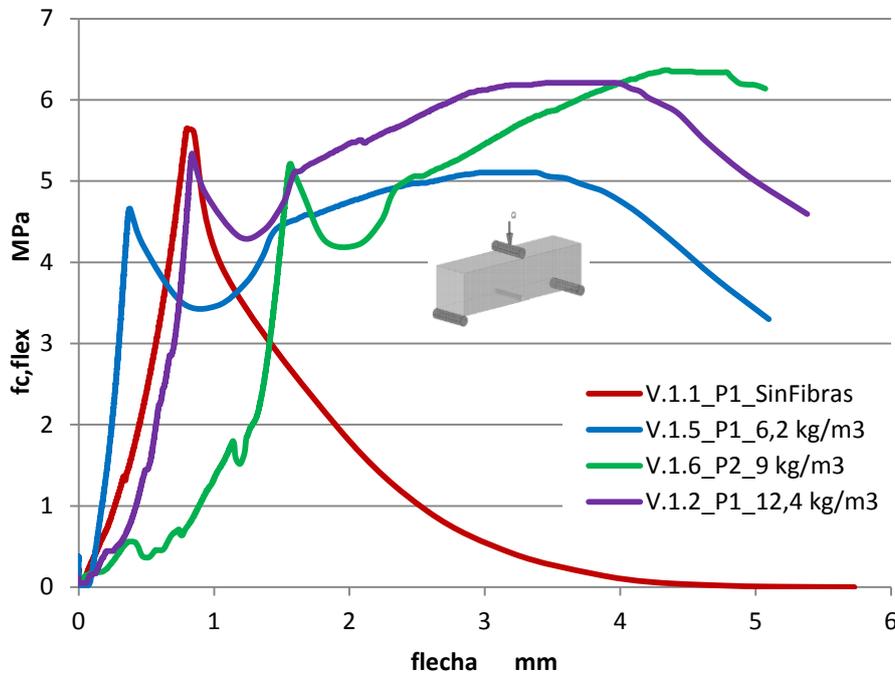
Gráfica. 88. Comparativa V.1.1_V.1.2_V.1.4 Tenacidad probetas compresión

	V.1.1_C1 (Sin Fibras)	V.1.2_C1 (12,4kg/m ³)	V.1.4_C2 (12,4kg/m ³)
Tenacidad (N-mm)	507262,19	303819,7	429936,55

Tabla 98 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.2_V.1.4 probetas cilíndricas

5.3.1.11 Análisis de resultados de HAC reforzado con distintas cantidades de fibras poliméricas en probetas

En primer lugar comparamos las distintas gráficas de tensión-deformación, obteniendo dos gráficas una para la flecha y otra para la apertura de fisura:



Gráfica. 89. Comparativa V.1.1_V.1.5_V.1.6_V.1.2 Tensión-flecha.

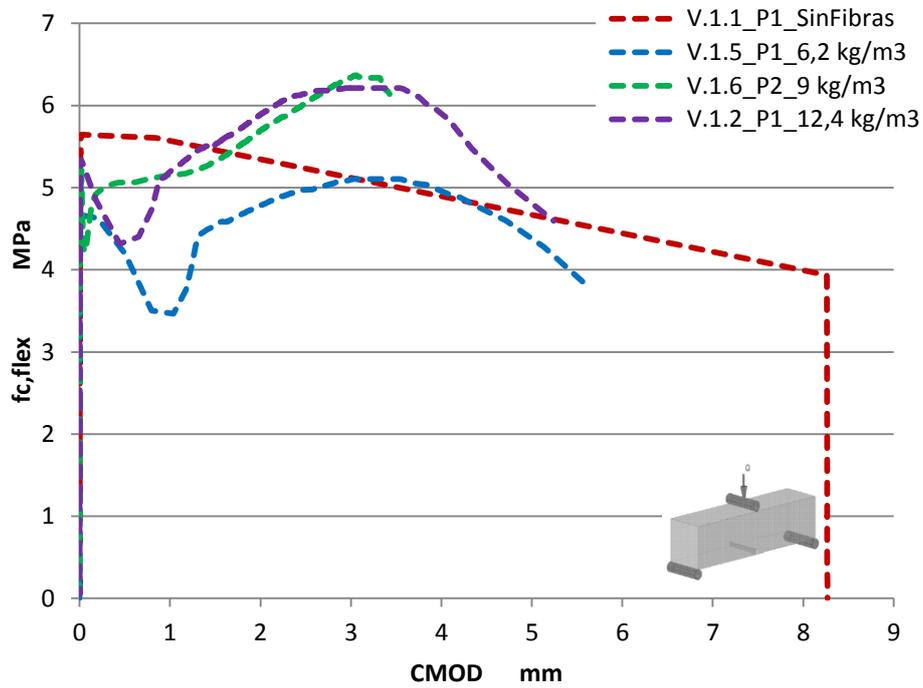
	V.1.1_P1 (Sin Fibras)	V.1.5_P1 (6,2kg/m ³)	V.1.6_P2 (9kg/m ³)	V.1.2_P1 (12,4kg/m ³)
Carga máxima (kN)	10,16	9,19	8,35	6,21
Tensión (MPa)	5,64	5,11	4,64	11,18
f _c (MPa) Flecha 0,6	3,28	3,51	0,46	2,25
Módulo de elasticidad (MPa)	20693	36559,89	24490,86	26659

Tabla 99 Resultados gráfica tensión-flecha V.1.1_V.1.5_V.1.6_V.1.2

Podemos observar que la probeta sin fibras, en cuanto a la carga máxima soportada a primera fisura, alcanza valores mayores que las probetas que contienen fibras. Sin embargo observamos que tras la primera fisura la probeta sin fibras deja de soportar cargas rompiendo de forma instantánea, en cambio las probetas con fibras tras un pequeño descenso en la curva observamos que recuperan resistencia superando, en ocasiones, su propia carga de primera fisura; siendo mayor la recuperación en la probeta conforme aumenta la cantidad de fibras contenidas en la sección donde se aplica la carga. Esto es debido a la colaboración de las fibras con la matriz, dando como resultado un mayor control de fisuración directamente proporcional a la cantidad de fibras añadidas.

En cuanto a la flecha observamos que para una misma flecha la carga soportada por la probeta es mayor a medida que aumentamos los kg/m³ de fibras.

Del mismo ensayo a flexión a tres puntos obtenemos la apertura de fisura en distintos punto:



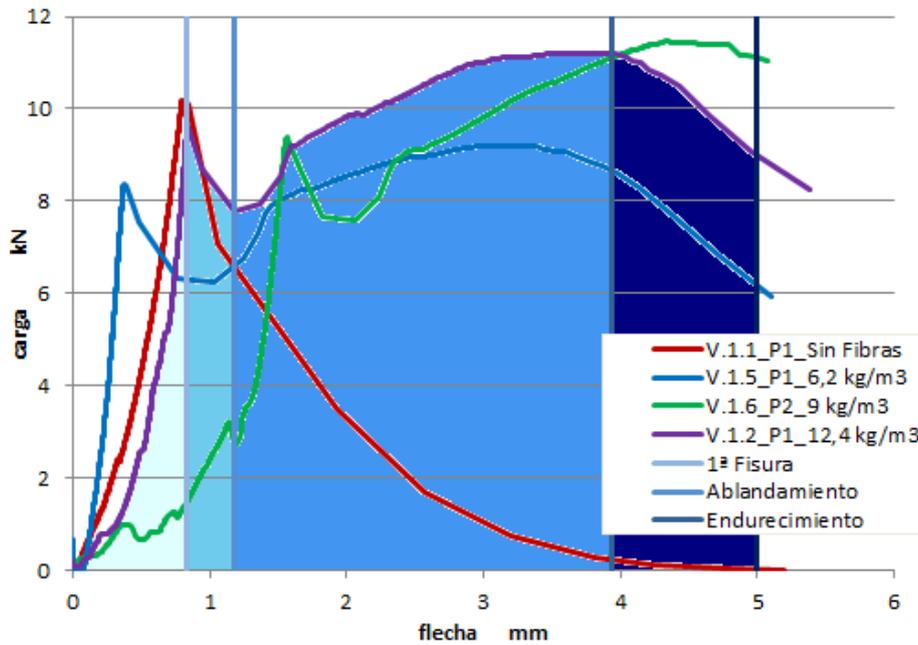
Gráfica. 90. Comparativa V.1.1_V.1.5_V.1.6_V.1.2 Tensión-CMOD.

	fc(MPa), CMOD 0,05	Fc(MPa), F1 CMOD 0,5	fc(MPa), F2 CMOD 1,5	fc(MPa), F3 CMOD 2,5	fc(MPa), F4 CMOD 3,5
V.1.1_P1 (Sin Fibras)	5,64	5,61	-	-	-
V.1.5_P1 (6,2kg/m ³)	4,63	3,51	4,56	4,97	5,11
V.1.6_P2 (9kg/m ³)	3,27	1,82	1,07	0,74	0,54
V.1.2_P1 (12,4kg/m ³)	5,32	4,32	5,52	6,14	6,21

Tabla 100 Resultados gráfica tensión-CMOD V.1.1_V.1.5_V.1.6_V.1.2

En cuanto a la apertura de fisura a medida que aumentamos los kg/m³ de fibras para una misma apertura el hormigón soporta mayores cargas, debido al cosido que producen las fibras en la matriz.

Con la gráfica comparativa de carga-flecha calculamos la tenacidad bajo dicha curva.



Gráfica. 91. Comparativa V.1.1_V.1.5_V.1.6_V.1.2 Tenacidad flexión

	Energía Absorbida(N·mm)				Tenacidad (N·mm)
	1ª Fisura	Ablandamiento	Endurecimiento	Post Rotura	
V.1.1_P1 (Sin Fibras)	5215,44	-	-	9941,18	17698,68
V.1.5_P1 (6,2kg/m ³)	3417,94	5741,57	18762,55	16658,77	44580,83
V.1.6_P2 (9kg/m ³)	5898,66	5290,56	21804,32	8715,25	41708,79
V.1.2_P1 (12,4kg/m ³)	4507,48	4488,69	26679,95	17564,54	53240,66

Tabla 101 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.5_V.1.6_V.1.2 probetas prismáticas

El área existente bajo curva hasta primera fisura es menor en probetas con fibras, lo cual nos indica que hasta dicho momento el material sin fibras absorbe mayor energía. Sin embargo, en el resto de fases el hormigón sin fibras no es capaz de absorber tanta energía como el hormigón reforzado con fibras. Así pues, observamos que la tenacidad es mayor cuanto mayor cantidad de fibras contenga el hormigón, debido a que las fibras trabajan cosiendo la matriz retardando y “controlando” la rotura, produciendo así un aumento de las deformaciones y de la energía absorbida.

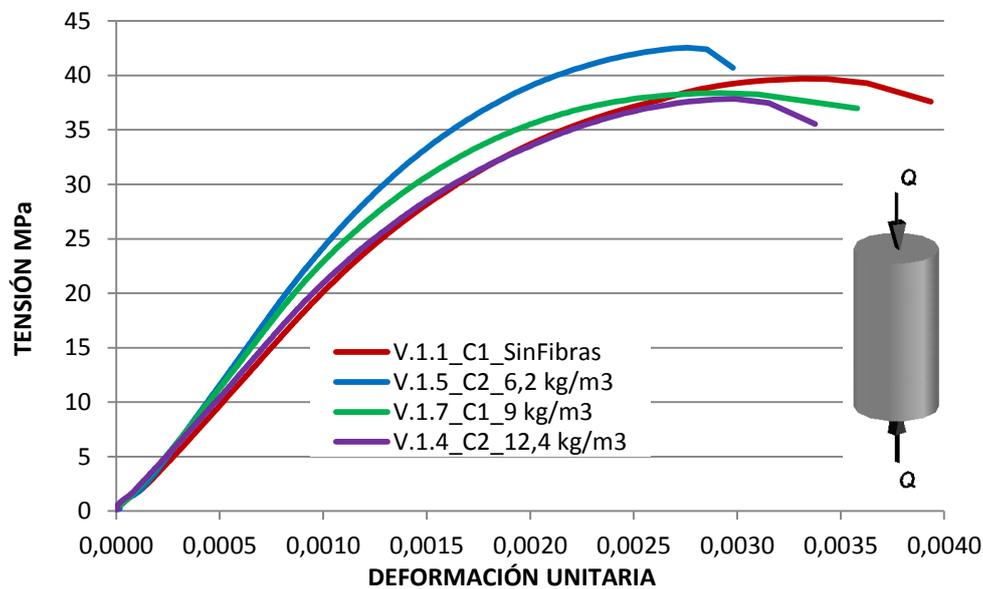
Seguidamente hacemos una comparativa de los módulos de deformación, obtenidos mediante un ensayo de compresión al 40% de la resistencia del hormigón.

	V.1.1_C1 (Sin Fibras)	V.1.5_C2 (6,2kg/m ³)	V.1.7_C1 (9kg/m ³)	V.1.4_C2 (12,4kg/m ³)
Módulo de deformación (MPa)	30053	30150	29606	21399,86

Tabla 102 Resultados Módulo deformación V.1.1_V.1.5_V.1.7_V.1.4

Para pequeñas cantidades de fibras observamos una ligera variación en el módulo de deformación. Sin embargo, conforme aumenta la cantidad de fibras la diferencia en el módulo de elasticidad es más significativa, siendo menor el módulo cuanto más kg/m³ de fibras contenga el hormigón.

A continuación comparamos la resistencia a compresión de las distintas probetas cilíndricas.



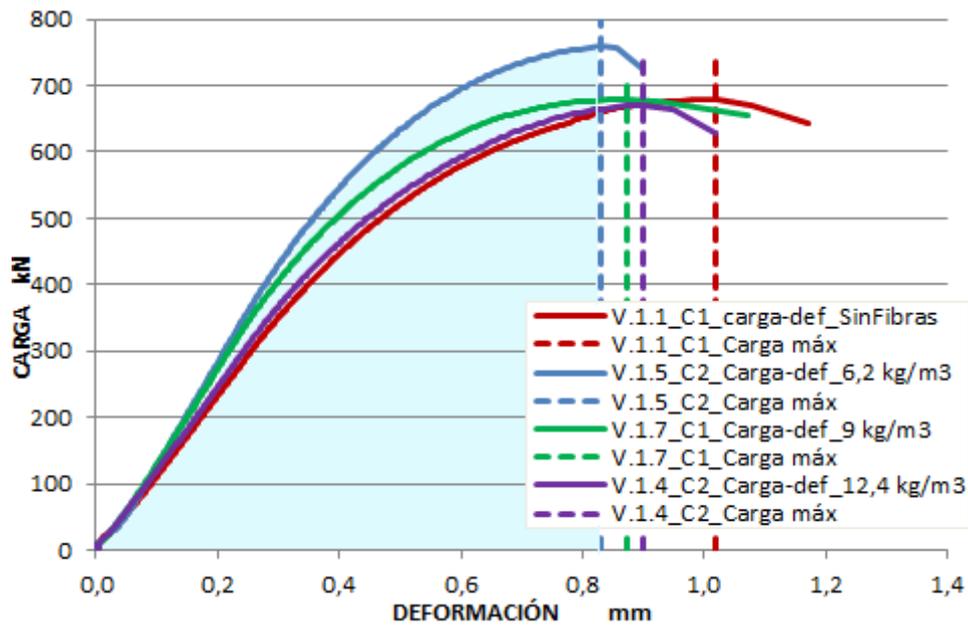
Gráfica. 92. Comparativa V.1.1_V.1.5_V.1.7_V.1.4 Compresión

	Tensión (MPa)	Carga máxima (KN)	Deformación en carga máxima (mm)
V.1.1_C1 (Sin Fibras)	39,69	678,2	0,99
V.1.5_C2 (6,2kg/m ³)	42,92	758,5	0,82
V.1.7_C1 (9kg/m ³)	38,37	679,1	0,87
V.1.4_C2 (12,4kg/m ³)	37,94	670,4	0,9

Tabla 103 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.5_V.1.7_V.1.4 probetas cilíndricas

Se aprecian pequeñas variaciones en la resistencia a compresión de las probetas, tanto aumento como descenso, tal y como describe la ACI, suponemos que dichas variaciones son debidas a la dirección y disposición aleatoria de las fibras. También cabe destacar que con la adición de fibras se reduce la deformación de la probeta.

Seguidamente obtenemos la tenacidad bajo la gráfica comparativa anterior.



	V.1.1_C1 (Sin Fibras)	V.1.5_C2 (6,2kg/m ³)	V.1.7_C1 (9kg/m ³)	V.1.4_C2 (12,4kg/m ³)
Tenacidad (N-mm)	507262,19	426706	30656,04	429936,55

Tabla 104 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.5_V.1.7_V.1.4 probetas cilíndricas

En cuanto a la tenacidad en probetas sometidas a compresión comprobamos que la cantidad de energía absorbida por el material sin fibras es mayor con respecto a las otras probetas, contrariamente a lo sucedido en la obtención de la tenacidad en probetas sometidas a flexión.

Observamos que a medida que aumenta la cantidad de fibras del material disminuye la capacidad de absorción de energía del mismo.

Tras el análisis de los resultados cabe destacar que las variaciones que existen entre las probetas con una cantidad determinada de fibras puede ser debido a la distribución aleatoria y no uniforme de las fibras dentro de las probetas.

		Probeta 1	Probeta 2
6,2 kg/m ³	AMASADA V.1.3		
	Compresión	11	23
	Flexión	17	16
	AMASADA V.1.5		
	Compresión	26	34
	Flexión	29	25
9 kg/m ³	AMASADA V.1.6		
	Compresión	11	19
	Flexión	16	34
	AMASADA V.1.7		
	Compresión	24	26
	Flexión	21	23
12,4 kg/m ³	AMASADA V.1.2		
	Compresión	47	48
	Flexión	37	40
	AMASADA V.1.4		
	Compresión	42	48
	Flexión	40	32

Tabla 105 Cantidad de fibras



Imagen 116 cantidad de fibras probetas prismáticas



Imagen 117 cantidad de fibras probetas prismáticas



Imagen 118 cantidad de fibras en probetas prismáticas



Imagen 119 cantidad de fibras en probetas probeta cilíndrica



Imagen 120 cantidad de fibras en probetas probeta cilíndrica

5.3.2 Ensayos en vigas

Se realizaron ensayos a flexión en las distintas vigas armadas para fallar a cortante, con el fin de analizar el mismo al incorporar distintas cantidades de fibras poliméricas.

EL armado utilizado varía en la cantidad de armaduras transversales, teniendo 7 cercos dobles en el caso de armado patrón y 7 cercos simples en el caso de medio patrón. El armado longitudinal será el mismo para ambos casos, 6 barras de diámetro 8 acabadas en patilla para el armado inferior y dos barras del diámetro del 8 sin patilla para el armado superior, tal y como se describe en el programa experimental, punto 3 del proyecto.

Las vigas han sido instrumentadas con 3 LVDT en su lado izquierdo y DMECS en su lado derecho.

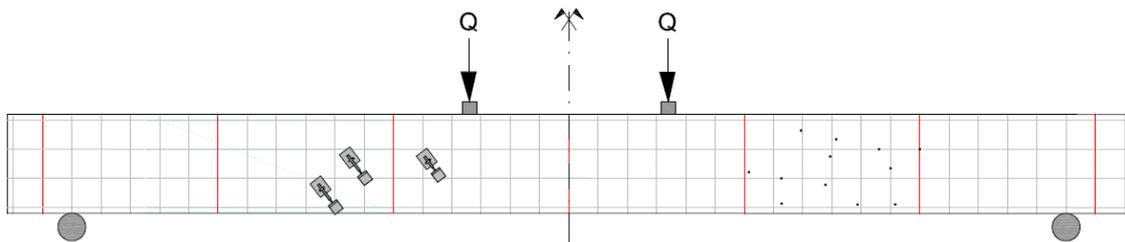


Figura 30 instrumentación vigas

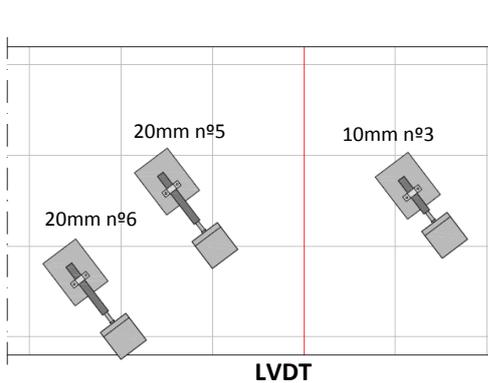


Figura 31. LVDT

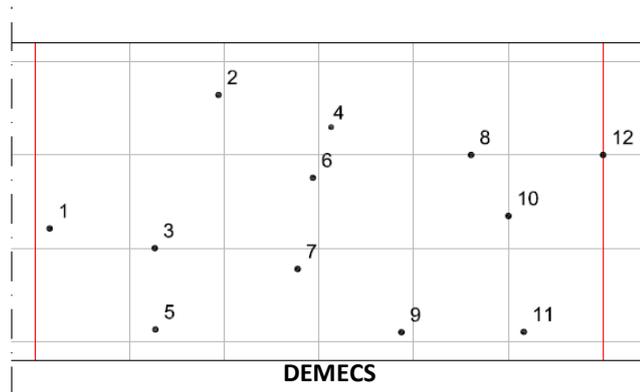
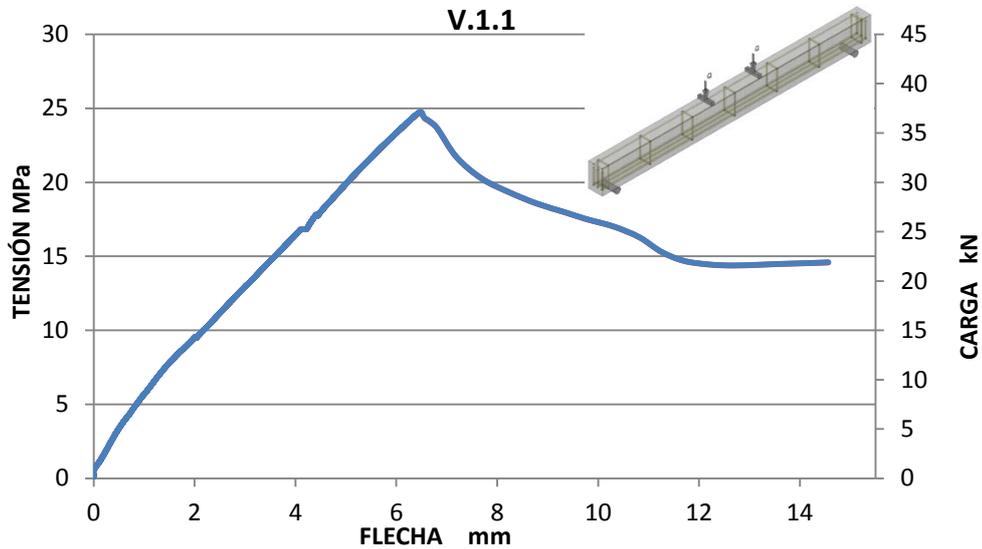


Figura 32. DMECS

5.3.2.1 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.1

Los resultados obtenidos tras el ensayo a flexión realizado en la viga V.1.1 de hormigón autocompactante sin fibras y armado patrón fueron:

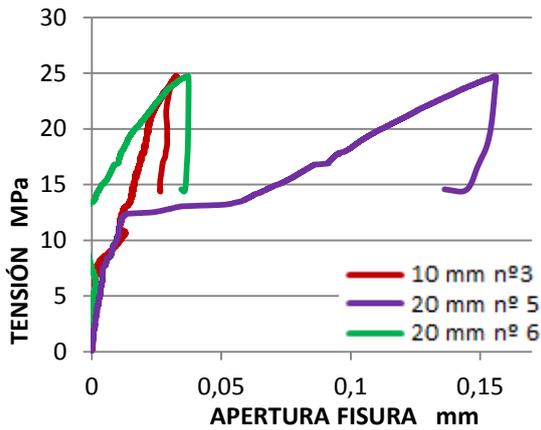


Gráfica 94. Tensión-flecha viga V.1.1

	1ª Fisuración			Rotura			
	Carga (kN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (kN)	Flecha (mm)	Tensión (MPa)	Descripción
V.1.1 (Sin Fibras)	25,24	4,22	Flexión	37,14	6,48	24,74	Rotura frágil instantánea por cortante

Tabla 106 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.1

Resultados obtenidos de los captadores LVDT y DEMECS.



Gráfica 95 LVDT viga V.1.1

	V.1.1	
	1º (25,24 kN)	Post rotura (37,14 kN)
nº 3	0,019	0,033
nº 5	0,009	0,037
nº 6	0,087	0,156

Tabla 108 Resultados LVDT viga V.1.1

	V.1.1	
	1º (25,24 kN)	Post rotura (37,14 kN)
1-2	0,004	>5,512 (No se puede medir)
3-4	0,023	>5,512 (No se puede medir)
5-6	0,042	>5,512 (No se puede medir)
7-8	0,002	>5,512 (No se puede medir)
9-10	0,028	>5,512 (No se puede medir)
11-12	0	>5,512 (No se puede medir)

Tabla 107 Resultados DEMECS viga V.1.1

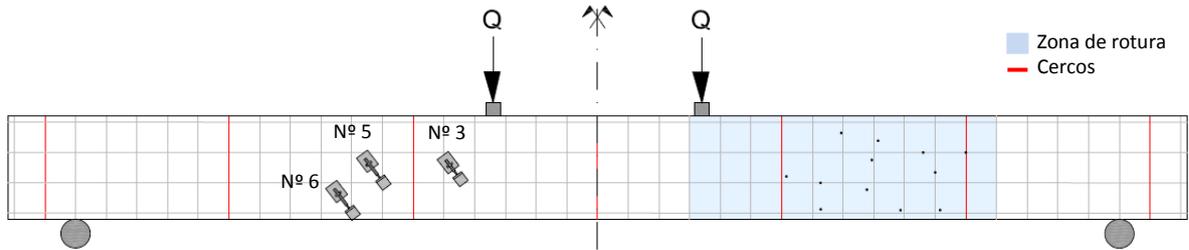


Figura 33. Zona rotura viga V.1.1

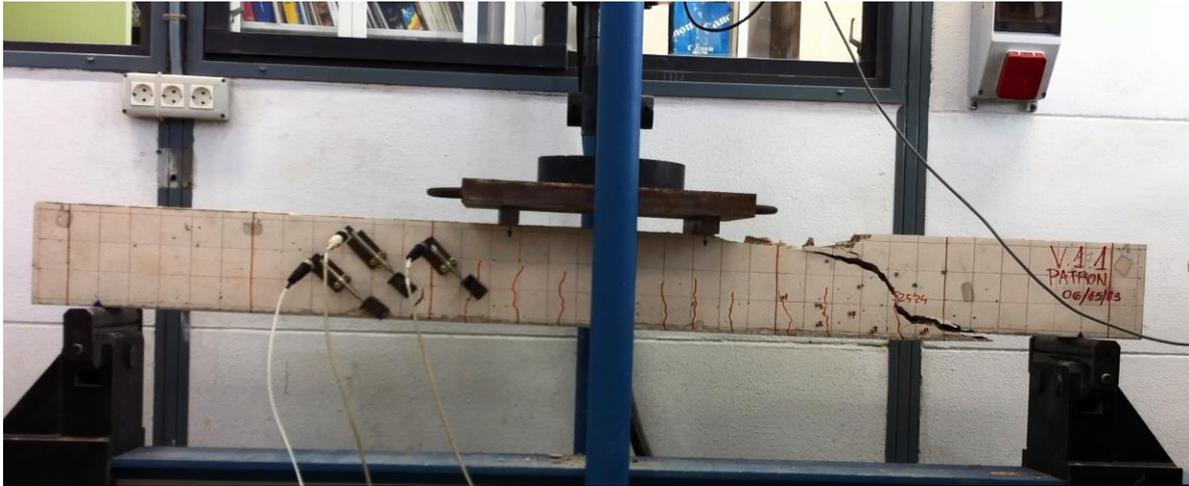


Imagen 121. Viga V.1.1 tras ensayo flexión a 4 puntos

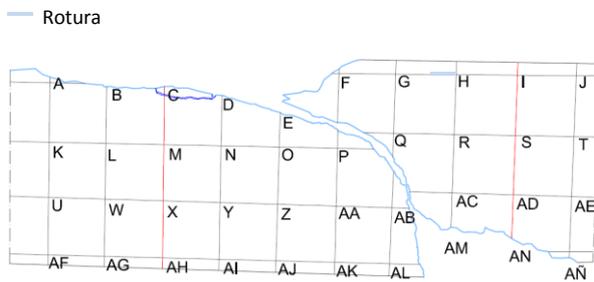


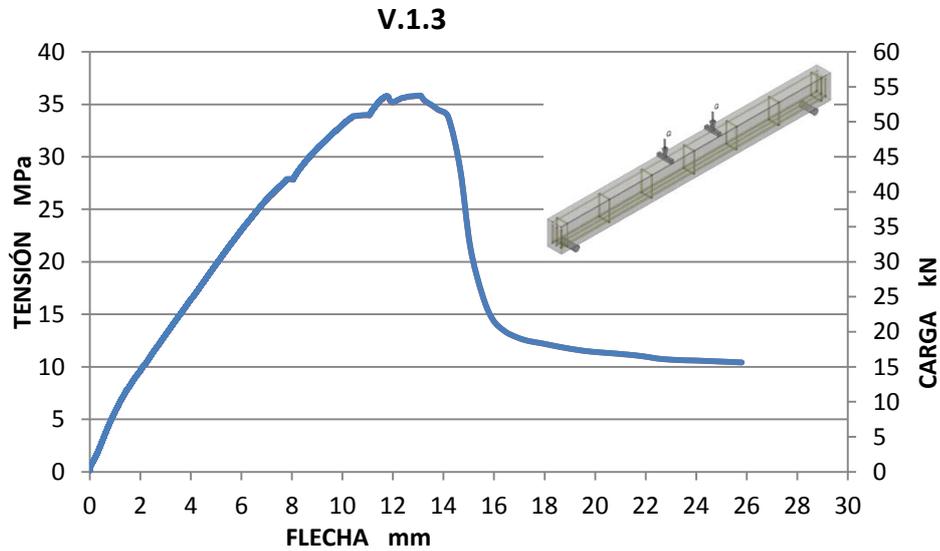
Figura 34. Rotura viga V.1.1



Imagen 122. Rotura viga V.1.1

5.3.2.2 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.3

Los resultados obtenidos tras el ensayo a flexión realizado en la viga V.1.3 de hormigón autocompactante reforzado con $6,2 \text{ kg/m}^3$ de fibras poliméricas y armado patrón fueron:



Gráfica 96. Tensión-flecha viga V.1.3

	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura			
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Tensión (MPa)	Descripción
V.1.3 (6,2 kg/m ³)	41,82	8,04	Cortante	50,97	11,07	Flexión y Cortante	53,76	13,06	36,22	Rotura frágil progresiva por cortante

Tabla 109 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.3

Al tratarse de la primera viga en romperse no se instrumentó, ya que no disponíamos del material necesario.

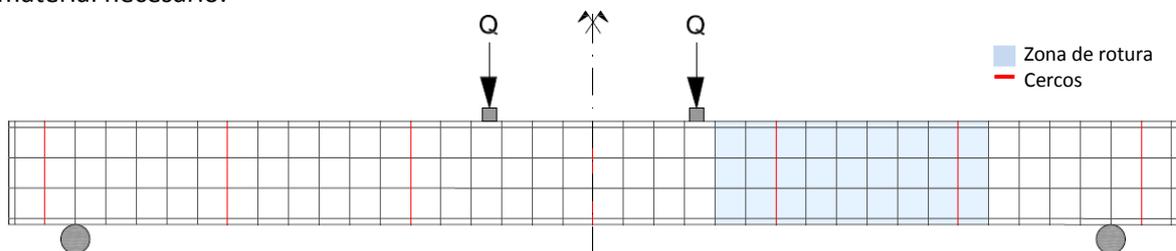


Figura 35. Zona rotura viga V.1.3

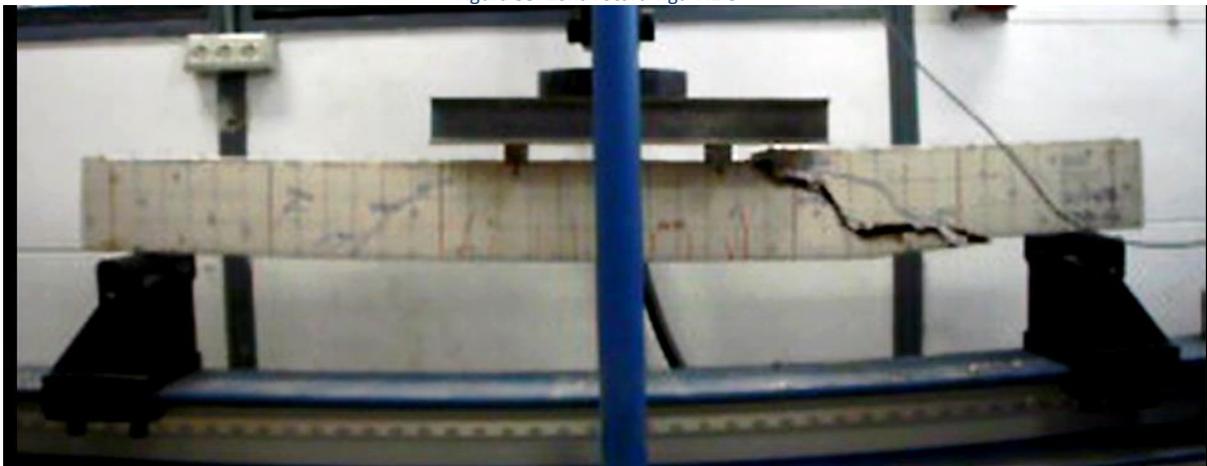


Imagen 123. Viga V.1.3 tras ensayo flexión a 4 puntos

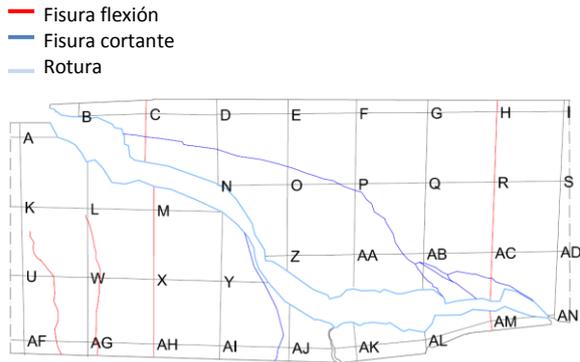


Figura 36. Rotura viga V.1.3

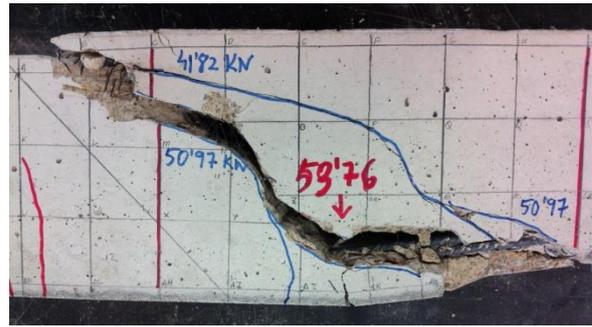
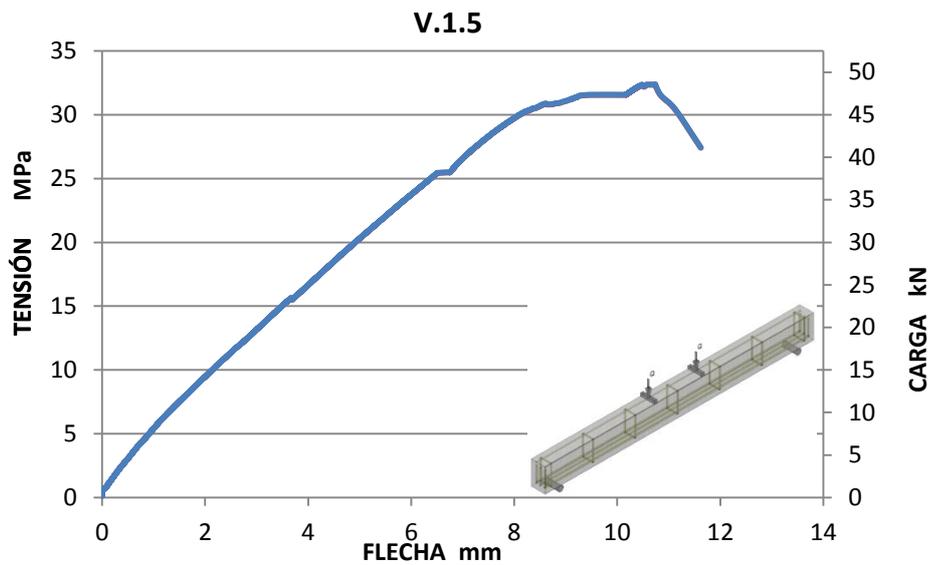


Imagen 124. Rotura viga V.1.3

5.3.2.3 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.5

Los resultados obtenidos tras el ensayo a flexión realizado en la viga V.1.5 de hormigón autocompactante reforzado con $6,2 \text{ kg/m}^3$ de fibras poliméricas y armado medio patrón fueron:

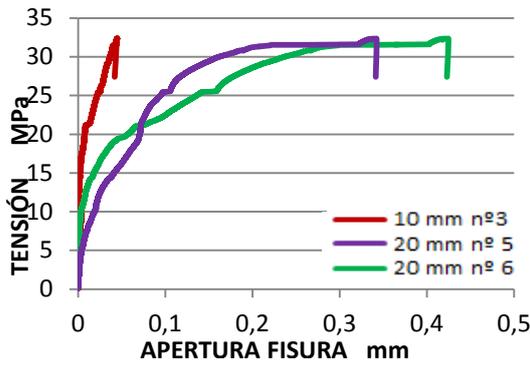


Gráfica 97. Tensión-flecha viga V.1.5

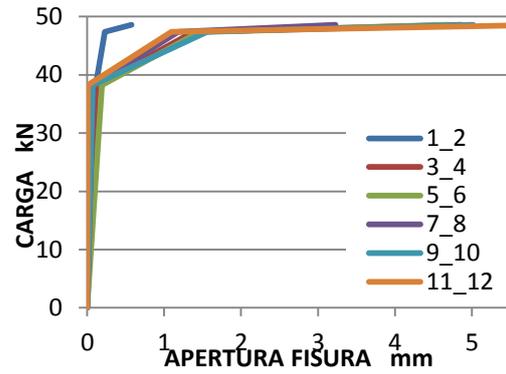
	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura			Descripción
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Tensión (MPa)	
V.1.5 (6,2kg/m ³)	38,24	6,7	Flexión	47,36	10,16	Flexión y Cortante	48,6	10,74	34,3	Rotura frágil progresiva por cortante

Tabla 110 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.5

Resultados obtenidos de los captadores LVDT y DEMECS.



Gráfica 98 LVDT viga V.1.5



Gráfica 99 LVDT viga V.1.5

V.1.5			
	1º (38,24 kN)	2º (47,36 kN)	Post rotura (48,59 kN)
nº 3	0,025	0,044	0,044
nº 5	0,147	0,342	0,424
nº 6	0,1	0,263	0,343

Tabla 111 Resultados LVDT viga V.1.5

V.1.5			
	1º (38,24 kN)	2º (47,36 kN)	Post rotura (48,59 kN)
1-2	0,111	0,23	0,577
3-4	0,117	1,382	4,858
5-6	0,19	1,46	4,68
7-8	0,079	1,181	3,228
9-10	0,069	1,557	5,017
11-12	0,009	1,095	>5,512 (No se puede medir)

Tabla 112 Resultados DEMECS viga V.1.5

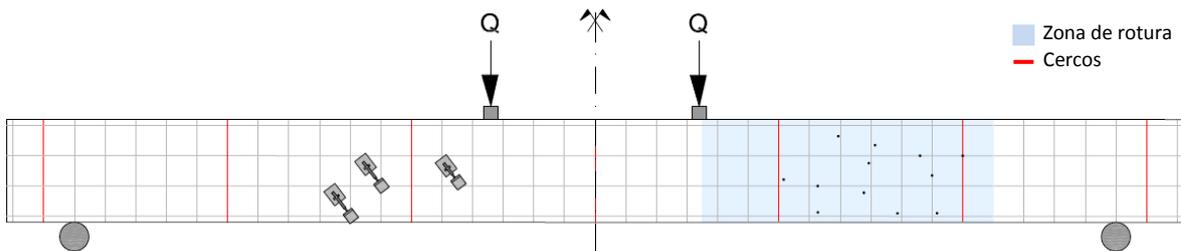


Figura 37. Zona rotura viga V.1.5



Imagen 125. Viga V.1.5 tras ensayo flexión a 4 puntos

- Fisura flexión
- Fisura cortante
- Rotura
- Desprendimiento de hormigón

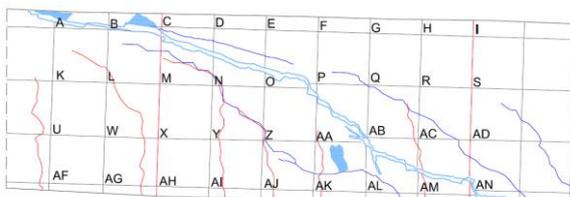


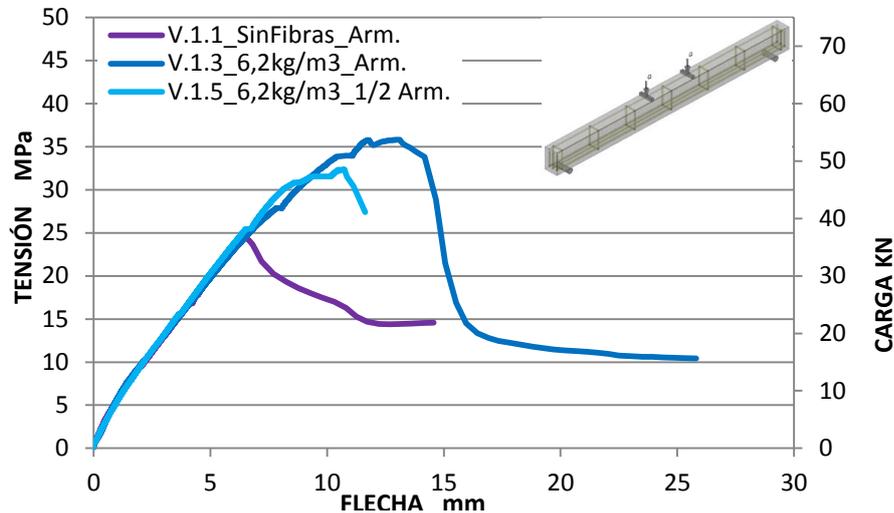
Figura 38. Rotura viga V.1.5



Imagen 126. Rotura viga V.1.5

5.3.2.4 Análisis de resultados de HAC reforzado con 6,2kg/m³ de fibras poliméricas en vigas

En el siguiente punto comparamos la deformación que sufren las vigas V.1.3 y V.1.5 realizadas con hormigón reforzado con 6,2 kg/m³ de fibras poliméricas con armado patrón y medio armado con la viga V.1.1 que está realizada con armado patrón y HAC.



Gráfica 100. Comparativa vigas V.1.1_V.1.3_V.1.5 Tensión-flecha

	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura		
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Descripción
V.1.1 (Sin Fibras)	25,24	4,22	Flexión	---	---	---	37,14	6,48	Rotura frágil instantánea por cortante
V.1.3 (6,2 kg/m ³)	41,82	8,04	Cortante	50,97	11,07	Flexión y Cortante	53,76	13,06	Rotura frágil progresiva por cortante
V.1.5 (6,2 kg/m ³)	38,24	6,7	Flexión	47,36	10,16	Flexión y Cortante	48,59	10,74	

Tabla 113 Resultados ensayo flexión a 4 puntos vigas V.1.1_V.1.3_V.1.5

Observamos que con la incorporación de fibras las fisuras en la matriz aparecen a mayores cargas. Tal y como refleja la tabla de datos la viga V.1.1 (patrón sin fibras) no sufre fisuras por cortante previas a la rotura, ya que en el preciso instante que aparecen la viga falla por dicho esfuerzo. Sin embargo con las vigas con contenido de fibras previamente a la rotura aparecen fisuras por cortante, controlando así la rotura por dicho esfuerzo debido al cosido de la matriz producido por estas.

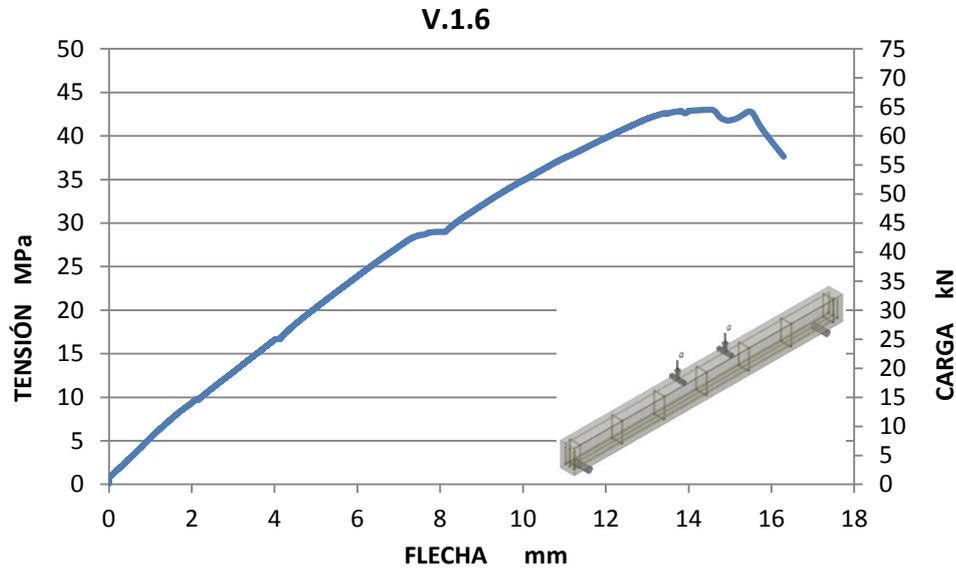
En cuanto a la carga máxima soportada, se observa que las fibras colaboran aumentando la resistencia de las mismas. Podemos observar que en la viga V.1.5 (1/2 Patrón+6,2 kg/m³) a pesar de reducir el armado de cortante, con la incorporación de fibras esta se puede someter a mayores esfuerzos que la V.1.1 (patrón sin fibras).

Por otra parte detectamos que la reducción del armado en la viga V.1.5 (1/2 patrón+6,2 kg/m³) no resulta muy significativa, en comparación con la viga V.1.3 (Patrón+6,2 kg/m³), ya que no existe gran diferencia de cargas soportadas por las mismas.

Las vigas con contenido de fibras soporta mayores flechas que la viga patrón V.1.1 (sin fibras). También observamos un ligero aumento de la flecha en la viga con armado patrón y 6,2kg/m³ de fibras con respecto a la de medio armado y 6,2 kg/m³ de fibras, pero no tan significativo como la diferencia apreciada con la viga patrón (sin fibras).

5.3.2.5 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.6

Los resultados obtenidos tras el ensayo a flexión realizado en la viga V.1.6 de hormigón autocompactante reforzado con 9 kg/m³ de fibras poliméricas y armado patrón fueron:

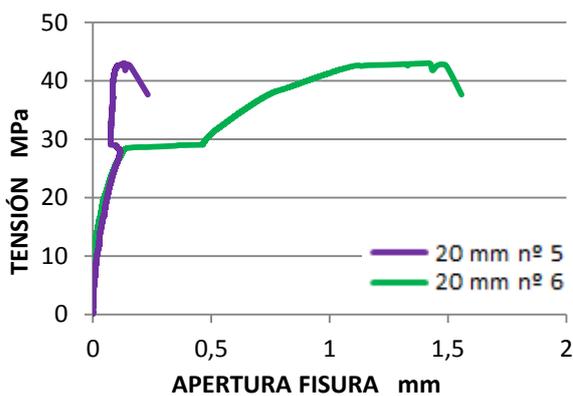


Gráfica 101. Tensión-flecha viga V.1.6

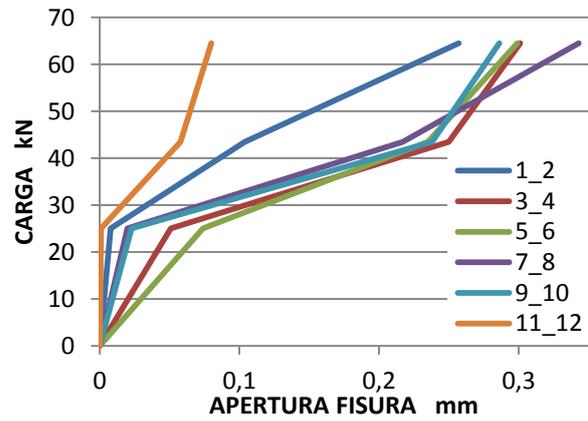
	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura			Descripción
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Tensión (MPa)	
V.1.6 (9 kg/m ³)	25,04	4,13	Flexión	43,5	8,12	Flexión y Cortante	64,6	14,47	42,8	Rotura frágil progresiva por cortante

Tabla 114 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.6

Resultados obtenidos de los captadores LVDT y DEMECS.



Gráfica 102 LVDT viga V.1.6



Gráfica 103 LVDT viga V.1.6

	V.1.6		
	1º (25,04 kN)	2º (43,5 kN)	Post rotura (64,53 kN)
nº 3	0,000	0,000	0,000
nº 5	0,031	0,396	1,407
nº 6	0,045	0,089	0,132

Tabla 115 Resultados LVDT viga V.1.6

	V.1.6		
	1º (25,04 kN)	2º (43,5 kN)	Post rotura (64,53 kN)
1-2	0,008	0,104	0,257
3-4	0,051	0,25	0,301
5-6	0,074	0,235	0,299
7-8	0,02	0,217	0,343
9-10	0,023	0,238	0,286
11-12	0,001	0,058	0,08

Tabla 116 Resultados DEMECS viga V.1.6

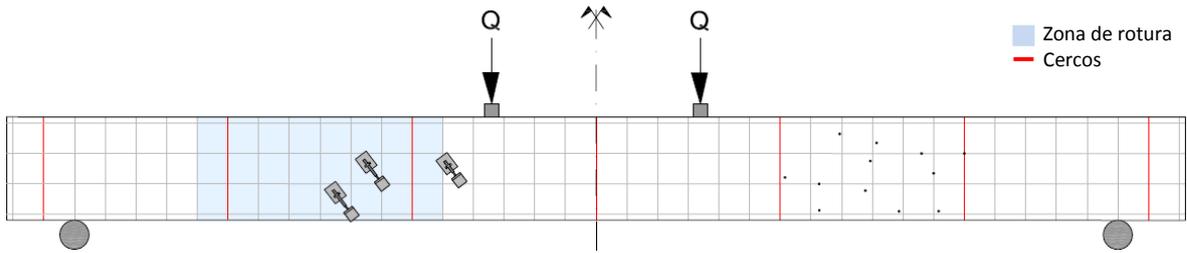


Figura 39. Zona rotura viga V.1.6



Imagen 127. Viga V.1.6 tras ensayo flexión a 4 puntos

- Fisura flexión
- Fisura cortante
- Rotura
- Desprendimiento de hormigón

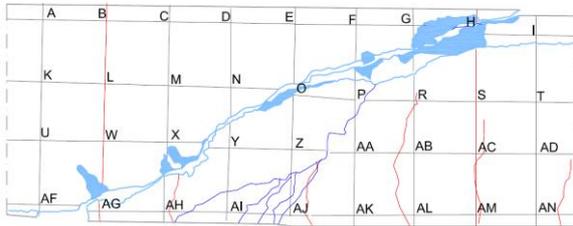


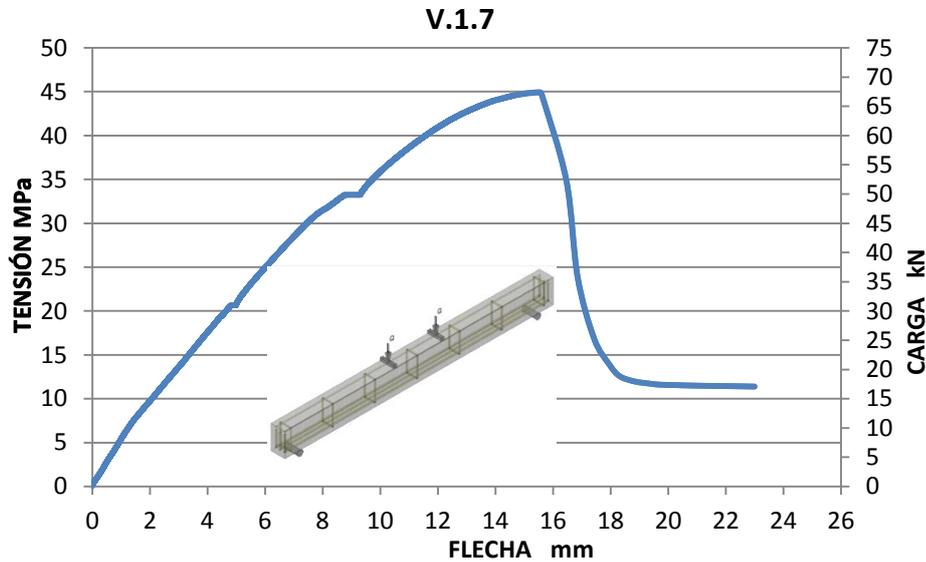
Figura 40. Rotura viga V.1.6



Imagen 128. Rotura viga V.1.6

5.3.2.6 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.7

Los resultados obtenidos tras el ensayo a flexión realizado en la viga V.1.7 de hormigón autocompactante reforzado con 9 kg/m³ de fibras poliméricas y armado medio patrón fueron:

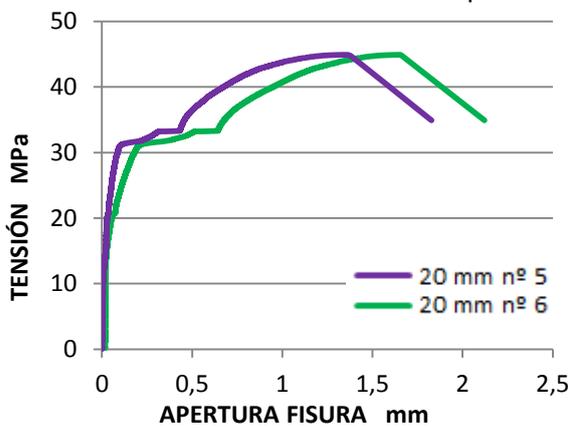


Gráfica 104. Tensión-flecha viga V.1.7

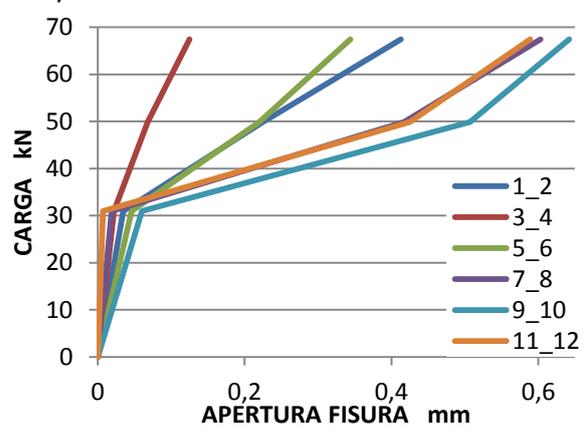
	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura			Descripción
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Tensión (MPa)	
V.1.7 (9 kg/m ³)	31	4,98	Flexión	49,88	9,29	Flexión y Cortante	67,41	15,55	44,9	Rotura frágil progresiva por cortante

Tabla 117 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.7

Resultados obtenidos de los captadores LVDT y DEMECS.



Gráfica 105 LVDT viga V.1.7



Gráfica 106 DEMECS viga V.1.7

	V.1.7		
	1º (31 kN)	2º (49,88 kN)	Post rotura (67,41 kN)
nº 3	0,000	0,000	0,000
nº 5	0,065	0,559	1,652
nº 6	0,033	0,355	1,361

Tabla 118 Resultados LVDT viga V.1.7

	V.1.7		
	1º (31 kN)	2º (49,88 kN)	Post rotura (67,41 kN)
1-2	0,035	0,225	0,413
3-4	0,022	0,068	0,125
5-6	0,046	0,22	0,344
7-8	0,019	0,417	0,603
9-10	0,06	0,507	0,642
11-12	0,007	0,425	0,589

Tabla 119 Resultados DEMECS viga V.1.7

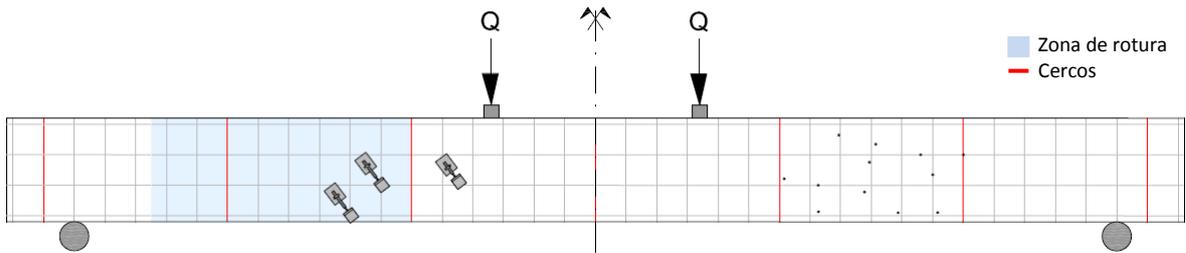


Figura 41. Zona rotura viga V.1.7

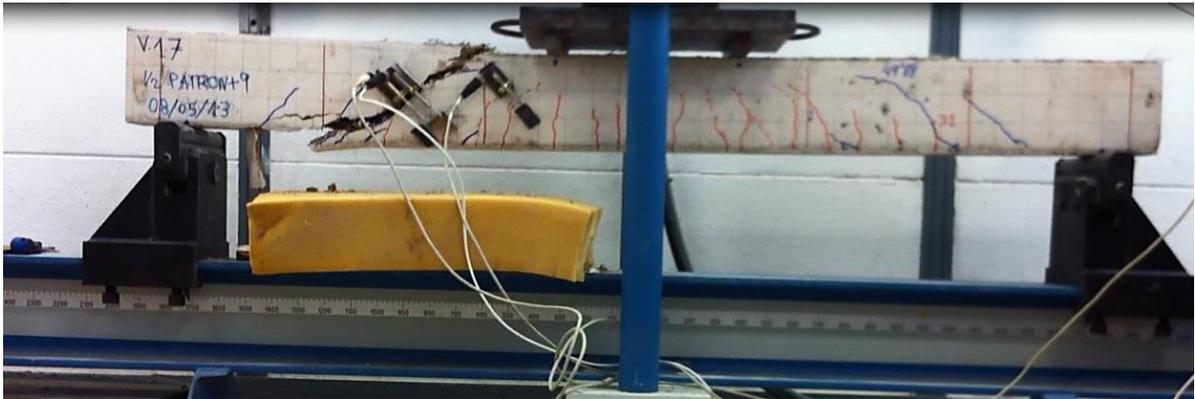


Imagen 129. Viga V.1.7 tras ensayo flexión a 4 puntos

- Fisura flexión
- Fisura cortante
- Rotura
- Desprendimiento de hormigón

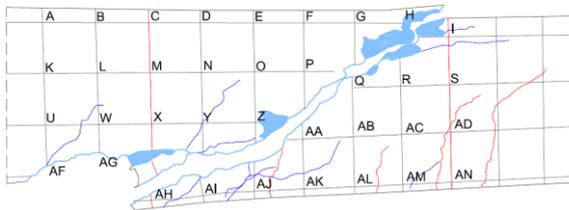


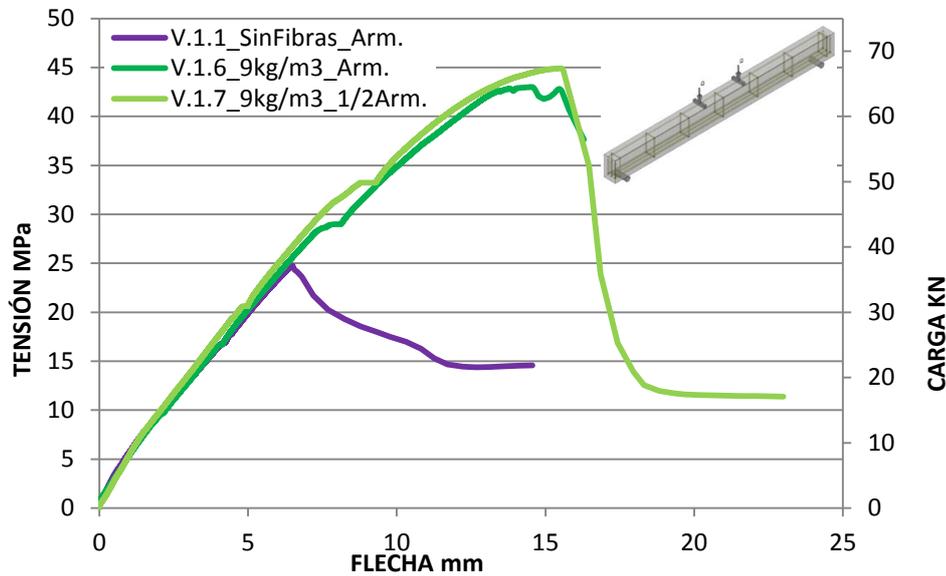
Figura 42. Rotura viga V.1.7



Imagen 130. Rotura viga V.1.7

5.3.2.7 Análisis de resultados de HAC reforzado con 9 kg/m³ de fibras poliméricas en vigas

En este punto comparamos la deformación que sufren las vigas V.1.6 y V.1.7 realizadas con hormigón reforzado con 9 kg/m³ de fibras poliméricas con armado patrón y medio armado con la viga V.1.1 que está realizada con armado patrón y HAC sin fibras.



Gráfica 107. Comparativa vigas V.1.1_V.1.6_V.1.7 Tensión-flecha

	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura		
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Descripción
V.1.1 (Sin Fibras)	25,24	4,22	Flexión	---	---	---	37,14	6,48	Rotura frágil instantánea por cortante
V.1.6 (9 kg/m ³)	25,04	4,13	Flexión	43,5	8,12	Flexión y Cortante	64,56	14,47	Rotura frágil progresiva por cortante
V.1.7 (9 kg/m ³)	31	4,98	Flexión	49,88	9,29	Flexión y Cortante	67,41	15,55	

Tabla 120 Resultados ensayo flexión a 4 puntos vigas V.1.1_V.1.6_V.1.7

Observamos que con la incorporación de fibras las fisuras en la matriz aparecen a mayores cargas. Tal y como refleja la tabla de datos la viga V.1.1 (patrón sin fibras) no sufre fisuras por cortante previas a la rotura, ya que en el preciso instante que aparecen la viga falla por dicho esfuerzo. Sin embargo con las vigas con contenido de fibras previamente a la rotura aparecen fisuras por cortante, controlando así la rotura por dicho esfuerzo debido al cosido de la matriz producido por estas.

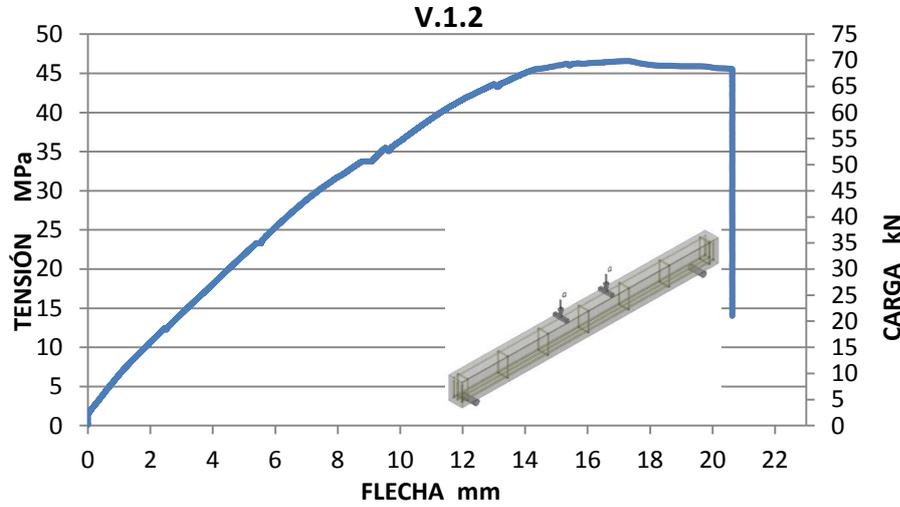
En cuanto a la carga máxima soportada, se observa que las fibras colaboran aumentando la resistencia de las mismas. Podemos observar que en la viga V.1.7 (1/2 patr9 kg/m³) a pesar de reducir el armado de cortante, con la incorporación de fibras esta se puede someter a mayores esfuerzos que la V.1.1 (patrón sin fibras).

Por otra parte detectamos que la reducción del armado en la viga V.1.7 (1/2patrón+9 kg/m³) resulta poco significativa, en comparación con la viga V.1.6 (patrón+9 kg/m³), ya que no existe apenas diferencia de cargas soportadas por las mismas.

Las vigas con contenido de fibras soportan mayores flechas que la viga patrón V.1.1 (patrón sin fibras). También observamos un mínimo aumento de la flecha en la viga V.1.6 (patrón+9kg/m³) con respecto a la V.1.7 (1/2 patrón+9kg/m³).

5.3.2.8 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.2

Los resultados obtenidos tras el ensayo a flexión realizado en la viga V.1.2 de hormigón autocompactante reforzado con 12,4 kg/m³ de fibras poliméricas y armado patrón fueron:



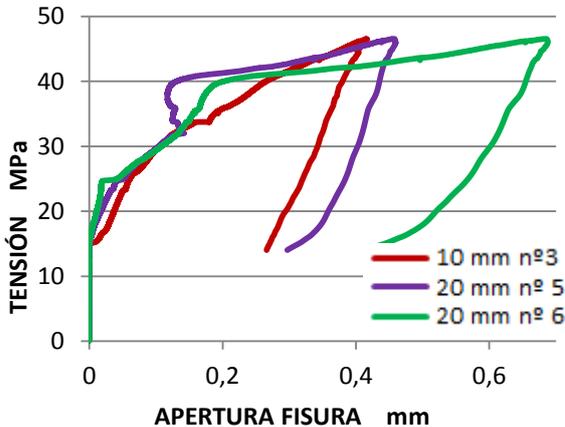
Gráfica 108. Tensión-flecha viga V.1.2

	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura			Descripción(*)
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Tensión (MPa)	
V.1.2 (12,4 kg/m ³)	34,95	5,48	Flexión	50,65	8,83	Flexión y Cortante	69,88	17,16	46,55	

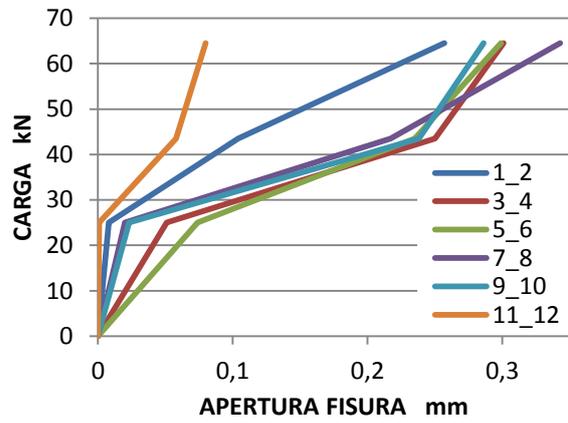
Descripción rotura(*) Agotamiento de la cabeza de compresión y pandeo lateral de la armadura superior por falta de estribo

Tabla 121 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.2

Resultados obtenidos de los captadores LVDT y DEMECS.



Gráfica 109 LVDT viga V.1.2



Gráfica 110 DEMECS viga V.1.2

	V.1.2		
	1º (34,95 kN)	2º (50,65 kN)	Post rotura (69,88 kN)
nº 3	0,054	0,179	0,416
nº 5	0,033	0,130	0,468
nº 6	0,018	0,147	0,686

Tabla 122 Resultados LVDT viga V.1.2

	V.1.2		
	1º (34,95 kN)	2º (50,65 kN)	Post rotura (69,88 kN)
1-2	0,054	0,151	0,267
3-4	0,021	0,38	0,423
5-6	0,069	0,181	0,379
7-8	0	0,339	0,41
9-10	0,041	0,487	0,566
11-12	0	0,427	0,514

Tabla 123 Resultados DEMECS viga V.1.2

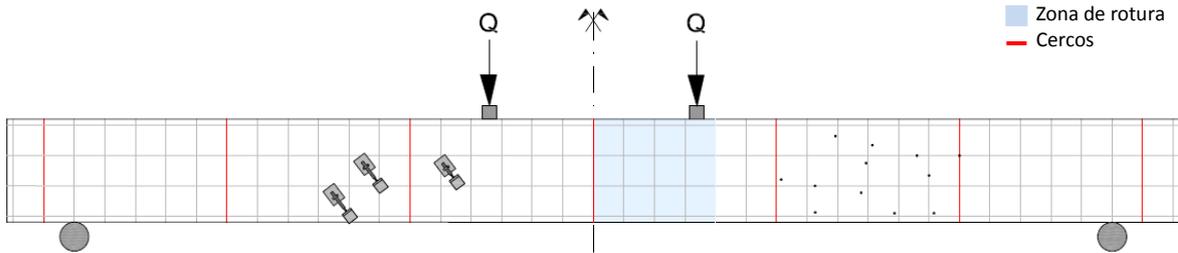


Figura 43. Zona rotura viga V.1.2



Imagen 131. Viga V.1.2 tras ensayo flexión a 4 puntos



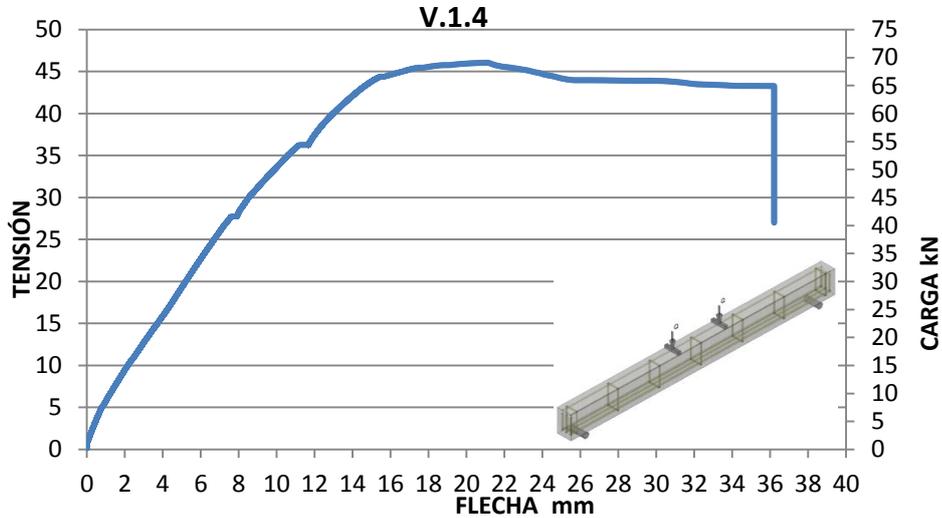
Figura 44. Rotura viga V.1.2



Imagen 132. Rotura viga V.1.2

5.3.2.9 Resultados de los ensayos realizados en la viga V.1.4

Los resultados obtenidos tras el ensayo a flexión realizado en la viga V.1.4 de hormigón autocompactante reforzado con 12,4 kg/m³ de fibras poliméricas y armado medio patrón fueron:



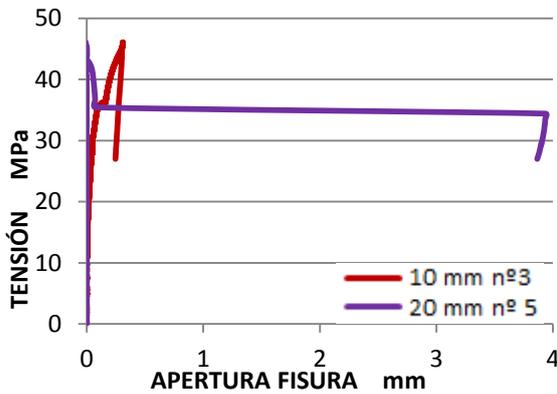
Gráfica 111. Tensión-flecha viga V.1.4

	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura			
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Tensión (MPa)	Descripción(*)
V.1.4 (12,4 kg/m ³)	41,67	7,85	Flexión	54,42	11,68	Flexión y Cortante	69,11	20,86	46,56	

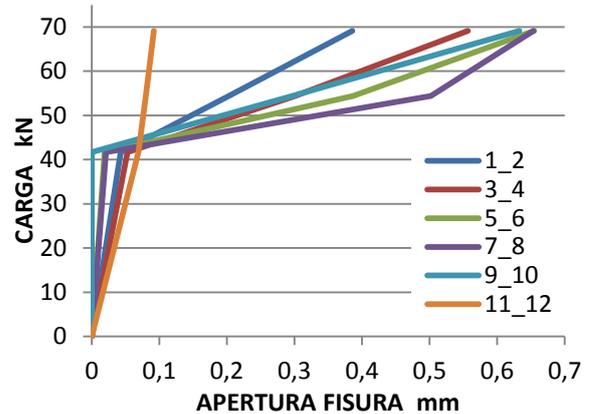
Descripción rotura(*) Agotamiento de la cabeza de compresión y pandeo lateral de la armadura superior por falta de estribo

Tabla 124 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.4

Resultados obtenidos de los captadores LVDT y DEMECS.



Gráfica 112 LVDT viga V.1.4



Gráfica 113 DEMECS viga V.1.4

	V.1.4		
	1º (41,67 kN)	2º (54,42 kN)	Post rotura (69,11 kN)
nº 3	0,046	0,162	0,308
nº 5	0,079	0,257	0,702
nº 6	0,000	0,00	0,000

Tabla 125 Resultados LVDT viga V.1.4

	V.1.4		
	1º (41,67 kN)	2º (54,42 kN)	Post rotura (69,11 kN)
1-2	0,043	0,203	0,386
3-4	0,053	0,301	0,557
5-6	0,019	0,387	0,655
7-8	0,021	0,502	0,654
9-10	0	0,297	0,633
11-12	0,069	0,08	0,092

Tabla 126 Resultados DEMECS viga V.1.4

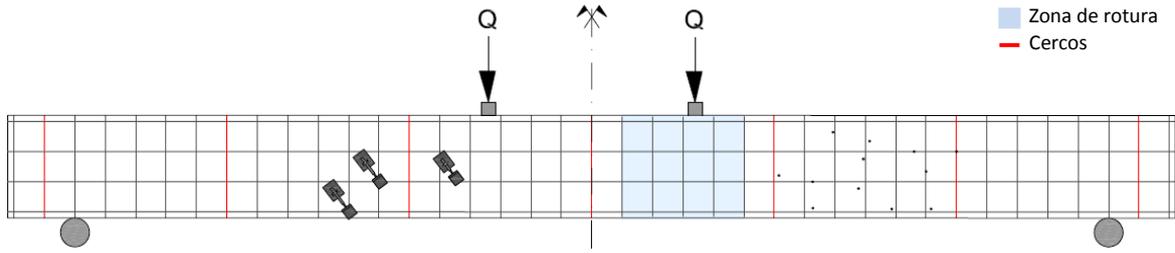


Figura 45. Zona rotura viga V.1.4



- Fisura flexión
- Fisura cortante
- Rotura
- Desprendimiento de hormigón

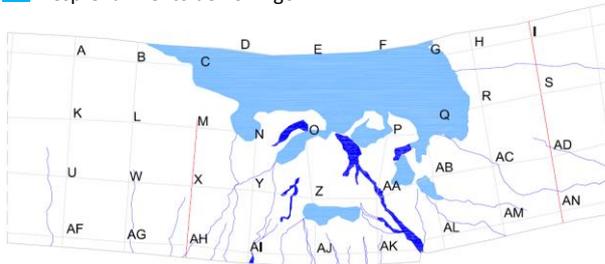
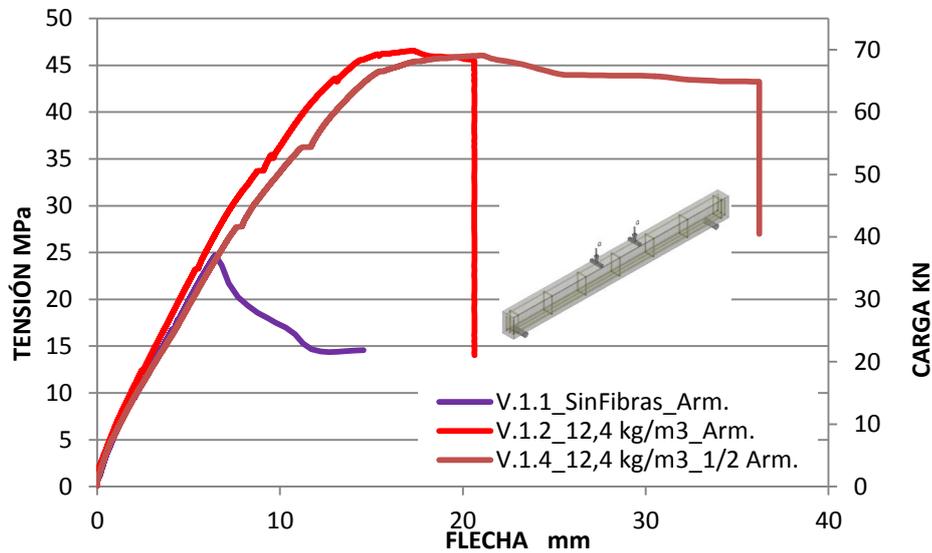


Figura 46. Rotura viga V.1.4



5.3.2.10 Análisis de resultados de HAC reforzado con 12,4kg/m³ de fibras poliméricas en vigas

En el siguiente punto comparamos la deformación que sufren las vigas V.1.2 y V.1.4 realizadas con hormigón reforzado con 12,4 kg/m³ de fibras poliméricas con armado patrón y medio armado con la viga V.1.1 que está realizada con armado patrón y HAC sin fibras.



Gráfica 114. Comparativa vigas V.1.1_V.1.2_V.1.4 Tensión-flecha

	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura		
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Descripción
V.1.1 (Sin Fibras)	25,24	4,22	Flexión	---	---	---	37,14	6,48	Rotura frágil instantánea por cortante
V.1.2 (12,4 kg/m ³)	34,95	5,48	Flexión	50,65	8,83	Flexión y Cortante	69,88	17,16	Agotamiento de la cabeza de compresión y pandeo lateral de la armadura superior por falta de estribo
V.1.4 (12,4 kg/m ³)	41,67	7,85	Flexión	54,42	11,68	Flexión y Cortante	69,11	20,86	

Tabla 127 Resultados ensayo flexión a 4 puntos vigas V.1.1_V.1.2_V.1.4

Observamos que con la incorporación de fibras las fisuras en la matriz aparecen a mayores cargas. Tal y como refleja la tabla de datos la viga V.1.1 (patrón sin fibras) no sufre fisuras por cortante previas a la rotura, ya que en el preciso instante que aparecen la viga falla por dicho esfuerzo. Sin embargo en las vigas con contenido 12,4 kg/m³ de fibras la viga no falla por cortante sino que se produce un fallo por agotamiento de la cabeza de compresión y pandeo de la armadura longitudinal superior por falta de estribo, debido al cosido que realiza tal cantidad de fibras.

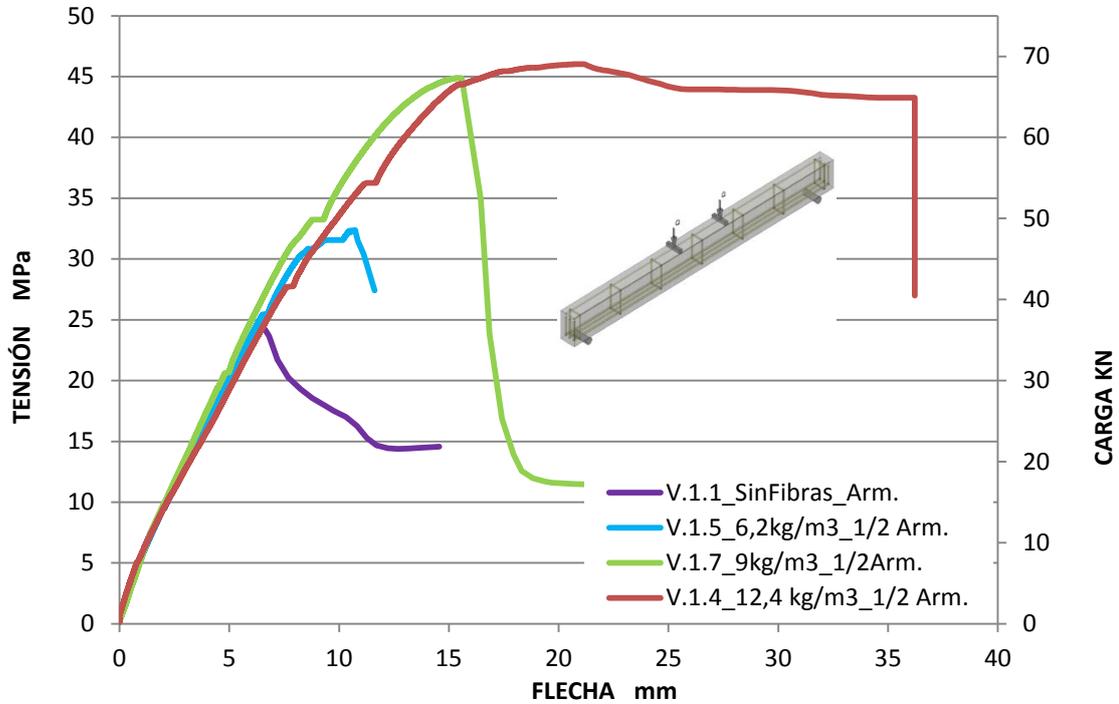
En cuanto a la carga máxima soportada, se observa que las fibras colaboran aumentando la resistencia de las mismas. Podemos observar que en la viga V.1.4 (patrón+12,4 kg/m³) a pesar de reducir el armado de cortante, con la incorporación de fibras esta se puede someter a mayores esfuerzos que la V.1.1 (patrón sin fibras).

Por otra parte detectamos que la reducción del armado en la viga V.1.4 (patrón+12,4 kg/m³) resulta poco significativa, en comparación con la viga V.1.2 (1/2patrón+12,4 kg/m³), ya que no existe apenas diferencia de cargas soportadas por las mismas.

Las vigas con contenido de fibras soportan mayores flechas que la viga patrón V.1.1 (patrón sin fibras). También observamos un notable aumento de la flecha en la viga V.1.4 (1/2patrón+12,4kg/m³) con respecto a la V.1.2 (patrón+12,4kg/m³).

5.3.2.11 Análisis de resultados de HAC reforzado con distintas cantidades de fibras poliméricas y variación de armado en vigas

En la siguiente gráfica y tabla de resultados comparamos las vigas con 1/2 patrón y distintas cantidades de fibras poliméricas con la viga patrón V.1.1 (sin fibras).



Gráfica 115. Comparativa vigas V.1.1_V.1.5_V.1.7_V.1.4 Tensión-flecha

	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura		
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Descripción
V.1.1 (Sin Fibras)	25,24	4,22	Flexión	---	---	---	37,14	6,48	Rotura frágil instantánea por cortante
V.1.5 (6,2 kg/m³)	38,24	6,7	Flexión	47,36	10,16	Flexión y Cortante	48,59	10,74	Rotura frágil progresiva por cortante
V.1.7 (9 kg/m³)	31	4,98	Flexión	49,88	9,29	Flexión y Cortante	67,41	15,55	
V.1.4 (12,4kg/m³)	41,67	7,85	Flexión	54,42	11,68	Flexión y Cortante	69,11	20,86	Agotamiento de la cabeza de compresión y pandeo lateral de la armadura superior por falta de estribo

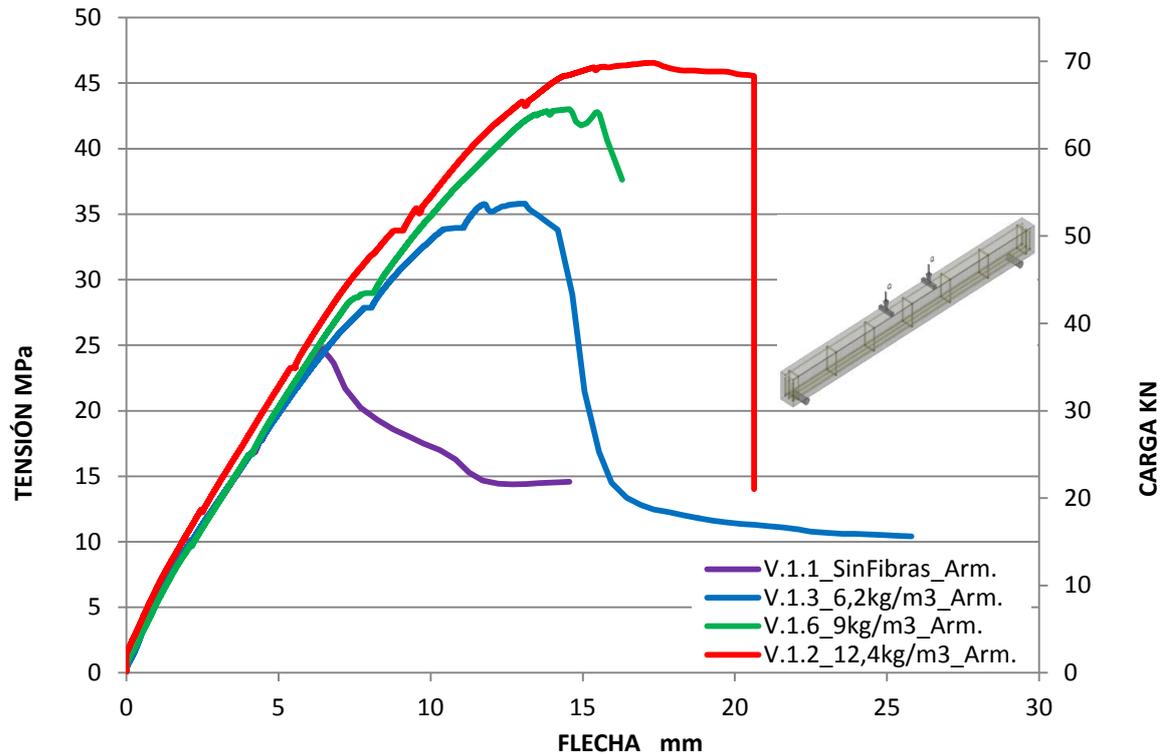
Tabla 128 Resultados ensayo flexión a 4 puntos vigas V.1.1_V.1.5_V.1.7_V.1.4

Tal como muestran los datos observamos que con la incorporación de fibras la aparición de fisuras en las vigas se produce más tarde. La viga V.1.1 patrón sin fibras no muestra fisuras por cortante previas al fallo por dicho esfuerzo, una vez que se producen rompe de forma frágil e instantánea. Sin embargo a medida que la cantidad de fibras es mayor observamos que la rotura por cortante es más controlada hasta el punto de que con la cantidad de 12,4 kg/m³ ya no se produce un fallo por cortante sino por agotamiento de la cabeza de compresión y pandeo lateral de la armadura longitudinal superior por falta de estribo, debido al cosido producido por las fibras.

En cuanto a la carga máxima soportada, se observa que las fibras colaboran aumentando la resistencia de las vigas en relación con la cantidad de fibras.

Observamos que guarda relación la cantidad de fibras con el aumento de la flecha, siendo mayor la flecha en las vigas con mayores contenidos de fibras.

A continuación comparamos vigas con armado patrón y con distintas cantidades de fibras con la viga patrón V.1.1 (patrón sin fibras)



Gráfica 116. Comparativa vigas V.1.1_V.1.3_V.1.6_V.1.2 Tensión-flecha

	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura		
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Descripción
V.1.1 (Sin Fibras)	25,24	4,22	Flexión	---	---	---	37,14	6,48	Rotura frágil instantánea por cortante
V.1.3 (6,2 kg/m ³)	41,82	8,04	Cortante	50,97	11,07	Flexión y Cortante	53,76	13,06	Rotura frágil progresiva por cortante
V.1.6 (9 kg/m ³)	25,04	4,13	Flexión	43,5	8,12	Flexión y Cortante	64,56	14,47	Rotura frágil progresiva por cortante
V.1.2 (12,4kg/m ³)	34,95	5,48	Flexión	50,65	8,83	Flexión y Cortante	69,88	17,16	Agotamiento de la cabeza de compresión y pandeo lateral de la armadura superior por falta de estribo

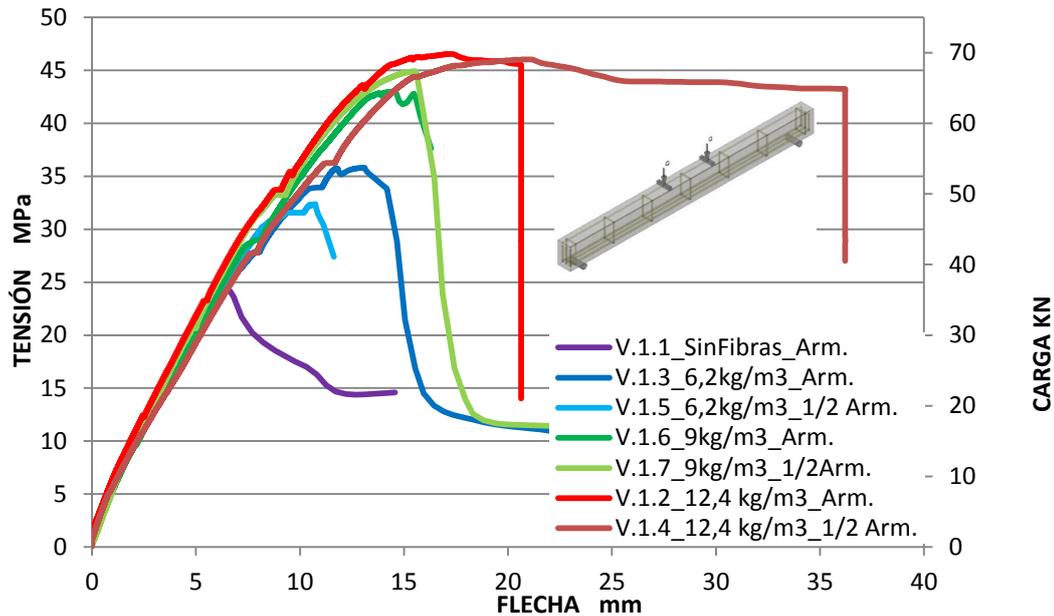
Tabla 129 Resultados ensayo flexión a 4 puntos vigas V.1.1_V.1.3_V.1.6_V.1.2

Tal y como se describe con anterioridad la incorporación de fibras provoca que la aparición de fisuras se produzca más tarde y que en el caso de la viga V.1.1 (sin fibras) no aparezcan fisuras por cortante, solo por flexión, ya que en el mismo instante que aparecen rompe por dicho esfuerzo de una manera muy frágil e instantánea.

Además observamos que a medida que la cantidad de fibras es mayor la rotura por cortante es más controlada. A pesar de estar diseñado el armado de las vigas para que se produzca un fallo por cortante con la cantidad de 12,4 kg/m³ se produce un fallo por agotamiento de la cabeza de compresión y pandeo lateral de la armadura longitudinal superior por falta de estribo, debido al cosido producido por las fibras.

La carga máxima soportada se ve incrementada con el aumento de la cantidad de fibras del mismo modo que la flecha. Siendo la mínima flecha para la viga patrón sin fibras y la máxima para la viga V.1.2 (patrón+12,4 kg/m³).

En la siguiente gráfica y tabla de resultados comparamos las vigas con 1/2 patrón y distintas cantidades de fibras poliméricas con la viga patrón V.1.1 (sin fibras).



Gráfica 117. Comparativa vigas V.1.1_V.1.3_V.1.5_V.1.6_V.1.7_V.1.2_V.1.4 Tensión-flecha

	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura		Descripción
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	
V.1.1 (Sin Fibras)	25,24	4,22	Flexión	---	---	---	37,14	6,48	Rotura frágil instantánea por cortante
V.1.3 (6,2 kg/m ³)	41,82	8,04	Cortante	50,97	11,07	Flexión y Cortante	53,76	13,06	Rotura frágil progresiva por cortante
V.1.5 (6,2 kg/m ³)	38,24	6,7	Flexión	47,36	10,16	Flexión y Cortante	48,59	10,74	
V.1.6 (9 kg/m ³)	25,04	4,13	Flexión	43,5	8,12	Flexión y Cortante	64,56	14,47	
V.1.7 (9 kg/m ³)	31	4,98	Flexión	49,88	9,29	Flexión y Cortante	67,41	15,55	
V.1.2 (12,4kg/m ³)	34,95	5,48	Flexión	50,65	8,83	Flexión y Cortante	69,88	17,16	Agotamiento de la cabeza de compresión y pandeo lateral de la armadura superior por falta de estribo
V.1.4 (12,4kg/m ³)	41,67	7,85	Flexión	54,42	11,68	Flexión y Cortante	69,11	20,86	

Tabla 130 Resultados ensayo flexión a 4 puntos vigas V.1.1_V.1.3_V.1.5_V.1.6_V.1.7_V.1.2_V.1.4

Tal como muestran los datos observamos que con la incorporación de fibras la aparición de fisuras en las vigas se produce más tarde. La viga V.1.1 patrón sin fibras no muestra fisuras por cortante previas al fallo por dicho esfuerzo, una vez que se producen rompe de forma frágil e instantánea. Sin embargo a medida que la cantidad de fibras es mayor observamos que la rotura por cortante es más controlada hasta el punto de que con la cantidad de 12,4 kg/m³ ya no se produce un fallo por cortante sino por agotamiento de la cabeza de compresión y pandeo lateral de la armadura longitudinal superior por falta de estribo, debido al cosido producido por las fibras, a pesar de tener el armado diseñado para fallar a cortante.

Observamos que la carga máxima y la flecha van incrementando a medida que se incorporan siendo mayores para mayores cantidades de fibras.

En cuanto al armado patrón y el medio armado patrón no se reflejan variaciones significativas pudiendo ser como consecuencia de que la reducción de armado no haya sido suficiente, duplicando así los ensayos y ratificando los resultados de los mismos.

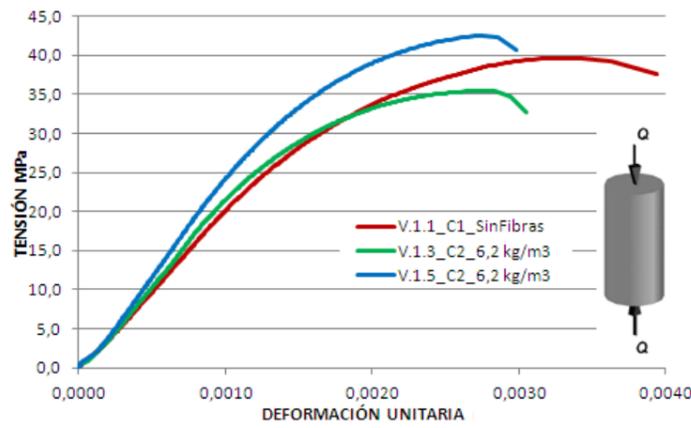


5.4. Resumen de análisis y resultados

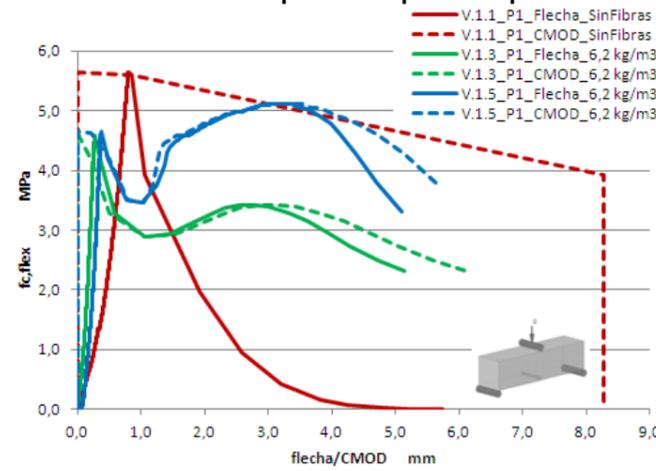
PATRÓN +6,2Kg/m³

Caracterización del material

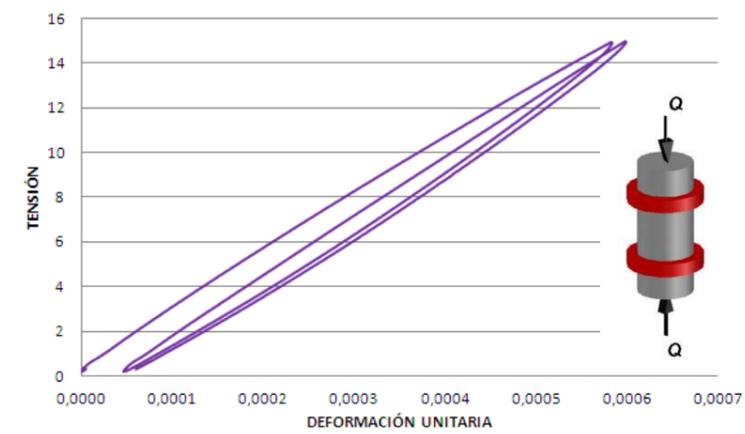
Gráfica de compresión en probetas cilíndricas



Gráfica de flexión a tres puntos en probetas prismáticas



Gráfica Módulo de deformación. Probetas cilíndricas



Dosificación

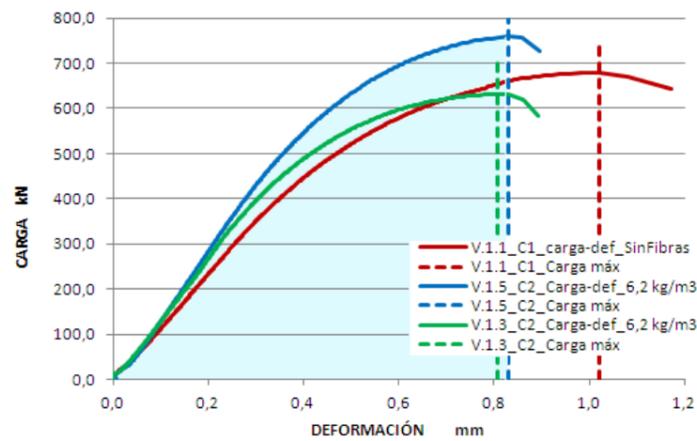
Material	Kg/m3
Cem	325
Agua	195
Finos	18,5
Arena 0/2	517
Arena 0/4	757
Grava	553,9
Volumen	2366
Aditivo 1,3% Sika Viscocrete 3425	4,225
A/C = 0,6	

Capacidades mecánicas (MPa) del HAC a 28 días con fibras poliméricas

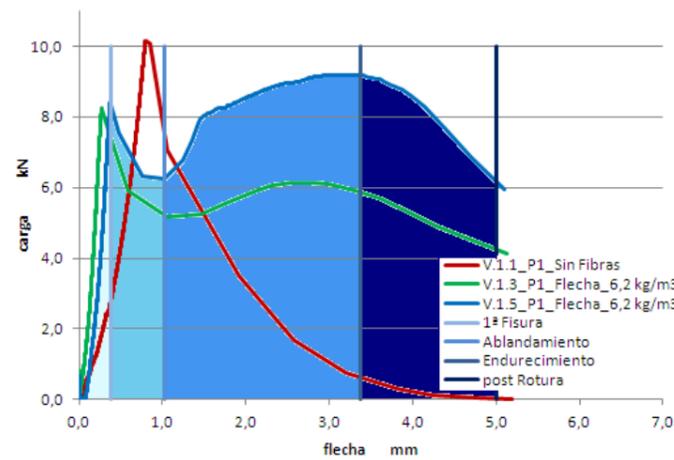
	fc cilíndrica	fc cubica	E _c	fc,flex	fc,flex Matriz	fl,CMOD 0,05	fc,flex F1 CMOD 0,5	fc,flex F2 CMOD 1,5	fc,flex F3 CMOD 2,5	fc,flex F4 CMOD 3,5	E _{FLEX}
V.1.1 (Sin fibras)	38,38	42,74	30053	5,64	5,64	5,64	5,61	-	-	-	20693
V.1.3 (6,2 kg/m ³)	35,49	38,83	27914	4,58	4,14	4,57	3,28	2,92	3,37	3,39	42323
V.1.5 (6,2 kg/m ³)	42,92	45,30	30150	5,11	4,15	4,63	3,51	4,56	4,97	5,11	36559,89

Amasada	Probetas de compresión	Módulo de def.(MPa)
V.1.1	C1_Sin Fibras	29029,10
V.1.3	C2_6,2 kg/m ³	27082,54
V.1.5	C2_6, kg/m ³	27790,82

Gráfica de Tenacidad bajo curva de compresión



Gráfica de Tenacidad bajo curva de flexión



Tenacidad compresión

Amasada	V.1.1	V.1.3	V.1.5
Probetas cúbicas	Sin Fibras (c1)	HRF_12,4 (c2)	HRF_12,4 (c2)
Total	507262,19	355775,784	426706

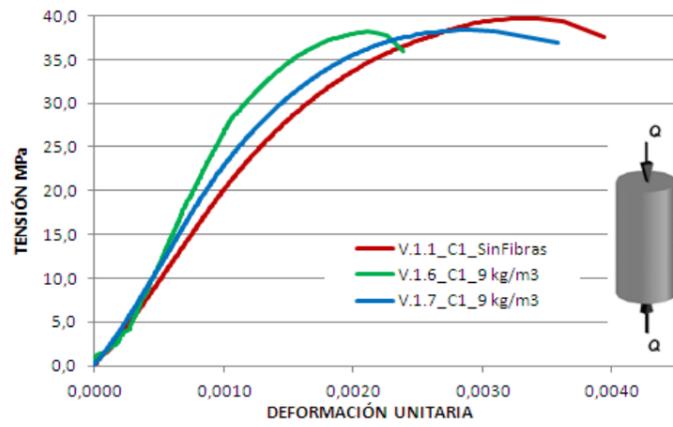
Energía absorbida a flexión (N-mm)

Amasada	V.1.1	V.1.3	V.1.5
Probetas prismáticas	Sin Fibras (p1)	HRF_12,4 (p1)	HRF_12,4 (p1)
1ª Fisura	5215,44	3114,218	3417,938
Ablandamiento	-	6963,189	5741,567
Endurecimiento	-	9082,297	18762,55
Post Rotura	9941,18	13270,48	16658,77
Tenacidad	15156,62	32430,184	44580,83

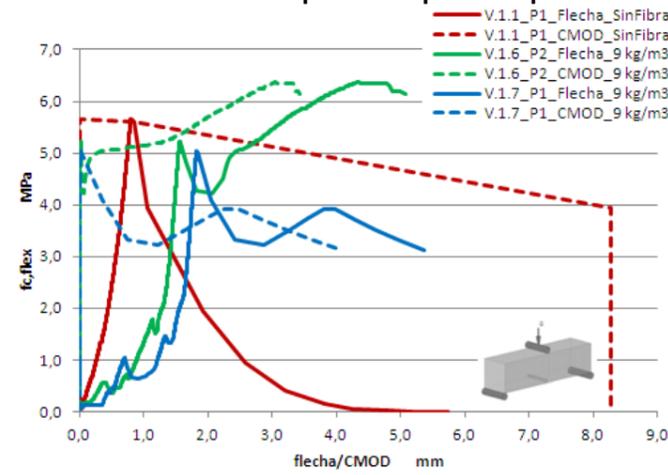
Caracterización del material

PATRÓN +9Kg/m³

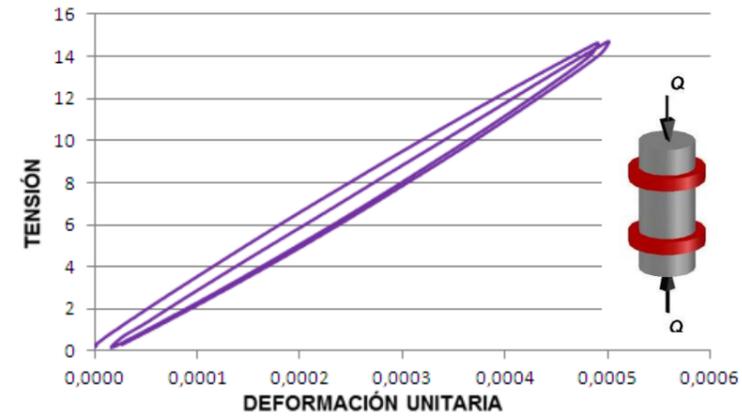
Gráfica de compresión en probetas cilíndricas



Gráfica de flexión a tres puntos en probetas prismáticas



Gráfica Módulo de deformación. Probetas cilíndricas



Dosificación

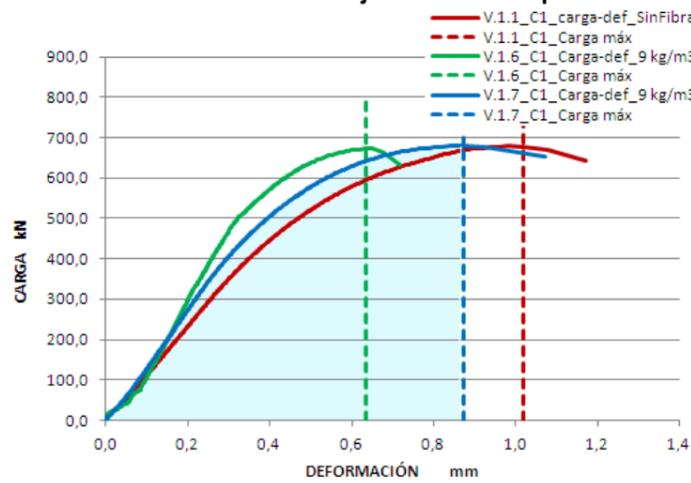
Material	Kg/m3
Cem	325
Agua	195
Finos	18,5
Arena 0/2	517
Arena 0/4	757
Grava	553,9
Volumen	2366
Aditivo 1,3% Sika Viscocrete 3425	4,225
A/C = 0,6	

Capacidades mecánicas (MPa) del HAC a 28 días con fibras poliméricas

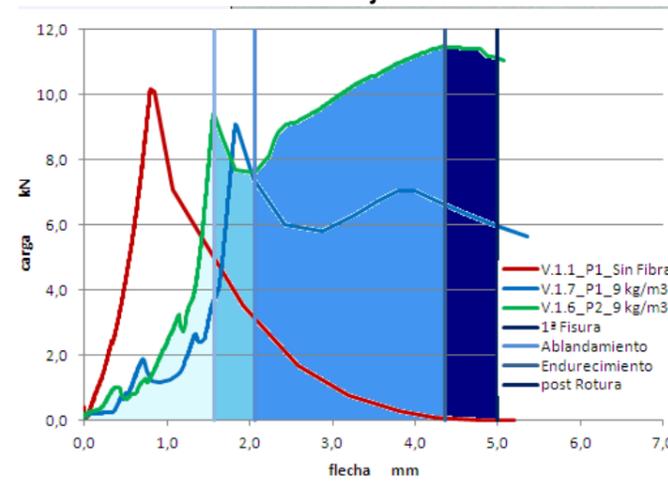
	fc cilíndrica	fc cubica	E _c	fc,flex	fc,flex Matriz	f _i ,CMOD 0,05	fc,flex F1 CMOD 0,5	fc,flex F2 CMOD 1,5	fc,flex F3 CMOD 2,5	fc,flex F4 CMOD 3,5	E _{FLEX}
V.1.1 (Sin Fibras)	38,38	42,74	30053	5,64	5,64	5,64	5,61	-	-	-	20693
V.1.6 (9 kg/m ³)	38,04	40,49	29817	6,37	4,51	3,27	1,82	1,07	0,74	0,54	24490,86
V.1.7 (9 kg/m ³)	38,43	42,24	29606	5,05	3,37	5,02	4,11	3,49	3,91	3,33	25627

Amasada	Probetas de compresión	Módulo de def.(MPa)
V.1.1	C1_Sin Fibras	29029,10
V.1.6	C1_9 kg/m ³	29336,88
V.1.7	C1_9 kg/m ³	28208,93

Gráfica de Tenacidad bajo curva de compresión



Gráfica de Tenacidad bajo curva de flexión



Tenacidad compresión (N-mm)

Amasada	V.1.1	V.1.6	V.1.7
Probetas cúbicas	Sin Fibras (c1)	HRF_12,4 (c1)	HRF_12,4 (c1)
Total	507262,19	276714,5	438770,1

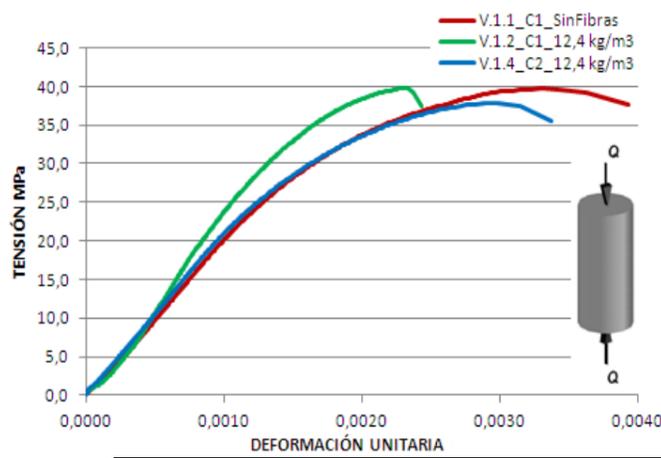
Energía absorbida a flexión (N-mm)

Amasada	V.1.1	V.1.6	V.1.7
Probetas prismáticas	Sin Fibras (p1)	HRF_12,4 (p2)	HRF_12,4 (p1)
1ª Fisura	5215,44	5898,655	5421,753
Ablandamiento	-	5290,561	9223,195
Endurecimiento	-	21804,32	7072,043
Post Rotura	9941,18	8715,254	8939,046
Tenacidad	15156,62	41708,79	30656,04

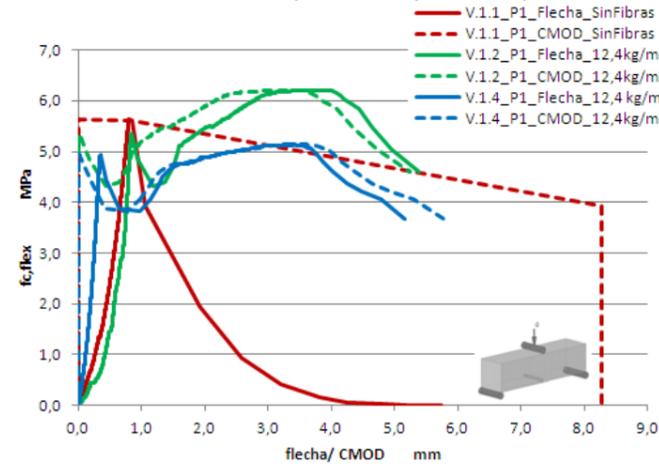
PATRÓN +12,4Kg/m³

Caracterización del material

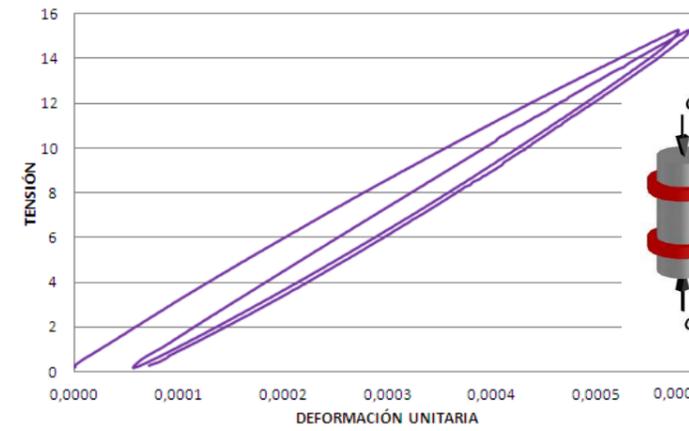
Gráfica de compresión en probetas cilíndricas



Gráfica de flexión a tres puntos en probetas prismáticas



Gráfica Módulo de deformación. Probetas cilíndricas



Dosificación

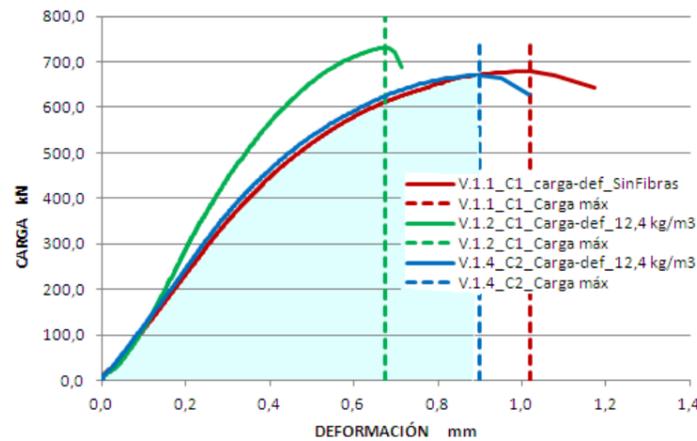
Material	Kg/m3
Cem	325
Agua	195
Finos	18,5
Arena 0/2	517
Arena 0/4	757
Grava	553,9
Volumen	2366
Aditivo 1,3% Sika Viscocrete 3425	4,225
A/C = 0,6	

Capacidades mecánicas (MPa) del HAC a 28 días con fibras poliméricas

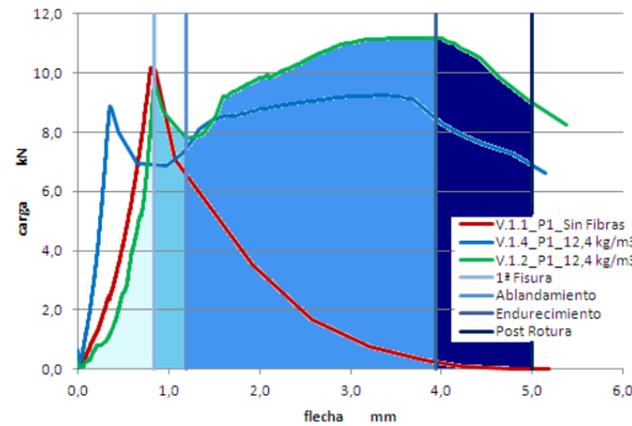
	fc cilíndrica	fc cubica	E _c	fc,flex	fc,flex Matriz	f _l ,CMOD 0,05	fc,flex F1 CMOD 0,5	fc,flex F2 CMOD 1,5	fc,flex F3 CMOD 2,5	fc,flex F4 CMOD 3,5	E _{FLEX}
V.1.1 (Sin Fibras)	38,38	42,74	30053	5,64	5,64	5,64	5,61	-	-	-	20693
V.1.2 (12,4 kg/m ³)	41,36	43,04	32326	6,21	3,9	5,32	4,32	5,52	6,14	6,21	26659
V.1.4 (12,4 kg/m ³)	37,94	43,97	28406	5,15	4,08	4,91	3,87	4,74	5,01	5,15	35298,8

Amasada	Probetas de compresión	Módulo de def.(MPa)
V.1.1	C1_Sin Fibras	29029,10
V.1.2	C1_12,4 kg/m ³	31038,94
V.1.4	C2_12,4 kg/m ³	26388,05

Gráfica de Tenacidad bajo curva de compresión



Gráfica de Tenacidad bajo curva de flexión



Tenacidad compresión (N-mm)

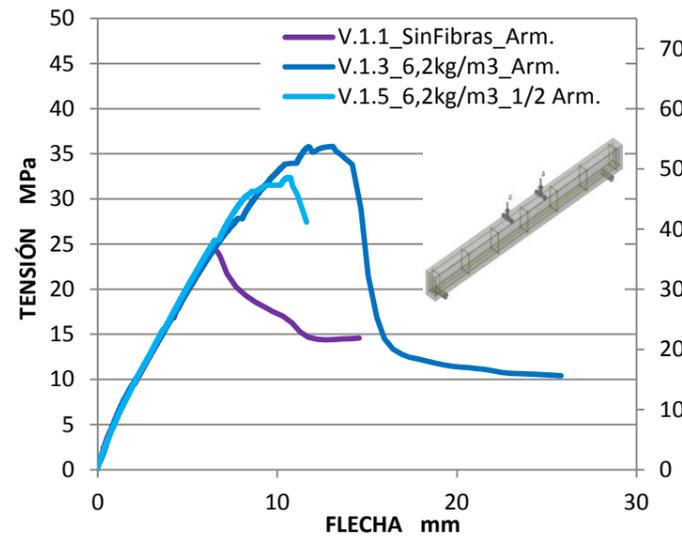
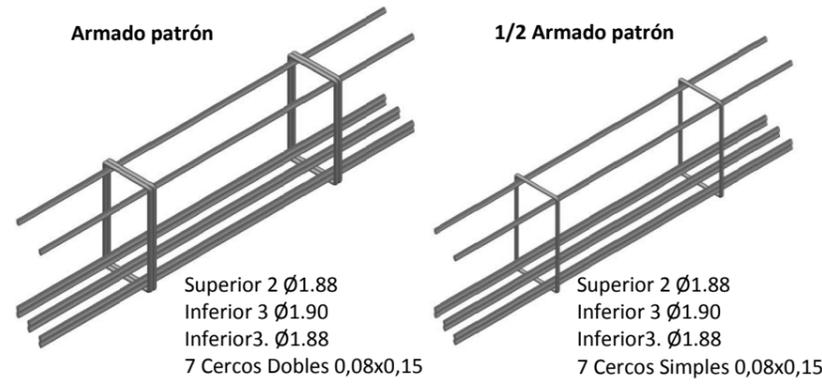
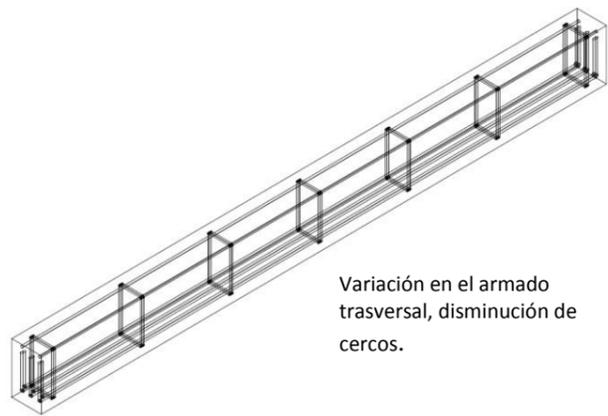
Amasada	V.1.1	V.1.2	V.1.4
Probetas cúbicas	Sin Fibras (c1)	HRF_12,4 (c1)	HRF_12,4 (c2)
Total	507262,19	303819,7	429936,546

Energía absorbida a flexión (N-mm)

Amasada	V.1.1	V.1.2	V.1.4
Probetas prismáticas	Sin Fibras (f1)	HRF_12,4 (f1)	HRF_12,4 (f1)
1ª Fisura	5215,44	4507,48	3993,897
Ablandamiento	-	4488,691	5740,413
Endurecimiento	-	26679,95	20002,44
Post Rotura	9941,18	17564,54	16594,47
Tenacidad	15156,62	53240,66	46331,22

Vigas: V.1.1+V.1.3+V.1.5

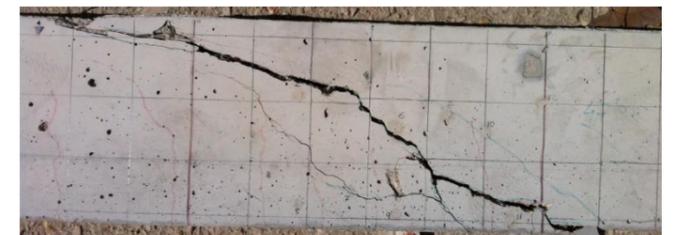
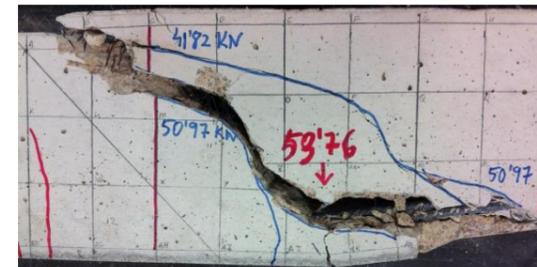
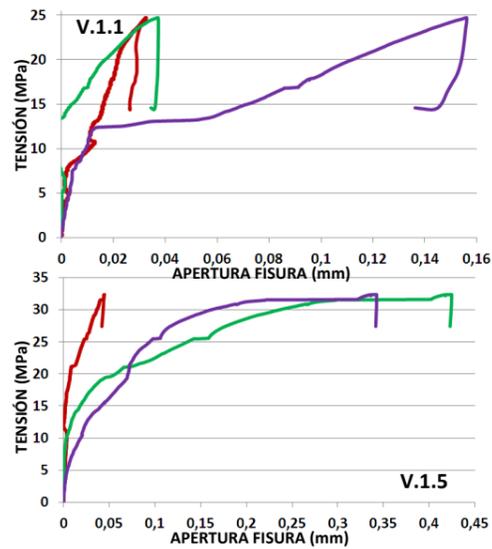
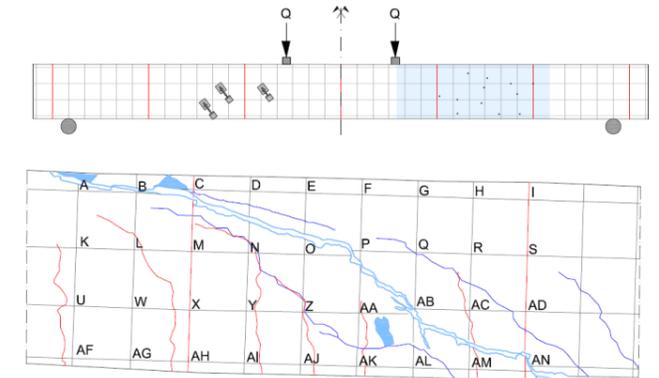
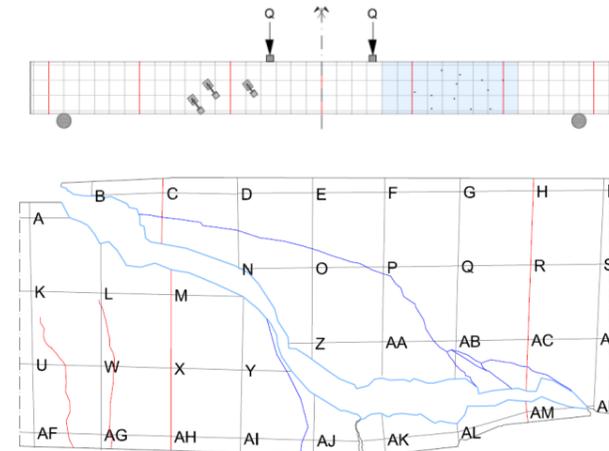
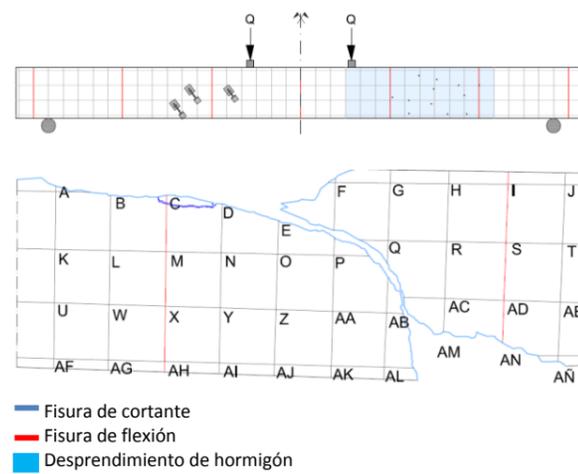
PATRÓN+6,2Kg/m³



V.1.1 Armado patrón sin fibras

V.1.3 Armado patrón +6,2 Kg/m³

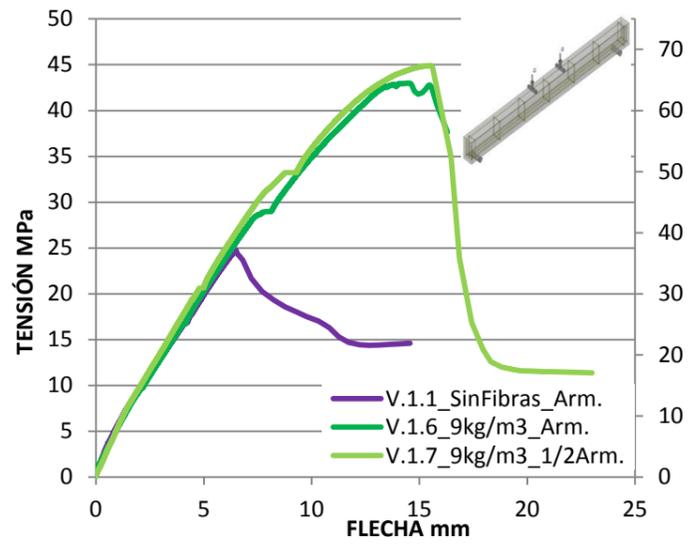
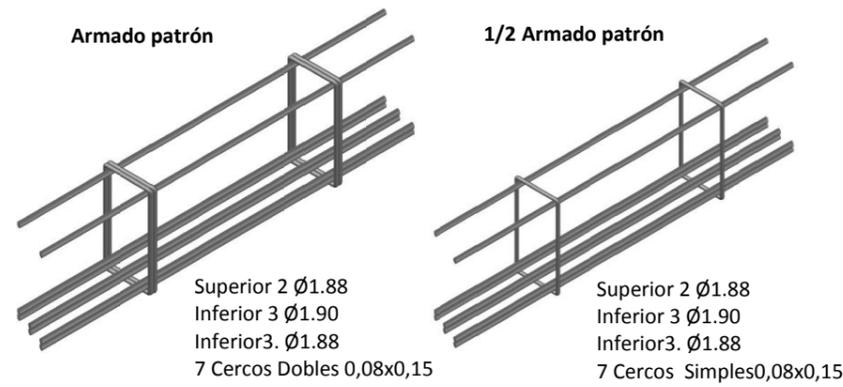
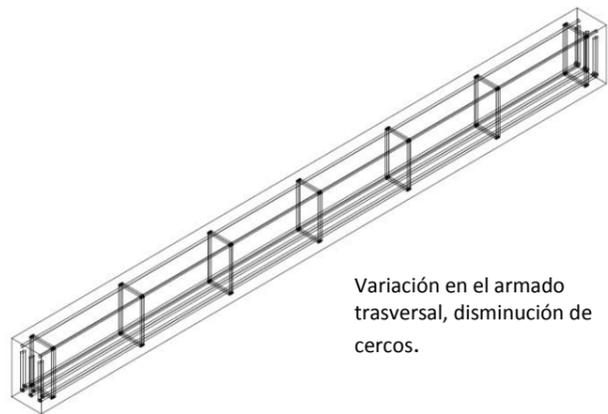
V.1.5 1/2 Armado patrón +6,2 kg/m³



	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura		
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Descripción
V.1.1 (Sin Fibras)	25,24	4,22	Flexión	---	---	---	37,14	6,48	Rotura frágil instantánea por cortante
V.1.3 (6,2 kg/m ³)	41,82	8,04	Cortante	50,97	11,07	Flexión+Cortante	53,76	13,06	Rotura frágil progresiva por cortante
V.1.5 (6,2 kg/m ³)	38,24	6,7	Flexión	47,36	10,16	Flexión+Cortante	48,59	10,74	

Vigas: V.1.1+V.1.6+V.1.7

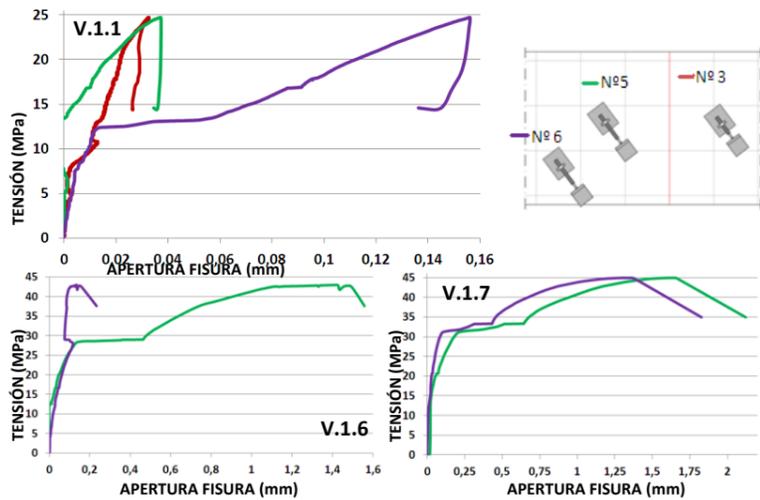
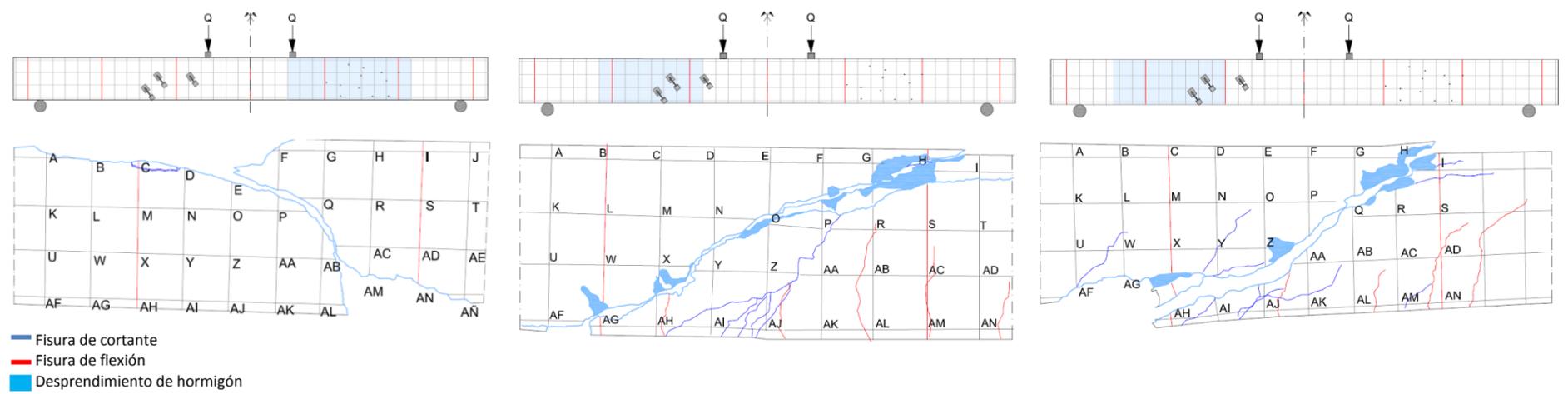
PATRÓN+9Kg/m³



V.1.1 Armado patrón sin fibras

V.1.6 Armado patrón +9 Kg/m³

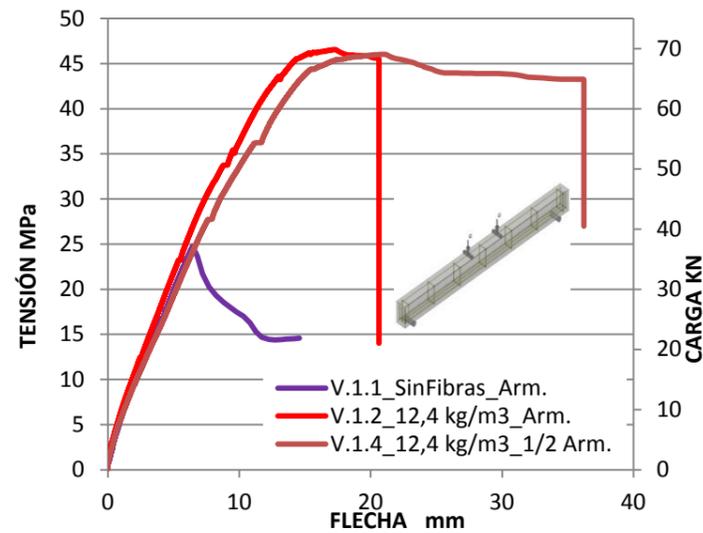
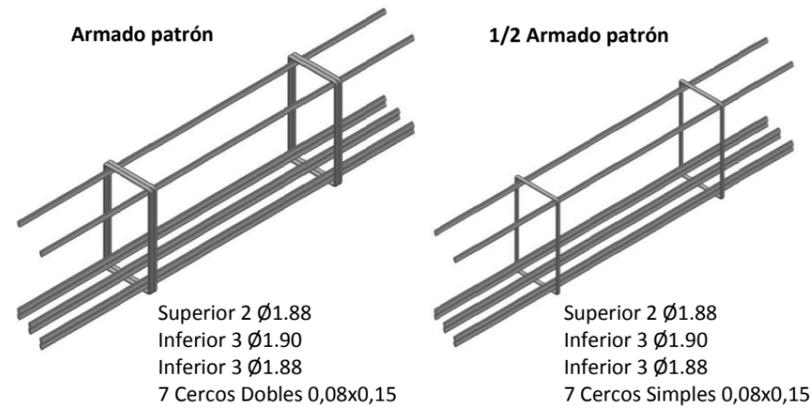
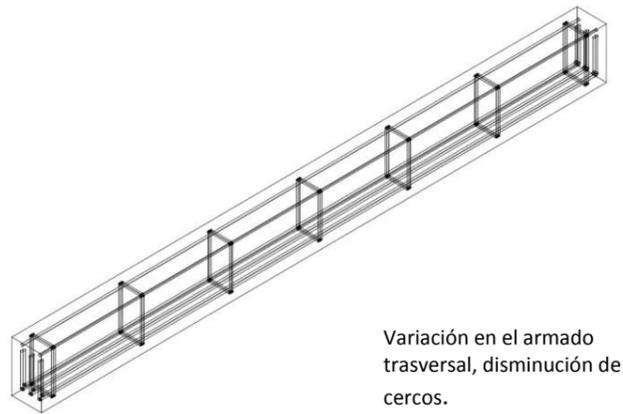
V.1.7 1/2 Armado patrón +9 kg/m³



	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura		Descripción
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	
V.1.1 (Sin Fibras)	25,24	4,22	Flexión	---	---	---	37,14	6,48	Rotura frágil instantánea por cortante
V.1.6 (9 kg/m ³)	25,04	4,13	Flexión	43,5	8,12	Flexión+Cortante	64,56	14,47	Rotura frágil progresiva por cortante
V.1.7 (9 kg/m ³)	31	4,98	Flexión	49,88	9,29	Flexión+Cortante	67,41	15,55	

Vigas: V.1.1+V.1.2+V.1.4

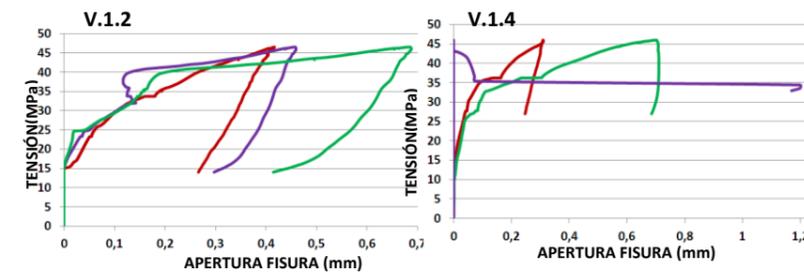
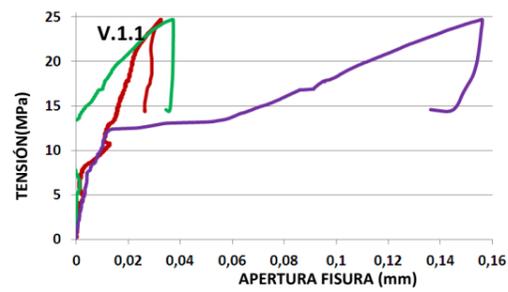
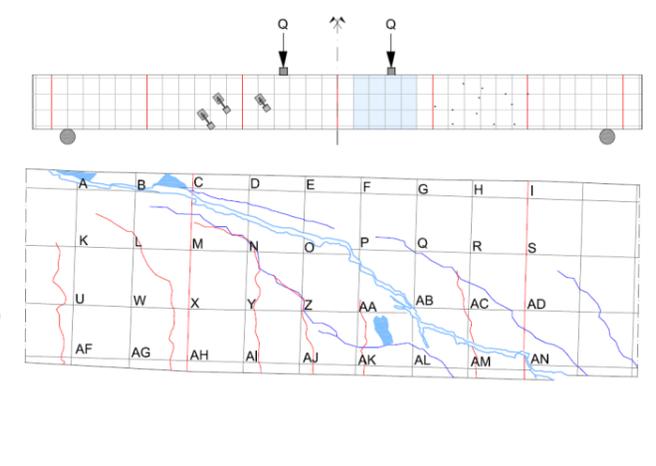
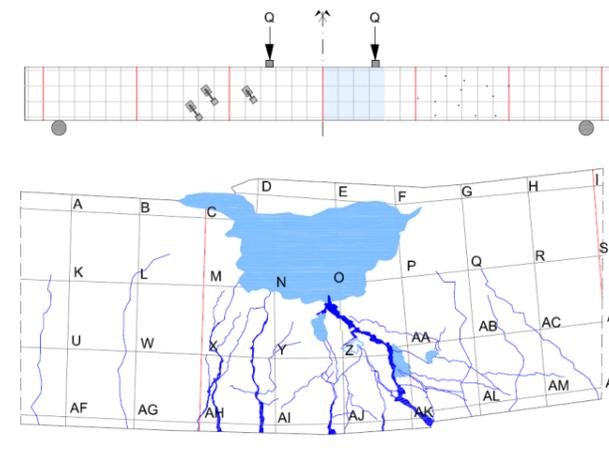
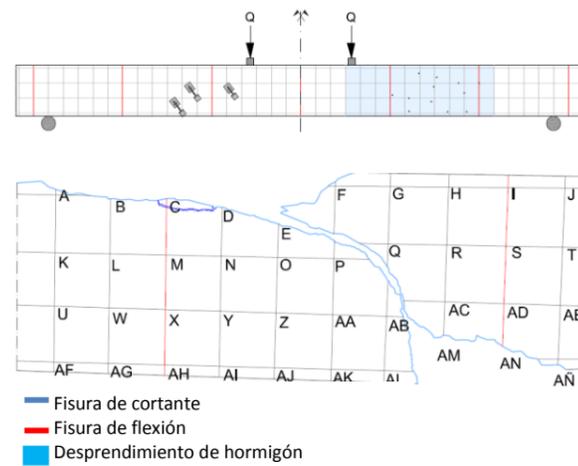
PATRÓN+12,4Kg/m³



V.1.1 Armado patrón sin fibras

V.1.2 Armado patrón +12,4 Kg/m³

V.1.5 1/2 Armado patrón +12,4 kg/m³



	1ª Fisuración			2ª Fisuración			Rotura		
	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Aparición Fisuras	Carga (KN)	Flecha (mm)	Descripción
V.1.1 (Sin Fibras)	25,24	4,22	Flexión	---	---	---	37,14	6,48	Rotura frágil instantánea por cortante
V.1.2 (12,4 kg/m ³)	34,95	5,48	Flexión	50,65	8,83	Flexión+Cortante	69,88	17,16	Agotamiento de la cabeza de compresión y pandeo lateral de la armadura superior por falta de estribo
V.1.4 (12,4 kg/m ³)	41,67	7,85	Flexión	54,42	11,68	Flexión+Cortante	69,11	20,86	



6. Presupuesto

6. PRESUPUESTO

PRESUPUESTO

V.1.1 Viga de hormigón autocompactante con armado patrón (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 14 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm). Dimensiones de la viga 0,1 x 0,17 x 1,92 m. Incluso encofrado, corte, doblado y montaje del acero, confección y puesta en obra del hormigón, desencofrado y curado

Ud	Descripción	Precio	Cantidad	IMPORTE	IMPORTE TOTAL
T	CEM II/B-M (S-L) 42,5 R	90	0,01061	0,955	
l	Agua	0,1	4,39	0,439	
T	Filler calizo	76,66	0,0006	0,046	
T	Arena fina caliza 0/2	10,13	0,01824	0,185	
T	Arena gruesa caliza 0/4	8,79	0,02532	0,223	
T	Grava caliza de tamaño máximo 12,5 mm	12	0,01808	0,217	
kg	Aditivo superplastificante de alto rendimiento Sika ViscoCrete 3425	0,75	0,138	0,104	
kg	Acero (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 14 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm)	0,81	7,93	6,423	
m2	Tablones de aglomerado recubierto de melamina blanca	7,05	1,141	8,044	
h	Técnico	6	15	90	
					106,64
				CDC (Medios auxiliares) 4% =	4,27
				CI 3% =	3,20
					114,10

V.1.2 Viga de hormigón autocompactante reforzado con 12,4 kg/m³ de fibras poliméricas con armado patrón (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 14 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm). Dimensiones de la viga 0,1 x 0,17 x 1,92 m. Incluso encofrado, corte, doblado y montaje del acero, confección y puesta en obra del hormigón, desencofrado y curado

Ud	Descripción	Precio	Cantidad	IMPORTE	IMPORTE TOTAL
T	CEM II/B-M (S-L) 42,5 R	90	0,01061	0,955	
l	Agua	0,1	4,39	0,439	
T	Filler calizo	76,66	0,0006	0,046	
T	Arena fina caliza 0/2	10,13	0,01824	0,185	
T	Arena gruesa caliza 0/4	8,79	0,02532	0,223	
T	Grava caliza de tamaño máximo 12,5 mm	12	0,01808	0,217	
kg	Aditivo superplastificante de alto rendimiento Sika ViscoCrete 3425	0,75	0,138	0,104	
kg	12,4 kg/m ³ de fibras poliméricas. SikaFiber T60	5	0,4047	2,024	
kg	Acero (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 14 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm)	0,81	7,93	6,423	
m2	Tablones de aglomerado recubierto de melamina blanca	7,05	1,141	8,044	
h	Técnico	6	15	90	
					108,66
				CDC (Medios auxiliares) 4% =	4,35
				CI 3% =	3,26
					116,26

- V.1.3** Viga de hormigón autocompactante reforzado con 6,2 kg/m³ de fibras poliméricas con armado patrón (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 14 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm). Dimensiones de la viga 0,1 x 0,17 x 1,92 m. Incluso encofrado, corte, doblado y montaje del acero, confección y puesta en obra del hormigón, desencofrado y curado.

Ud	Descripción	Precio	Cantidad	IMPORTE	IMPORTE TOTAL
T	CEM II/B-M (S-L) 42,5 R	90	0,01061	0,955	
l	Agua	0,1	4,39	0,439	
T	Filler calizo	76,66	0,0006	0,046	
T	Arena fina caliza 0/2	10,13	0,01824	0,185	
T	Arena gruesa caliza 0/4	8,79	0,02532	0,223	
T	Grava caliza de tamaño máximo 12,5 mm	12	0,01808	0,217	
kg	Aditivo superplastificante de alto rendimiento Sika ViscoCrete 3425	0,75	0,138	0,104	
kg	6,2 kg/m ³ de fibras poliméricas. SikaFiber T60	5	0,2024	1,012	
kg	Acero (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 14 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm)	0,81	7,93	6,423	
m ²	Tablones de aglomerado recubierto de melamina blanca	7,05	1,141	8,044	
h	Técnico	6	15	90	
				<u>107,65</u>	
				CDC (Medios auxiliares) 4% =	4,31
				CI 3% =	3,23
					115,18

- V.1.4** Viga de hormigón autocompactante reforzado con 12,4 kg/m³ de fibras poliméricas con 1/2 armado patrón (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 7 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm). Dimensiones de la viga 0,1 x 0,17 x 1,92 m. Incluso encofrado, corte, doblado y montaje del acero, confección y puesta en obra del hormigón, desencofrado y curado.

Ud	Descripción	Precio	Cantidad	IMPORTE	IMPORTE TOTAL
T	CEM II/B-M (S-L) 42,5 R	90	0,01061	0,955	
l	Agua	0,1	4,39	0,439	
T	Filler calizo	76,66	0,0006	0,046	
T	Arena fina caliza 0/2	10,13	0,01824	0,185	
T	Arena gruesa caliza 0/4	8,79	0,02532	0,223	
T	Grava caliza de tamaño máximo 12,5 mm	12	0,01808	0,217	
kg	Aditivo superplastificante de alto rendimiento Sika ViscoCrete 3425	0,75	0,138	0,104	
kg	12,4 kg/m ³ de fibras poliméricas. SikaFiber T60	5	0,4047	2,024	
kg	Acero (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 7 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm)	0,81	7,19	5,824	
m ²	Tablones de aglomerado recubierto de melamina blanca	7,05	1,141	8,044	
h	Técnico	6	15	90	
				<u>108,06</u>	
				CDC (Medios auxiliares) 4% =	4,32
				CI 3% =	3,24
					115,62

- V.1.5** Viga de hormigón autocompactante reforzado con 6,2 kg/m³ de fibras poliméricas con 1/2 armado patrón (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 7 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm). Dimensiones de la viga 0,1 x 0,17 x 1,92 m. Incluso encofrado, corte, doblado y montaje del acero, confección y puesta en obra del hormigón, desencofrado y curado.

Ud	Descripción	Precio	Cantidad	IMPORTE	IMPORTE TOTAL
T	CEM II/B-M (S-L) 42,5 R	90	0,01061	0,955	
l	Agua	0,1	4,39	0,439	
T	Filler calizo	76,66	0,0006	0,046	
T	Arena fina caliza 0/2	10,13	0,01824	0,185	
T	Arena gruesa caliza 0/4	8,79	0,02532	0,223	
T	Grava caliza de tamaño máximo 12,5 mm	12	0,01808	0,217	
kg	Aditivo superplastificante de alto rendimiento Sika ViscoCrete 3425	0,75	0,138	0,104	
kg	6,2 kg/m ³ de fibras poliméricas. SikaFiber T60	5	0,2024	1,012	
kg	Acero (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 7 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm)	0,81	7,19	5,824	
m2	Tablones de aglomerado recubierto de melamina blanca	7,05	1,141	8,044	
h	Técnico	6	15	90	
				107,05	
				CDC (Medios auxiliares) 4% =	4,28
				CI 3% =	3,21

114,54

- V.1.6** Viga de hormigón autocompactante reforzado con 9 kg/m³ de fibras poliméricas con armado patrón (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 14 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm). Dimensiones de la viga 0,1 x 0,17 x 1,92 m. Incluso encofrado, corte, doblado y montaje del acero, confección y puesta en obra del hormigón, desencofrado y curado.

Ud	Descripción	Precio	Cantidad	IMPORTE	IMPORTE TOTAL
T	CEM II/B-M (S-L) 42,5 R	90	0,01061	0,955	
l	Agua	0,1	4,39	0,439	
T	Filler calizo	76,66	0,0006	0,046	
T	Arena fina caliza 0/2	10,13	0,01824	0,185	
T	Arena gruesa caliza 0/4	8,79	0,02532	0,223	
T	Grava caliza de tamaño máximo 12,5 mm	12	0,01808	0,217	
kg	Aditivo superplastificante de alto rendimiento Sika ViscoCrete 3425	0,75	0,138	0,104	
kg	9 kg/m ³ de fibras poliméricas. SikaFiber T60	5	0,2938	1,469	
kg	Acero (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 14 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm)	0,81	7,93	6,423	
m2	Tablones de aglomerado recubierto de melamina blanca	7,05	1,141	8,044	
h	Técnico	6	15	90	
				108,10	
				CDC (Medios auxiliares) 4% =	4,32
				CI 3% =	3,24

115,67

RESUMEN DE PRESUPUESTO		
CAPÍTULO	DESCRIPCIÓN	IMPORTE
V.1.1	Viga de hormigón autocompactante con armado patrón (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 14 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm). Dimensiones de la viga 0,1 x 0,17 x 1,92 m. Incluso encofrado, corte, doblado y montaje del acero, confección y puesta en obra del hormigón, desencofrado y curado.	114,10
V.1.2	Viga de hormigón autocompactante reforzado con 12,4 kg/m ³ de fibras poliméricas con armado patrón (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 14 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm). Dimensiones de la viga 0,1 x 0,17 x 1,92 m. Incluso encofrado, corte, doblado y montaje del acero, confección y puesta en obra del hormigón, desencofrado y curado.	116,26
V.1.3	Viga de hormigón autocompactante reforzado con 6,2 kg/m ³ de fibras poliméricas con armado patrón (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 14 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm). Dimensiones de la viga 0,1 x 0,17 x 1,92 m. Incluso encofrado, corte, doblado y montaje del acero, confección y puesta en obra del hormigón, desencofrado y curado.	115,18
V.1.4	Viga de hormigón autocompactante reforzado con 12,4 kg/m ³ de fibras poliméricas con 1/2 armado patrón (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 7 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm). Dimensiones de la viga 0,1 x 0,17 x 1,92 m. Incluso encofrado, corte, doblado y montaje del acero, confección y puesta en obra del hormigón, desencofrado y curado.	115,62
V.1.5	Viga de hormigón autocompactante reforzado con 6,2 kg/m ³ de fibras poliméricas con 1/2 armado patrón (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 7 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm). Dimensiones de la viga 0,1 x 0,17 x 1,92 m. Incluso encofrado, corte, doblado y montaje del acero, confección y puesta en obra del hormigón, desencofrado y curado.	114,54
V.1.6	Viga de hormigón autocompactante reforzado con 9 kg/m ³ de fibras poliméricas con armado patrón (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 14 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm). Dimensiones de la viga 0,1 x 0,17 x 1,92 m. Incluso encofrado, corte, doblado y montaje del acero, confección y puesta en obra del hormigón, desencofrado y curado.	115,67
V.1.7	Viga de hormigón autocompactante reforzado con 9 kg/m ³ de fibras poliméricas con 1/2 armado patrón (8 barras longitudinales $\varnothing 8$ y 7 barras transversales $\varnothing 6$ c/30 cm). Dimensiones de la viga 0,1 x 0,17 x 1,92 m. Incluso encofrado, corte, doblado y montaje del acero, confección y puesta en obra del hormigón, desencofrado y curado.	115,03
		<hr/>
		806,41
		IVA 21%
		169,35
	IMPORTE TOTAL	975,76



7. Conclusiones

7. CONCLUSIONES

Tras los resultados obtenidos vemos necesario separar las conclusiones de caracterización del material de las de los ensayos realizados en vigas:

1. Caracterización del material:

Se detecta una pérdida de homogeneidad como consecuencia del ajustado volumen de amasada realizado, puesto que no se disponía de una **amasadora más grande**. Debido a esto se observan **variaciones no sustanciales** en los resultados obtenidos en amasadas con la misma cantidad de fibras, e incluso en la misma amasada.

En los ensayos a flexión, a pesar de las pequeñas variaciones detectadas, se ha observado que con la incorporación de fibras al hormigón este presenta un comportamiento más dúctil. Además, **incrementa la tenacidad** del material, ya que observamos que en la rama de post-rotura el material con fibras sigue admitiendo cargas a diferencia que el material sin fibras. También observamos que tras la primera fisura, para una **misma flecha**, el hormigón admite **mayores cargas** cuanto mayor sea el contenido de fibras.

En cuanto a la **resistencia a compresión** y el **módulo de deformación** los datos obtenidos en probetas con fibras presentan **pequeñas variaciones** con respecto a los obtenidos de la amasada V.1.1 patrón (sin fibras), tanto a la alza como a la baja. Esto puede ser como consecuencia de la dirección y distribución aleatoria de las fibras.

2. Vigas:

En los ensayos realizados en las **vigas** no se presentaron variaciones en los resultados. Las mejoras obtenidas con la incorporación de fibras al hormigón han aumentado a medida que se incorporaban fibras, siendo mayores cuanto mayor era el contenido de fibras.

Se observó que hasta una cantidad de 9 kg/m^3 de fibras las vigas fallaban por cortante aumentando considerablemente la carga de rotura con respecto a la patrón. Admitiendo **mayores cargas** las vigas con 9 kg/m^3 de fibras que las de $6,2 \text{ kg/m}^3$. En las vigas con $12,4 \text{ kg/m}^3$ de fibras, la rotura no se produjo por cortante, sino por agotamiento de la cabeza de compresión y pandeo de la armadura longitudinal superior por falta de estribo, debido a la colaboración de las fibras.

A su vez observamos que la forma de **rotura** de las vigas también sufrió una mejora, siendo **frágil e instantánea** en el caso de la viga patrón (**sin fibras**), **frágil progresiva** en el caso de **6,2 y 9 kg/m³** de fibras y **dúctil** para las vigas con **12,4 kg/m³ fibras**.

Con la reducción del armado no se encontraron diferencias sustanciales entre las vigas de armado patrón y las de medio armado patrón con igual contenido de fibras, por lo que se considera como una duplicidad de ensayos, corroborando así los resultados obtenidos.

Por tanto, concluimos que con la incorporación de **fibras poliméricas** al hormigón se **mejora la respuesta a fisuración, reduciendo la fragilidad del material y aumentando su tenacidad considerablemente.**

En cuanto al comportamiento a **esfuerzo a cortante** en vigas, destacamos que con la incorporación de **fibras poliméricas** al hormigón se observan **notables mejoras retrasando y controlando la rotura** por cortante, con valores de 6,2 y 9 kg/m³ de fibras, **e incluso evitando el cortante con valores de 12,4 kg/m³.**

Así pues, concluimos que **se mejora la capacidad mecánica a cortante en vigas** con la incorporación de fibras poliméricas al hormigón, alcanzando un **comportamiento dúctil con una cantidad de 12,4 kg/m³.**



8. Futuras líneas de trabajo

8. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Tras la realización del proyecto y con los resultados obtenidos consideramos que sería interesante realizar una continuación del estudio.

En primer lugar consideramos que para la caracterización del material sería interesante realizar un mayor número de probetas con el fin de reducir la variabilidad en algunos de los ensayos realizados, ya que debido a la orientación y disposición aleatoria de las fibras se obtuvieron resultados con pequeñas variaciones no concluyentes.

Por otra parte pensamos que sería interesante realizar el ensayo para estudiar el cortante puro en probetas a través del ensayo específico para este, determinación de la resistencia a cortante, según UNE_83511.

También creemos que sería interesante estudiar si la incorporación de fibras puede ser sustitutiva al armado de las vigas y establecer en qué cuantía es posible reducir el armado con la incorporación de estas al hormigón. Con el fin de buscar un producto más económico, ligero y con mayor facilidad y rapidez en su puesta en obra.

Proponemos la realización de más variables de armado, reduciendo progresivamente los cercos hasta eliminarlos completamente.

Otra futura línea de trabajo sería cuantificar con qué cantidad de fibras se llega al punto más óptimo de trabajo, si existe un momento en el que con el aumento de fibras ya no se mejoran las propiedades y capacidades mecánicas del hormigón. Para ello en esta ocasión proponemos realizar más variables de dosificación de fibras por encima de $12,4\text{kg/m}^3$ ya que en los ensayos hemos observado que hasta $12,4\text{ kg/m}^3$ la incorporación de fibras al hormigón aumenta las resistencias en las vigas y evita el cortante.

Por último proponemos realizar el mismo estudio con las consideraciones citadas en el presente apartado en vigas planas, ya que es más habitual en la construcción de hoy en día la realización de forjados con estas vigas.



9. Bibliografía

9. BIBLIOGRAFÍA:

- ACHE (2008). *Monografía nº 13. Hormigón autocompactante: Diseño y aplicación*. ACHE, Madrid, España.
- ACHE (2008). *Monografía nº 2. Manual de Tecnología del hormigón reforzado con fibras de acer*. ACHE, Madrid, España.
- ACHE (2008). *Monografía nº 16. Manual de Tecnología de aditivos para Hormigón*. ACHE, Madrid, España.
- FERNÁNDEZ GÓMEZ, J. Y BURÓN MAESTRO, M. (2005). *Guía práctica para la utilización del hormigón autocompatante*. IECA, Madrid, España.
- GUTIÉRREZ JIMÉNEZ, J.P. (2011). *Investigación de fibras poliméricas en el comportamiento postfisuración de un hormigón autocompactante*. CSIC.
- GUTIÉRREZ JIMÉNEZ, PACIOS ÁLVAREZ Y CARBALLOSA DE MIGUEL (2012). *Diseño optimizado y caracterización de hormigones autocompactantes reforzados con fibra polimérica de alto módulo*. 3º Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante.
- BAIRÁN, MARÍ Y MOHR (2010). *Estudio del comportamiento del hormigón armado ante esfuerzos normales y tangentes mediante modelos seccionales de interacción completa*. Informes de la construcción Vol. 62.
- TURMO, BANTHIA, GETTU Y BARRAGÁN (2008). *Estudio del comportamiento a cortante de vigas de hormigón reforzado con fibras*. Materiales de Construcción Vol. 58.
- BURÓN MAESTRO, FERNÁNDEZ GÓMEZ Y GARRIDO ROMERO (2006). *Hormigón autocompactante. Criterios para su utilización*. Hormigón Nº887.
- DE LA CRUZ ET AL (2009). *Ensayos a cortante de vigas de hormigón estructural autocompactable*. Dyna nº 159.

- ACI-08, Eurocódigo 2 y EHE-08, para estimar las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante. Informes de la Construcción Vol.62.
- RODRIGUEZ LÓPEZ Y PRADO PÉREZ-SEOANE (1984). *Hormigón con la incorporación de fibras*. Revista de obras públicas (Octubre 1984)
- GARCÍA, AGULLÓ, AGUADO Y CANALS (2004). *Evaluación de la tenacidad en el hormigón proyectado reforzado con fibras poliméricas de alto módulo*. BOL E T I N D E L A SOC I E D A D E S PA Ñ O L A D E Cerámica y vidrio.
- AGULLÓ, GETTU, AGUADO Y SAIDIVAR(2000). *La tenacidad de hormigones reforzados con fibras de acero*. Monografía CIMNE Nº 54.
- Libro de resúmenes (2005). *VI Congreso nacional de materiales compuestos*.
- REYES, PASTORIZA Y FERNÁNDEZ (2002). *Los plásticos como materiales de construcción*.
- FERNÁNDEZ CÁNOVAS, MANUEL (2000). *Hormigón*.
- ING. JORGE R. BERNAL (2005). *Hormigón armado-Vigas I*.
- *Esfuerzo a cortante en hormigón armada*. Intemac ediciones. DVD de formación técnica.
- ARNON BENTUR AND SIDNEY MINDESS (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*.
- CUENCA ASENSIO, ESTEFANIA (2008), *Comportamiento a cortante de elementos constructivos fabricados con hormigón autocompactante y hormigón reforzado con fibras* (PFC) UPV.
- CUENCA ASENSIO, ESTEFANÍA (2012), *On shear behavior of structural elements made of steel fiber reinforced concrete*. (TESIS) UPV.

- PIZARRO IRANZO, ALVARO (2010), Estudio experimental del comportamiento a esfuerzo cortante de vigas de hormigón reforzadas con fibras de carbono. (TESIS) UPM.
- SALVAT SOLÉ, SANDRA (2004), Resistencia a esfuerzo corte de vigas pretensadas de hormigón autocompactable de alta resistencia. (TESIS) UPC.
- AENOR. “UNE-EN 12350-1” Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras
- AENOR. “UNE-EN 12350-6” Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad
- AENOR. “UNE-EN 12350-7” Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire
- AENOR. “UNE-EN 12350-8” Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento
- AENOR. “UNE-EN 12350-9” Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante.
- Ensayo del embudo en V
- AENOR. “UNE-EN 12350-10” Ensayos de hormigón fresco. Parte 10: Hormigón autocompactante. Método de la caja en L
- AENOR. “UNE-EN 12350-11” Ensayos de hormigón fresco. Parte 11: Parte 11: Hormigón autocompactante. Ensayo de segregación por tamiz
- AENOR. “UNE-EN 12350-12” Ensayos de hormigón fresco. Parte 12: Hormigón autocompactante. Ensayo con el anillo japonés
- AENOR. “UNE-EN 12390-1” Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes
- AENOR. “UNE-EN 12390-1:2001/AC” Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes
- AENOR. “UNE-EN 12390-3” Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas
- AENOR. “UNE-EN 12390-3:2009/AC” Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas
- AENOR. “UNE-83501” Hormigones con fibras. Toma de muestras de hormigón fresco
- AENOR. “UNE-83502” Hormigones con fibras. Fabricación en laboratorio

- AENOR. “UNE-83504” Hormigones con fibras. Fabricación y conservación de probetas para los ensayos de laboratorio
- AENOR. “UNE-83507” Hormigones con fibras. Rotura por compresión
- AENOR. “UNE-83508” Hormigones con fibras. Determinación del índice de tenacidad a compresión
- AENOR. “UNE-83509” Hormigones con fibras. Rotura por flexotracción
- AENOR. “UNE-83510” Hormigones con fibras. Determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura
- AENOR. “UNE-83316” Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión
- AENOR. “UNE-EN 14651:2007+A1” Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)
- AENOR. “UNE-EN 14889-2” Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad
- AENOR. “UNE-EN 14889-1” Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad
- AENOR. “UNE-EN 206-9” Parte 9: Requisitos adicionales para el hormigón autocompactante
- AENOR. “UNE-36065” Barra corrugadas de acero soldable con características especiales de ductilidad para armaduras de hormigón armado
- AENOR. “UNE-36068” Barra corrugadas de acero para uso estructural en armaduras de hormigón armado.
- AENOR. “UNE-366811 IN” Barra corrugadas de acero soldable para armaduras de hormigón armado. Códigos de identificación del fabricante
- AENOR. “UNE-EN 197-1” Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

- AENOR. "UNE-EN 197-1:2000/A1" Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.
- AENOR. "UNE-EN 197-1:2000/A3" Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.
- FOMENTO, "EHE 08, Instrucción de hormigón estructural", Anejo 17. Recomendaciones para la utilización del hormigón autocompactante
- FOMENTO, "EHE 08, Instrucción de hormigón estructural", Anejo 14. Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras
- FOMENTO, "EHE 08, Instrucción de hormigón estructural"
- ACI Committee 544. Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete (ACI 544.5R-10)
- ACI Committee 544. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-96). 2002
- ACI Committee 544. Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.2R-89). 1999
- ACI Committee 544. Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.3R-93). 1998
- ACI Committee 544. Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.4R-88). 1999
- <http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=1535&edi=68&xit=fibras-en-hormigones-y-morteros-de-cemento>
- http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732009000100004&script=sci_arttext
- <http://www.gef.es/Congresos/24/PDF/3-12.pdf>
- <http://www.arqhys.com/arquitectura/hormigon-reforzado-fibras.html>

- <http://www.myphor.com/>
- <http://www.hormigonespecial.com/secciones/hormigones-1/subsecciones/Autocompactante-HAC-1.html>
- <http://www.copsa.com/folletos/Fibras.pdf>
- http://www.revista-anales.es/web/n_8/seccion_6.html
- <http://www.gespavi.com/idi/hormigon-reforzado-con-fibras-de-acero/>



Anexo I

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Proporciones recomendadas HAC.....	3
Tabla 2. Características mecánicas de las fibras más comunes.....	6
Tabla 3. Tolerancias en la longitud y el diámetro de la fibra.....	7
Tabla 4. Tolerancias en la longitud y el diámetro de la fibra.....	8
Tabla 5. Resultados de resistencia a compresión.....	17
Tabla 6. Ensayos sobre medida de las propiedades.....	19
Tabla 7. Ensayos especiales.....	19
Tabla 8. Normativa actualizada.....	20
Tabla 9. Requisitos generales para la autocompactabilidad.....	22
Tabla 10. Clases de exposición.....	26
Tabla 11. Clases de escurrimiento	26
Tabla 12. Clases de viscosidad.....	27
Tabla 13. Clases de resistencia al bloqueo.....	27
Tabla 14. Asentamiento según consistencia.....	28
Tabla 15. Granulometría del filler mineral.....	30
Tabla 16. Elección de aditivo superplastificante.....	32
Tabla 17. Ventajas y desventajas de los materiales.....	35
Tabla 18. Tipos de armado.....	46
Tabla 19. Características de las probetas.....	46
Tabla 20. Programación de las amasadas.....	47
Tabla 21. Identificación de las probetas.....	47
Tabla 22. Relaciones a/c.....	47
Tabla 23. Granulometría grava.....	51
Tabla 24. Granulometría arena 0/4.....	52
Tabla 25. Granulometría arena 0/2.....	53
Tabla 26. Granulometría todos de los áridos.....	54
Tabla 27. Especificaciones del cemento según UNE 197-1.....	55
Tabla 28. Propuestas de dosificación.....	60
Tabla 29. Requisitos generales para la autocompactabilidad.....	60
Tabla 30. Valores ideales para nuestro HAC.....	61
Tabla 31. Problema-solución dosificación.....	61
Tabla 32. Fórmulas escurrimiento.....	68
Tabla 33. Índice visual.....	70
Tabla 34. Resultados características geométricas del acero Ø6N mm.....	77
Tabla 35. Resultados características geométricas del acero Ø8N mm.....	78
Tabla 36. Resultados características geométricas del acero Ø8V mm.....	78
Tabla 37. Resultados ensayo tracción acero Ø6 mm.....	79

Tabla 38. Resultados ensayo tracción acero Ø8V mm.....	80
Tabla 39. Resultados ensayo tracción acero Ø8N mm.....	80
Tabla 40. Valores ideales para nuestro HAC.....	81
Tabla 41. Dosificación propuesta A.....	81
Tabla 42. Obtención de la humedad.....	82
Tabla 43. Amasada Dosificación 1 corregida.....	82
Tabla 44. Amasada Dosificación 3 corregida.....	83
Tabla 45. Amasada Dosificación 5 corregida.....	84
Tabla 46. Amasada Dosificación 8 corregida.....	85
Tabla 47. Amasada Dosificación 9 corregida.....	87
Tabla 48. Amasada Dosificación 10 corregida.....	88
Tabla 49. Amasada Dosificación 12 corregida.....	89
Tabla 50. Amasada Dosificación 14 corregida.....	90
Tabla 51. Dosificación Definitiva.....	91
Tabla 52. Amasada Dosificación V.1.1 corregida.....	92
Tabla 53. Amasada Dosificación V.1.2 corregida.....	93
Tabla 54. Amasada Dosificación V.1.3 corregida.....	94
Tabla 55. Amasada Dosificación V.1.4 corregida.....	95
Tabla 56. Amasada Dosificación V.1.5 corregida.....	96
Tabla 57. Amasada Dosificación V.1.6 corregida.....	97
Tabla 58. Amasada Dosificación V.1.7 corregida.....	98
Tabla 59. Cantidad de aire ocluido.....	99
Tabla 60 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.1.....	100
Tabla 61 Resultados gráfica tenacidad V.1.1 probetas prismáticas.....	100
Tabla 62 Resultados gráfica compresión V.1.1 probetas cilíndricas.....	101
Tabla 63 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.3.....	102
Tabla 64 Resultados gráfica tenacidad V.1.3 probetas prismáticas.....	103
Tabla 65 Resultados gráfica de compresión V.1.3 probetas cilíndricas.....	104
Tabla 66 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.5.....	105
Tabla 67. Resultados gráfica tenacidad V.1.5 probetas prismáticas.....	105
Tabla 68 Resultados gráfica compresión V.1.5 probetas cilíndricas.....	106
Tabla 69 Resultados gráfica tensión-flecha V.1.1_V.1.3_V.1.5.....	107
Tabla 70 Resultados gráfica tensión-CMOD V.1.1_V.1.3_V.1.5.....	108
Tabla 71 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.3_V.1.5 probetas prismáticas.....	109
Tabla 72 Resultados Módulo deformación V.1.1_V.1.3_V.1.5.....	109
Tabla 73 Resultados gráfica compresión V.1.1_V.1.3_V.1.5.....	110
Tabla 74 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.3_V.1.5 probetas cilíndricas.....	111
Tabla 75 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.6.....	111
Tabla 76. Resultados gráfica tenacidad V.1.6 probetas prismáticas.....	112
Tabla 77 Resultados gráfica compresión V.1.6 probetas cilíndricas.....	113

Tabla 78 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.7.....	114
Tabla 79. Resultados gráfica tenacidad V.1.7 probetas prismáticas.....	114
Tabla 80 Resultados gráfica compresión V.1.7 probetas cilíndricas.....	115
Tabla 81 Resultados gráfica tensión-flecha V.1.1_V.1.6_V.1.7.....	116
Tabla 82 Resultados gráfica tensión-CMOD V.1.1_V.1.6_V.1.7.....	117
Tabla 83 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.6_V.1.7 probetas prismáticas.....	117
Tabla 84 Resultados Módulo deformación V.1.1_V.1.6_V.1.7.....	118
Tabla 85 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.6_V.1.7 probetas cilíndricas.....	118
Tabla 86 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.6_V.1.7 probetas cilíndricas.....	118
Tabla 87 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.2.....	119
Tabla 88. Resultados gráfica tenacidad V.1.2 probetas prismáticas.....	119
Tabla 89 Resultados gráfica compresión V.1.2 probetas cilíndricas.....	120
Tabla 90 Resultados ensayo flexión a tres puntos V.1.4.....	121
Tabla 91. Resultados gráfica tenacidad V.1.4 probetas prismáticas.....	122
Tabla 92 Resultados gráfica compresión V.1.4 probetas cilíndricas.....	123
Tabla 93 Resultados gráfica tensión-flecha V.1.1_V.1.2_V.1.4.....	124
Tabla 94 Resultados gráfica tensión-CMOD V.1.1_V.1.2_V.1.4.....	125
Tabla 95 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.2_V.1.4 probetas prismáticas.....	125
Tabla 96 Resultados Módulo deformación V.1.1_V.1.2_V.1.4.....	125
Tabla 97 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.2_V.1.4 probetas cilíndricas.....	126
Tabla 98 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.2_V.1.4 probetas cilíndricas.....	126
Tabla 99 Resultados gráfica tensión-flecha V.1.1_V.1.5_V.1.6_V.1.2.....	127
Tabla 100 Resultados gráfica tensión-CMOD V.1.1_V.1.5_V.1.6_V.1.2.....	128
Tabla 101 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.5_V.1.6_V.1.2 probetas prismáticas.....	129
Tabla 102 Resultados Módulo deformación V.1.1_V.1.5_V.1.7_V.1.4.....	130
Tabla 103 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.5_V.1.7_V.1.4 probetas cilíndricas.....	130
Tabla 104 Resultados gráfica tenacidad V.1.1_V.1.5_V.1.7_V.1.4 probetas cilíndricas.....	131
Tabla 105 Cantidad de fibras.....	132
Tabla 106 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.1.....	135
Tabla 107 Resultados DEMECS viga V.1.1.....	135
Tabla 108 Resultados LVDT viga V.1.1.....	135
Tabla 109 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.3.....	137
Tabla 110 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.5.....	138
Tabla 111 Resultados LVDT viga V.1.5.....	139
Tabla 112 Resultados DEMECS viga V.1.5.....	139
Tabla 113 Resultados ensayo flexión a 4 puntos vigas V.1.1_V.1.3_V.1.5.....	140
Tabla 114 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.6.....	141
Tabla 115 Resultados LVDT viga V.1.6.....	141
Tabla 116 Resultados DEMECS viga V.1.6.....	141
Tabla 117 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.7.....	143

Tabla 118 Resultados LVDT viga V.1.7.....	143
Tabla 119 Resultados DEMECS viga V.1.7.....	143
Tabla 120 Resultados ensayo flexión a 4 puntos vigas V.1.1_V.1.6_V.1.7.....	145
Tabla 121 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.2.....	146
Tabla 122 Resultados LVDT viga V.1.2.....	146
Tabla 123 Resultados DEMECS viga V.1.2.....	146
Tabla 124 Resultados ensayo flexión a 4 puntos viga V.1.4.....	148
Tabla 125 Resultados LVDT viga V.1.4.....	148
Tabla 126 Resultados DEMECS viga V.1.4.....	148
Tabla 127 Resultados ensayo flexión a 4 puntos vigas V.1.1_V.1.2_V.1.4.....	150
Tabla 128 Resultados ensayo flexión a 4 puntos vigas V.1.1_V.1.5_V.1.7_V.1.4.....	151
Tabla 129 Resultados ensayo flexión a 4 puntos vigas V.1.1_V.1.3_V.1.6_V.1.2.....	152
Tabla 130 Resultados ensayo flexión a 4 puntos vigas V.1.1_V.1.3_V.1.5_V.1.6_V.1.7_V.1.2_V.1.4.....	153

LISTADO DE IMÁGENES

Imagen 1. Ejemplos de fibras metálicas.....	7
Imagen 2. Ejemplos de fibras metálicas.....	7
Imagen 3. Ejemplo de fibras poliméricas.....	8
Imagen 4. Ejemplo de fibras poliméricas.....	9
Imagen 5. Termómetro cámara de curado.....	48
Imagen 6. Exterior cámara de curado.....	48
Imagen 7. Interior cámara de curado.....	48
Imagen 8. Secado de áridos	50
Imagen 9. Cuarteado de áridos.....	50
Imagen 10. Serie de tamices.....	51
Imagen 11. Resultado tamizado grava en mm.....	51
Imagen 12. Lavado arena 0/4.....	52
Imagen 13. Resultado tamizado arena 0/4 en mm.....	52
Imagen 14. Lavado arena 0/2.....	53
Imagen 15. Resultado tamizado arena 0/2 en mm.....	53
Imagen 16. Tipo de cemento.....	55
Imagen 17. Tipo de aditivo.....	56
Imagen 18. Fibras con envoltura.....	57
Imagen 19. Fibras sueltas.....	57
Imagen 20. Longitud de las fibras.....	57
Imagen 21. Tipo de acero del primer suministro.....	57
Imagen 22. Tipo de acero del segundo suministro.....	57
Imagen 23. Código acero del primer suministro.....	58
Imagen 24. Código fabricante SN Seixal, Siderurgia Nacional, S.A.....	58
Imagen 25. Código del acero del segundo suministro.....	58
Imagen 26. Código fabricante Siderúrgica Sevillana, S.A.....	58
Imagen 27. Ensayo de tracción del acero.....	59
Imagen 28. Encofrado.....	62
Imagen 29. Doblado de ferralla.....	63
Imagen 30. Cortado de ferralla.....	63
Imagen 31. Atado de la ferralla.....	63
Imagen 32. Atado de la ferralla.....	63
Imagen 33. Aceitado de los moldes.....	64
Imagen 34. Aceitado del encofrado.....	64
Imagen 35. Colocación de los separadores.....	64
Imagen 36. Pesado de paella+espátula.....	64
Imagen 37. Pesado de paella+espátula+árido húmedo.....	64
Imagen 38. Secado del árido.....	64

Imagen 39. Pesado grava.....	65
Imagen 40. Pesado arena 0/2.....	65
Imagen 41. Pesado arena 0/4.....	65
Imagen 42. Pesado Filler calizo.....	65
Imagen 43 Pesado cemento.....	65
Imagen 44. Fibras poliméricas.....	65
Imagen 45. Pesada agua.....	66
Imagen 46. Pesada aditivo.....	66
Imagen 47. Vertido de materiales en amasadora.....	66
Imagen 48. Amasado.....	66
Imagen 49. Instrumentos para el ensayo de escurrimiento.....	67
Imagen 50. Proceso ensayo de escurrimiento.....	67
Imagen 51. Resultado de ensayo de escurrimiento.....	67
Imagen 52. Instrumentos para el ensayo de anillo J.....	68
Imagen 53. Proceso ensayo anillo J.....	68
Imagen 54. Resultado de ensayo de anillo J.....	68
Imagen 55. Instrumentos para el ensayo del embudo en V.....	69
Imagen 56. Proceso y resultado de ensayo anillo J.....	69
Imagen 57. Conjunto de imágenes del ensayo para la determinación de contenido de aire.....	69
Imagen 58. Hormigonado viga.....	70
Imagen 59. Enrasado viga.....	70
Imagen 60 y 61. Hormigonado de probetas.....	70
Imagen 62. Desencofrado viga.....	71
Imagen 63. Desencofrado probeta.....	71
Imagen 64. Vigas en cámara de curado.....	71
Imagen 65. Probetas en cámara de curado.....	71
Imagen 66. Realización entalla probetas prismáticas.....	71
Imagen 67. Refrentado probetas cilíndricas.....	72
Imagen 68. Ensayo flexión en probetas prismáticas.....	73
Imagen 69. Ensayo compresión probeta prismática.....	73
Imagen 70. Determinación del módulo de elasticidad a compresión.....	74
Imagen 71. Ensayo de compresión en probetas cilíndricas.....	75
Imagen 72. Colocación Demecs.....	76
Imagen 73. Colocación LVDT.....	76
Imagen 74. Ensayo a flexión en 4 puntos.....	76
Imagen 75 marcado barras para ensayo a tracción	78
Imagen 76 marcado barras para ensayo a tracción.....	78
Imagen 77. Medición tras el ensayo de tracción	78
Imagen 78. Roturas barras tras ensayo tracción.....	80
Imagen 79 resultados dosificación 1.....	82

Imagen 80 resultados escurrimiento dosificación 2.....	83
Imagen 81 resultados escurrimiento dosificación 3.....	84
Imagen 82 resultados escurrimiento dosificación 4.....	84
Imagen 83 Resultados escurrimiento dosificación 5.....	85
Imagen 84. Resultados anillo J dosificación 5.....	85
Imagen 85 Resultados escurrimiento dosificación 6.....	85
Imagen 86 Resultados escurrimiento dosificación 7.....	86
Imagen 87 Resultados escurrimiento dosificación 8.....	86
Imagen 88 Resultados anillo J dosificación 8.....	87
Imagen 89 Resultados escurrimiento dosificación 10.....	88
Imagen 90 Resultados escurrimiento dosificación 11.....	89
Imagen 91 Resultados anillo J dosificación 11.....	89
Imagen 92 Resultados escurrimiento dosificación 13.....	90
Imagen 93 Resultados anillo J dosificación 13.....	90
Imagen 94 Resultados anillo J dosificación 14.....	91
Imagen 95 Resultados escurrimiento amasada V.1.1.....	92
Imagen 96 Resultados anillo J amasada V.1.1.....	92
Imagen 97 Resultados escurrimiento sin fibras amasada V.1.2.....	93
Imagen 98 Resultados escurrimiento con fibras amasada V.1.2.....	93
Imagen 99 Resultados escurrimiento sin fibras amasada V.1.3.....	94
Imagen 100 Resultados escurrimiento con fibras amasada V.1.3.....	94
Imagen 101 Resultados anillo J con fibras amasada V.1.3.....	94
Imagen 102 Resultados escurrimiento sin fibras amasada V.1.4.....	95
Imagen 103 Resultados escurrimiento con fibras amasada V.1.4.....	95
Imagen 104 Resultados anillo J con fibras amasada V.1.4.....	95
Imagen 105 Resultados escurrimiento sin fibras amasada V.1.5.....	96
Imagen 106 Resultados escurrimiento con fibras amasada V.1.5.....	96
Imagen 107 Resultados anillo J con fibras amasada V.1.5.....	96
Imagen 108 Resultados escurrimiento sin fibras amasada V.1.6.....	97
Imagen 109 Resultados escurrimiento con fibras amasada V.1.6.....	97
Imagen 110 Resultados anillo J con fibras amasada V.1.6.....	97
Imagen 111 Resultados escurrimiento sin fibras amasada V.1.7.....	98
Imagen 112 Resultados escurrimiento con fibras amasada V.1.7.....	98
Imagen 113 Resultados anillo J con fibras amasada V.1.7.....	98
Imagen 114 Erizos en amasado con 12,4 kg/m ³ de fibras.....	99
Imagen 115 Puesta en obra con 12,4 kg/m ³ de fibras.....	99
Imagen 116 cantidad de fibras probetas prismáticas.....	132
Imagen 117 cantidad de fibras probetas prismáticas.....	132
Imagen 118 cantidad de fibras en probetas prismáticas.....	132
Imagen 119 cantidad de fibras en probetas probeta cilíndrica.....	133

Imagen 120 cantidad de fibras en probetas probeta cilíndrica.....	133
Imagen 121. Viga V.1.1 tras ensayo flexión a 4 puntos.....	136
Imagen 122. Rotura viga V.1.1.....	136
Imagen 123. Viga V.1.3 tras ensayo flexión a 4 puntos.....	137
Imagen 124. Rotura viga V.1.3.....	138
Imagen 125. Viga V.1.5 tras ensayo flexión a 4 puntos.....	139
Imagen 126. Rotura viga V.1.5.....	139
Imagen 127. Viga V.1.6 tras ensayo flexión a 4 puntos.....	142
Imagen 128. Rotura viga V.1.6.....	142
Imagen 129. Viga V.1.7 tras ensayo flexión a 4 puntos.....	144
Imagen 130. Rotura viga V.1.7.....	144
Imagen 131. Viga V.1.2 tras ensayo flexión a 4 puntos.....	147
Imagen 132. Rotura viga V.1.2.....	147
Imagen 133. Viga V.1.4 tras ensayo flexión a 4 puntos.....	149
Imagen 134. Rotura viga V.1.4.....	149

LISTADO DE FIGURAS

Figura1. Diagrama carga-deformación.....	14
Figura2. Diagrama carga-flecha.....	15
Figura3. Diagrama carga-deformación.....	15
Figura 4. Diagrama tensión-deformación.....	16
Figura. 5 Curva carga-deformación.....	23
Figura. 6 Determinación de la tenacidad a flexotracción.....	23
Figura 7. Diagramas de carga-CMOD y FL.....	24
Figura 8. Diagrama carga-CMOD y Fj (j = 1, 2, 3, 4).....	25
Figura 9. Formas de rotura de una viga esbelta.....	36
Figura 10.: Fuerzas de transferencia de cortante en una viga con armadura de cortante.....	37
Figura 11. Tipos de fisuras.....	37
Figura 12. Tipos de fisuras en vigas sin armadura en el alma.....	38
Figura 13. Fisuras en vigas con escasa armadura de cortante.....	38
Figura 14. Fisuras en vigas con elevada armadura a cortante.....	38
Figura 15. Fisuras en vigas con inadecuados anclajes.....	39
Figura 16. Mecanismos básicos que se movilizan para resistir el esfuerzo cortante.....	39
Figura 17. Trayectoria de tensiones principales de compresión y tracción en una viga apoyada sometida a dos cargas.....	40
Figura 18. Ubicación de la carga.....	41
Figura 19. Cargas inferiores.....	41
Figura20. Esbeltez de la viga.....	41
Figura 21. Forma de la sección.....	42
Figura 22. Cargas indirectas.....	42
Figura 23. Situación de las cargas y los apoyos.....	49
Figura 24. Tipo de acero.....	57
Figura 25. Encofrado.....	62
Figura 26. Despiece armado.....	63
Figura 27. Ensayo de escurrimiento.....	68
Figura 28 – Configuración de la carga sobre la probeta.....	73
Figura 29. Situación de cargas y apoyos para ensayo a flexión en 4 puntos en viga.....	76
Figura 30 Instrumentación vigas.....	134
Figura 31. LVDT.....	134
Figura 32. DEMECS.....	134
Figura 33. Zona rotura viga V.1.1.....	136
Figura 34. Rotura viga V.1.1.....	136
Figura 35. Zona rotura viga V.1.3.....	137
Figura 36. Rotura viga V.1.3.....	138
Figura 37. Zona rotura viga V.1.5.....	139



Figura 38. Rotura viga V.1.5.....	139
Figura 39. Zona rotura viga V.1.6.....	142
Figura 40. Rotura viga V.1.6.....	142
Figura 41. Zona rotura viga V.1.7.....	144
Figura 42. Rotura viga V.1.7.....	144
Figura 43. Zona rotura viga V.1.2.....	147
Figura 44. Rotura viga V.1.2.....	147
Figura 45. Zona rotura viga V.1.4.....	149
Figura 46. Rotura viga V.1.4.....	149

LISTADO DE GRÁFICAS

Grafica 1. Granulometría grava.....	51
Grafica 2. Granulometría arenas 0/4 y 0/2.....	53
Grafica 3. Granulometría todos los áridos.....	54
Gráfica. 4. Tensión-flecha/CMOD V.1.1._P1.....	100
Gráfica. 5. Tensión-flecha/CMOD V.1.1._P2.....	100
Gráfica 6.Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.1_P1.....	100
Gráfica 7.Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.1_P2.....	100
Gráfica 8.Módulo deformación V.1.1_C1.....	101
Gráfica 9.Módulo deformación V.1.1_C2.....	101
Gráfica 10.Compresión V.1.1_C1.....	101
Gráfica 11.Compresión V.1.1_C2.....	101
Gráfica 12.Tenacidad V.1.1_C1.....	102
Gráfica 13.Tenacidad V.1.1_C2.....	102
Gráfica. 14. Tensión-flecha/CMOD V.1.3._P1.....	102
Gráfica. 15. Tensión-flecha/CMOD V.1.3._P2.....	102
Gráfica 16.Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.3_P1.....	103
Gráfica 17.Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.3_P2.....	103
Gráfica 18.Módulo deformación V.1.3_C1.....	103
Gráfica 19.Módulo deformación V.1.3_C2.....	103
Gráfica 20.Compresión V.1.3_C1.....	104
Gráfica 21.Compresión V.1.3_C2.....	104
Gráfica 22.Tenacidad V.1.3_C1.....	104
Gráfica 23.Tenacidad V.1.3_C2.....	104
Gráfica. 24. Tensión-flecha/CMOD V.1.5._P1.....	105
Gráfica. 25. Tensión-flecha/CMOD V.1.5._P2.....	105
Gráfica 26.Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.5_P1.....	105
Gráfica 27.Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.5_P2.....	105
Gráfica 28.Módulo deformación V.1.5_C1.....	106
Gráfica 29.Módulo deformación V.1.5_C2.....	106
Gráfica 30.Compresión V.1.5_C1.....	106
Gráfica 31.Compresión V.1.5_C2.....	106
Gráfica 32.Tenacidad V.1.5_C1.....	107
Gráfica 33.Tenacidad V.1.5_C2.....	107
Gráfica. 34. Comparativa V.1.1_V.1.3_V.1.5 Tensión-flecha.....	107
Gráfica. 35. Comparativa V.1.1_V.1.3_V.1.5 Tensión-CMOD.....	108
Gráfica. 36. Comparativa V.1.1_V.1.3_V.1.5 Tenacidad flexión.....	109
Gráfica. 37. Comparativa V.1.1_V.1.3_V.1.5 Compresión.....	110
Gráfica. 38. Comparativa V.1.1_V.1.3_V.1.5 Tenacidad probetas compresión.....	110

Gráfica. 39. Tensión-flecha/CMOD V.1.6._P1.....	111
Gráfica. 40. Tensión-flecha/CMOD V.1.6._P2.....	111
Gráfica 41.Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.6_P1.....	112
Gráfica 42.Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.6_P2.....	112
Gráfica 43.Módulo deformación V.1.6_C1.....	112
Gráfica 44.Módulo deformación V.1.6_C2.....	112
Gráfica 45.Compresión V.1.6_C1.....	113
Gráfica 46.Compresión V.1.6_C2.....	113
Gráfica 47.Tenacidad V.1.6_C1.....	113
Gráfica 48.Tenacidad V.1.6_C2.....	113
Gráfica. 49. Tensión-flecha/CMOD V.1.7._P1.....	114
Gráfica. 50. Tensión-flecha/CMOD V.1.7._P2.....	114
Gráfica 51.Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.7_P1.....	114
Gráfica 52.Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.7_P2.....	114
Gráfica 53.Módulo deformación V.1.7_C1.....	115
Gráfica 54.Módulo deformación V.1.7_C2.....	115
Gráfica 55.Compresión V.1.7_C1.....	115
Gráfica 56.Compresión V.1.7_C2.....	115
Gráfica 57.Tenacidad V.1.7_C1.....	116
Gráfica 58.Tenacidad V.1.7_C2.....	116
Gráfica. 59. Comparativa V.1.1_V.1.6_V.1.7 Tensión-flecha.....	116
Gráfica. 60. Comparativa V.1.1_V.1.6_V.1.7 Tensión-CMOD.....	117
Gráfica. 61. Comparativa V.1.1_V.1.6_V.1.7 Tenacidad flexión.....	117
Gráfica. 62. Comparativa V.1.1_V.1.6_V.1.7 Compresión.....	118
Gráfica. 63. Comparativa V.1.1_V.1.6_V.1.7 Tenacidad probetas compresión.....	118
Gráfica. 64. Tensión-flecha/CMOD V.1.2._P1.....	119
Gráfica. 65. Tensión-flecha/CMOD V.1.2._P2.....	119
Gráfica 66.Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.2_P1.....	119
Gráfica 67.Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.2_P2.....	119
Gráfica 68.Módulo deformación V.1.2_C1.....	120
Gráfica 69.Módulo deformación V.1.2_C2.....	120
Gráfica 70.Compresión V.1.2_C1.....	120
Gráfica 71.Compresión V.1.2_C2.....	120
Gráfica 72.Tenacidad V.1.2_C1.....	121
Gráfica 73.Tenacidad V.1.2_C2.....	121
Gráfica. 74. Tensión-flecha/CMOD V.1.4._P1.....	121
Gráfica. 75. Tensión-flecha/CMOD V.1.4._P2.....	121
Gráfica 76. Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.4_P1.....	122
Gráfica 77.Tenacidad bajo curva carga-fecha V.1.4_P2.....	122
Gráfica 78.Módulo deformación V.1.4_C1.....	122

Gráfica 79. Módulo deformación V.1.4_C2.....	122
Gráfica 80. Compresión V.1.4_C1.....	123
Gráfica 81. Compresión V.1.4_C2.....	123
Gráfica 82. Tenacidad V.1.4_C1.....	123
Gráfica 83. Tenacidad V.1.4_C2.....	123
Gráfica. 84. Comparativa V.1.1_V.1.2_V.1.4 Tensión-flecha.....	124
Gráfica. 85. Comparativa V.1.1_V.1.2_V.1.4 Tensión-CMOD.....	124
Gráfica. 86. Comparativa V.1.1_V.1.2_V.1.4 Tenacidad flexión.....	125
Gráfica. 87. Comparativa V.1.1_V.1.2_V.1.4 Compresión.....	126
Gráfica. 88. Comparativa V.1.1_V.1.2_V.1.4 Tenacidad probetas compresión.....	126
Gráfica. 89. Comparativa V.1.1_V.1.5_V.1.6_V.1.2 Tensión-flecha.....	127
Gráfica. 90. Comparativa V.1.1_V.1.5_V.1.6_V.1.2 Tensión-CMOD.....	128
Gráfica. 91. Comparativa V.1.1_V.1.5_V.1.6_V.1.2 Tenacidad flexión.....	129
Gráfica. 92. Comparativa V.1.1_V.1.5_V.1.7_V.1.4 Compresión.....	130
Gráfica. 93. Comparativa V.1.1_V.1.5_V.1.7_V.1.4 Tenacidad probetas compresión.....	131
Gráfica 94. Tensión-flecha viga V.1.1.....	135
Gráfica 95 LVDT viga V.1.1.....	135
Gráfica 96. Tensión-flecha viga V.1.3.....	137
Gráfica 97. Tensión-flecha viga V.1.5.....	138
Gráfica 98 LVDT viga V.1.5.....	139
Gráfica 99 LVDT viga V.1.5.....	139
Gráfica 100. Comparativa vigas V.1.1_V.1.3_V.1.5 Tensión-flecha.....	140
Gráfica 101. Tensión-flecha viga V.1.6.....	141
Gráfica 102 LVDT viga V.1.6.....	141
Gráfica 103 LVDT viga V.1.6.....	141
Gráfica 104. Tensión-flecha viga V.1.7.....	143
Gráfica 105 LVDT viga V.1.7.....	143
Gráfica 106 DEMECS viga V.1.7.....	143
Gráfica 107. Comparativa vigas V.1.1_V.1.6_V.1.7 Tensión-flecha.....	145
Gráfica 108. Tensión-flecha viga V.1.2.....	146
Gráfica 109 LVDT viga V.1.2.....	146
Gráfica 110 DEMECS viga V.1.2.....	146
Gráfica 111. Tensión-flecha viga V.1.4.....	148
Gráfica 112 LVDT viga V.1.4.....	148
Gráfica 113 DEMECS viga V.1.4.....	148
Gráfica 114. Comparativa vigas V.1.1_V.1.2_V.1.4 Tensión-flecha.....	150
Gráfica 115. Comparativa vigas V.1.1_V.1.5_V.1.7_V.1.4 Tensión-flecha.....	151
Gráfica 116. Comparativa vigas V.1.1_V.1.3_V.1.6_V.1.2 Tensión-flecha.....	152
Gráfica 117. Comparativa vigas V.1.1_V.1.3_V.1.5_V.1.6_V.1.7_V.1.2_V.1.4 Tensión-flecha.....	153

