

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA MEJORA DE ADHERENCIA DE LAS FIBRAS POLIMÉRICAS EN MICRO HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES

ALUMNA: ARRÉS ARRÉS, LORENA

**TUTORES: ALBIOL IBÁÑEZ, JOSÉ RAMÓN
GARCÍA BALLESTER, LUIS**



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN



ÍNDICE

1_ Introducción.....	Pág. 5
1.1_ Hormigón autocompactante (HAC).....	Pág. 6
1.1.1_ Propiedades del HAC.....	Pág.8
1.1.2_ Precauciones a tener en cuenta a la hora de utilizar HAC....	Pág.10
1.1.3_ Apariencia y acabado.....	Pág.10
1.1.4_ Principales defectos superficiales y análisis de sus causas.....	Pág.11
1.2_ Hormigones con fibras (HRF).....	Pág.15
1.2.1_ Resistencia a flexo-tracción residual.....	Pág. 17
1.3_ Fibras de polipropileno.....	Pág. 19
1.4_ HAC con fibras.....	Pág.21
1.4.1_ Curado del hormigón.....	.Pág.21
1.4.2_ Resistencia al fuego tras la introducción de fibras.....	Pág.22
2_ Objetivos.....	.Pág.24
3_ Estado del arte.....	Pág.25
3.1_ Materiales.....	Pág.25
3.1.1_ Áridos.....	Pág.25
3.1.1.1_ Arena	
3.1.1.2_ Árido grueso	
3.1.1.3_ Filler mineral	
3.1.2_ Agua.....	Pág. 29
3.1.3_ Cemento.....	Pág. 29
3.1.4_ Aditivos.....	Pág.30

3.1.4.1_ Superplastificante	
3.1.4.2_ Moduladores de viscosidad o cohesionantes	
3.1.4.3_ Otros aditivos	
3.1.5_ Fibras.....	Pág.36
3.2_ Dosificación autocompactante + fibras.....	Pág.58
3.3_ Control de calidad. EHE.....	Pág.68
3.3.1_ Ensayos en estado fresco.....	Pág. 71
3.3.1.1_ Ecurrimiento (slumpflow).....	Pág. 71
3.3.1.2_ Ecurrimiento con Anillo Japonés.....	Pág.74
3.3.1.3_ Caja L.....	Pág.76
3.3.1.4_ Caja U.....	Pág.78
3.3.1.5_ Embudo V.....	Pág.79
3.3.1.6_ Otros.....	Pág.81
3.3.2_ Ensayos en estado endurecido.....	Pág.85
3.3.2.1_ Resistencia a compresión.....	Pág.86
3.3.2.2_ Resistencia a tracción directa.....	Pág.86
3.3.2.3_ Módulo de elasticidad.....	Pág.87
3.3.2.4_ Retracción.....	Pág.88
3.3.3_ Eigencias de autocompactabilidad.....	Pág. 89
3.4_ Puesta en obra. EHE.....	Pág. 92
3.5_ Acabados HAC.....	Pág.95
4_ Programa experimental.....	Pág.97
4.1_ Planteamiento del programa experimental	Pág.97
5_ Metodología.....	Pág. 101
5.1_ Materiales empleados en este estudio.....	Pág. 101

5.1.1_ Áridos.....	Pág. 101
5.1.2_ Agua.....	Pág.102
5.1.3_ Cemento.....	Pág.103
5.1.4_ Aditivos.....	Pág.104
5.1.5_ Finos.....	Pág.106
5.1.6_ Fibras.....	Pág.107
5.2_ Metodología de ensayo.....	Pág.109
5.2.1_ Realización hormigón.....	Pág.109
5.2.1.1_ Proceso.....	Pág.110
5.2.2_ Estado endurecido.....	Pág.117
5.2.2.1_ Compresión.....	Pág.118
5.2.2.2_ Flexión.....	Pág.119
6_ Resultados y análisis.....	Pág.122
6.1_ Dosificaciones realizadas.....	Pág.122
6.1.1_ Dosificación Amasada 1.....	Pág.122
6.1.2_ Dosificación Amasada 2.....	Pág.123
6.1.3_ Dosificación Amasada 3.....	Pág.124
6.1.4_ Dosificación Amasada 4.....	Pág.125
6.1.5_ Dosificación Amasada 5.....	Pág.126
6.1.6_ Dosificación Amasada 6.....	Pág.127
6.1.7_ Dosificación Amasada 7.....	Pág.128
6.1.8_ Dosificación Amasada 8.....	Pág.129
6.1.9_ Dosificación Amasada 9.....	Pág.130
6.1.10_ Dosificación Amasada 10.....	Pág.131

6.1.11_ Dosificación Amasada 11.....	Pág.132
6.1.12_ Dosificación Amasada 12.....	Pág.134
6.1.13_ Dosificación Amasada 13.....	Pág.135
6.1.14_ Dosificación Amasada 14.....	Pág.136
6.1.15_ Dosificación Amasada 15.....	Pág.137
6.1.16_ Dosificación Amasada 16.....	Pág.138
6.1.17_ Dosificación Amasada 17.....	Pág.139
6.1.18_ Dosificación Amasada 18.....	Pág.140
6.1.19_ Dosificación Amasada 19.....	Pág.141
6.1.20_ Dosificación Amasada 20.....	Pág.142
6.1.21_ Dosificación Amasada 21.....	Pág.143
6.2_ Análisis de los resultados a 28 días	Pág.144
6.2.1_Patrón 1. 300.....	Pág.146
6.2.2_Patrón 2. 350.....	Pág.148
6.2.3_Patrón 3. 400.....	Pág. 150
6.3_ Análisis general de los resultados.....	Pág.152
7_ Conclusiones.....	Pág.155
8_ Bibliografía.....	Pág.156
8.1_ Referencias.....	Pág.156
8.2_ Normativas.....	Pág.157

1_ INTRODUCCIÓN

En primer lugar, cabe destacar, que el estudio está basado en el HAC, pero con un tamaño máximo de árido de 2mm, por lo que a partir de este momento, nos referiremos a él como Micro Hormigón Autocompactante (MHA).

En este proyecto se estudia la posibilidad de la introducción de fibras poliméricas en el micro hormigón autocompactante aditivado con un promotor de adherencia. Además se analizará como le afectan dichas fibras a sus propiedades y a su comportamiento frente a las cargas.

Estudiaremos el Hormigón Autocompactante como tal, su introducción en el mundo de la construcción y la evolución del mismo con el paso de los años. También hablaremos de sus características y sus propiedades, su proceso de fabricación y materiales a emplear, su uso en la construcción, ventajas y desventajas.

Seguidamente hablaremos de las fibras poliméricas, de sus propiedades y características.

Continuaremos comentando la introducción de estas fibras en los hormigones convencionales, y finalmente estudiaremos la introducción de estas fibras en los Micro Hormigones Autocompactantes, consecuentemente, en los hormigones autocompactantes.

Además, para la realización de este estudio, se realizarán las amasadas necesarias y los ensayos pertinentes en el laboratorio, para poder así analizar la trabajabilidad y características de este producto.



Imagen 1.1 Estado fresco MHAC



Imagen 1.2 Estado endurecido MHAC

1.1_ MICRO HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE:

Como ya se ha explicado con anterioridad, este tipo de Micro Hormigón proviene de la utilización de un tamaño máximo de árido de 2mm en la realización de HAC (Hormigón Autocompactante), por lo que las principales características son coincidentes.

El Micro Hormigón Autocompactante se puede definir como un hormigón cuya característica principal es la capacidad de fluir y rellenar correctamente el volumen previsto a hormigonar sin ayuda de ningún método de compactación, sin energía externa, es decir, por la acción de su propio peso. Es capaz de rellenar cada rincón del encofrado, pasando por las armaduras, sin que se produzca efecto tamiz, presentando a su vez la suficiente cohesión para que se produzca la segregación del árido grueso o exudación.

Esta ventajosa propiedad se consigue mediante una formulación especial en comparación con la del hormigón vibrado, que le confiere la fluidez y cohesión adecuadas para evitar segregación de la mezcla, permitir una compactación adecuada y favorecer su movilidad.

Sin duda alguna, los aditivos superplastificantes, son los que han permitido el desarrollo del Micro Hormigón Autocompactante.

Paralelamente, el empleo del Micro Hormigón Autocompactante (HAC) reduce el coste energético en medios de compactación y también la contaminación acústica correspondiente, mejorando así el entorno de trabajo. Todo ello se ve acompañado de una serie de ventajas adicionales, entre ellas su homogeneidad y fluidez a la hora de la puesta en obra que permite obtener superficies con un color bastante homogéneo y que reflejan exactamente las formas de los encofrados.

Cabe destacar, que los primeros desarrollos sobre el HAC, fueron desarrollados por el profesor Okamura en la Universidad de Tokio (Japón) en 1986, nombrándolo en primer lugar "High Performance Concrete" y años más tarde, "SelfCompacting Concrete" (Hormigón Autocompactante). El planteamiento de su realización, fue con la intención de solucionar los problemas de durabilidad en las estructuras de hormigón armado, que se habían detectado y que se atribuían a una disminución en los niveles de calidad de mano de obra especializada para la ejecución de los procesos de compactación. El objetivo era crear un producto que garantizase la compactación, sin que el factor humano fuera una variable capaz de afectar al producto final.

A partir de ahí, los principales trabajos de investigación sobre este tema fueron llevados a cabo por Ozawa y Maekawa (Okamura 1999) en la Universidad de Tokio. El punto clave de estos estudios era la trabajabilidad y la homogeneidad del hormigón.

La primera obra donde se empleó un HAC fue realizada en Japón en 1988. Este hormigón funcionó satisfactoriamente desde el punto de vista de la retracción, calor de hidratación, densidad después del endurecimiento y otras propiedades.

Inicialmente los HAC fueron tratados simplemente como un hormigón especial de alto desempeño, y su utilización se restringía a las grandes empresas de construcción japonesa.

Años más tarde, se pudo observar un gran aumento del interés y de la utilización de los HAC.

En el último congreso RILEM realizado en Chicago en el 2005 se pudo observar que el desarrollo y la utilización del HAC siguen una tendencia creciente.

El Micro Hormigón Autocompactante ya no es un secreto y los investigadores siguen centrando cada vez más sus investigaciones en el comportamiento reológico y en las propiedades mecánicas de estos hormigones.

Los Micro Hormigones Autocompactantes se incluyen entre los de hormigones especiales de altas prestaciones pensados y fabricados para cumplir determinados objetivos que están más allá de las capacidades de los micro hormigones convencionales. Sus principales características se presentan en el estado fresco, y se dividen en tres bloques descritos a continuación:

- Capacidad de paso:

Se define como la capacidad que el micro hormigón debe tener para pasar por sitios estrechos sin que el contacto entre los áridos cause el bloqueo de la mezcla.

La obtención de esta propiedad se da incrementando la fluidez de la pasta con la utilización de superplastificantes, reduciendo el volumen de árido grueso de la mezcla y ajustando el diámetro máximo del árido en función de los espacios por donde el micro hormigón debe pasar. Así, la geometría de la pieza a hormigonar y la distribución de las armaduras son los principales factores a tenerse en cuenta.

En la siguiente imagen (figura 1.1), se puede observar como funciona el mecanismo de bloqueo.

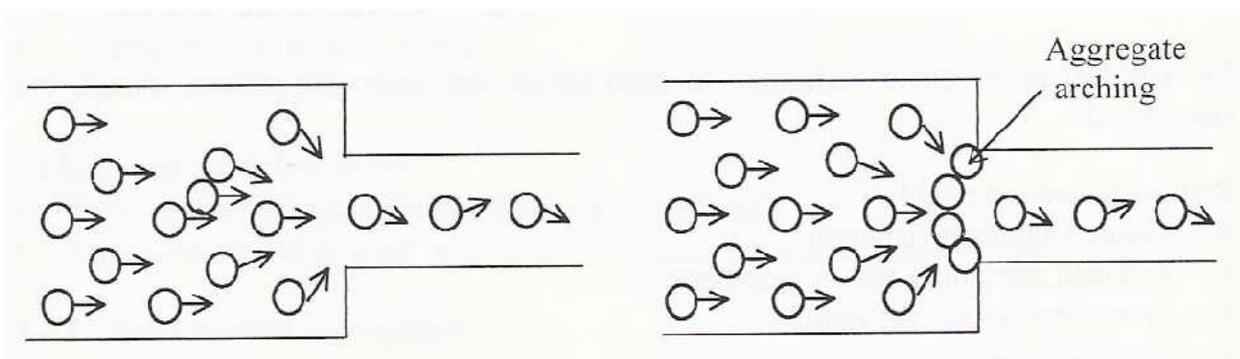


Figura 1.1. Mecanismo de bloqueo (Skarendahl et al., 2000) [2]

- Capacidad de llenado:

Es la capacidad que el micro hormigón debe tener a la hora de fluir dentro del encofrado rellenando todas las superficies. Por un lado esta propiedad garantiza la calidad del acabado, de manera que este presentará una superficie lisa, con color homogéneo y libre de coqueras. Por otra parte, las armaduras deben estar perfectamente recubiertas evitando la ocurrencia de bolsas de aire en la parte inferior de las mismas.

- Resistencia a la segregación:

Esta propiedad está relacionada con la estabilidad del micro hormigón. En un Micro Hormigón Autocompactante, la mezcla debe permanecer homogénea durante y tras el proceso de hormigonado sin que ocurra separación de los áridos o exudación.

Este factor influye directamente sobre las dos propiedades citadas anteriormente afectando la calidad final de la pieza hormigonada. En general se busca la estabilidad de la mezcla por medio de la inclusión de filleres o por la utilización de agentes modificadores de la viscosidad (AMV). La utilización de cualquiera de ellos tiende a incrementar la viscosidad de la pasta evitando la segregación.

En el caso de que el micro 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.

1.1.1_ PROPIEDADES DEL MICRO HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE:

- Durabilidad:

La durabilidad del micro hormigón está íntimamente relacionada con la permeabilidad de su superficie, que debe limitar la penetración de sustancias que puedan provocar deterioros en el armado. La ausencia de vibración y el mayor contenido en finos de buena calidad confieren una mayor compacidad a la estructura granular. Al tener menos porosidad, el MHAC permite una mayor protección de los agentes externos hacia el interior, como cloruros y sulfatos, de esta manera no producen el deterioro de las armaduras y se evita la formación de manchas de óxido y eventualmente la rotura de la superficie de cubrición por efecto del aumento del volumen del acero oxidado. Esta cualidad le da especial valor en ambientes agresivos. Además, con los cementos adecuados, SR o MR, se le puede dar aún más protección frente a estos ataques.

- Fluidez y homogeneidad:

Como ya se ha comentado, la naturaleza fluida de este micro hormigón le permite expandirse por el encofrado de manera eficaz sin necesidad de mano

de obra, pudiendo llenar encofrados con geometrías complejas y que necesiten un acabado excepcional.

· Armaduras densas:

El micro hormigón autocompactante permite rellenar huecos en armaduras densas sin correr el riesgo de obstrucciones o la imposibilidad de no poder vibrarlo una vez introducido. Esta cualidad le permite realizar piezas de complejidad superior, como losas de hormigón de grandes luces, forjados reticulares encepados de grandes puentes o edificaciones en altura.

· Prefabricados:

Cada vez se utilizan más elementos prefabricados en los proyectos arquitectónicos por su alta calidad de acabado y la posibilidad de realizar la pieza en taller, pudiendo realizar tratamientos posteriores difícilmente aplicables en obra (pulidos, tratamiento del ácido, etc.). Al igual que para el hormigón in situ, el MHAC permite en este caso un perfecto acabado de las superficies y unas correctas prestaciones estructurales.

· Encofrados de grandes muros:

Es posible hormigonar muros de hasta 10 m de longitud y 3-4 m de altura a través de una sola boca inferior de hormigonado. Esta técnica, que sólo es posible con un hormigón fluido, evita la oclusión de burbujas de aire dentro del hormigón, puesto que éste se hormigona de abajo a arriba, ocupando el volumen del encofrado poco a poco y asegurándose la no disgregación por la caída libre del hormigón desde la parte alta del encofrado.

· Comportamiento Reológico:

La reología es la disciplina que estudia la deformación y flujo de materiales.

Los micro hormigones son materiales compuestos por un líquido viscoso con partículas sólidas en suspensión que en escala macroscópica puede fluir como un líquido (Ferraris 1999).

El concepto reológico del esfuerzo de corte inicial que el material necesita para empezar a fluir está íntimamente relacionado con el concepto de la tixotropía, pero también con el de la consistencia, entendida como la resistencia del hormigón a fluir.

Por ello la mayoría de los autores están de acuerdo en que el objetivo a la hora de conseguir un buen MHAC es buscar un micro hormigón que presente el menor esfuerzo inicial posible que se debe sobrepasar para que el fluido se ponga en movimiento.

Conseguir al mismo tiempo micro hormigones con baja viscosidad con la finalidad de lograr que, además de ser autocompactantes, tengan un flujo rápido suele ir acompañado de un aumento del riesgo de segregación. Por ello se prefiere buscar hormigones con viscosidad moderada.

1.1.2_ PRECAUCIONES A TENER EN CUENTA A LA HORA DE UTILIZAR EL MHAC

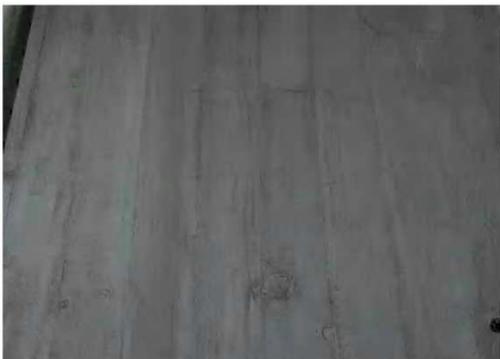
El micro hormigón autocompactante está especialmente indicado para la realización de micro hormigones vistos, donde la apariencia y el acabado final tengan un peso significativo.

Los encofrados juegan un papel fundamental en el aspecto formal de los micro hormigones vistos. Es esencial la elección del tipo y material del encofrado, que vendrá determinado por el modo de puesta en obra, por la reutilización del molde y sobre todo por el aspecto y la forma a reproducir.

Como normal general, el encofrado debe de ser estanco con el fin de evitar las pérdidas de lechada que puedan provocar una irregularidad del paramento, bien por retracción del hormigón, bien por la creación de surcos o manchas a modo de correnterías.

Existen muchos tipos de encofrados; para los micro hormigones autocompactantes lo más recomendable es que sean rígidos, de cara a evitar posibles deformaciones por las presiones hidrostáticas que se puedan crear. Para hormigones arquitectónicos, los que proporcionan un mejor acabado son los sintéticos, poliméricos o fenólicos, que permiten un buen acabado y no transfieren suciedades, manchas por óxidos o desencofrantes dañinos debido a la naturaleza del propio material y a su baja reutilización.

1.1.3_ APARIENCIA Y ACABADO DE LA SUPERFICIE



El acabado final del MHAC, dependerá de las precauciones anteriormente citadas. Cumpliendo con todos los procesos y siendo cuidadosos, la apariencia mejorará con respecto a la de un hormigón convencional:

- El color será en general más uniforme. Será más fácil evitar los defectos de las juntas y pasadores.

Imagen 1.3 Acabados.(HAC. BASF) [3]

- Los ángulos en los bordes y esquinas pueden llegar a ser agudos si el encofrado está bien diseñado.

- Las coqueras están siempre presentes, pero en el MHAC pueden llegar a minimizarse de manera muy considerable.

- Las oclusiones de aire bajo las partes horizontales del encofrado serán mucho más limitadas en número y tamaño, siempre que el vertido del hormigón se haya hecho de manera apropiada.

Por tanto, el MHAC minimiza de manera considerable todos los defectos del hormigón convencional, mejorando sustancialmente el aspecto final del material y la durabilidad del mismo.

En la imagen anterior (imagen 1.3), se muestra el acabado de un paramento vertical, realizado con HAC, aparentemente homogéneo y correcto. Se puede observar como la superficie es considerablemente lisa, nada rugosa, y con un color bastante uniforme.

1.1.4_ PRINCIPALES DEFECTOS SUPERFICIALES Y ANÁLISIS DE SUS CAUSAS

La falta de cuidado y precisión en alguno de los procesos de elaboración y puesta en obra puede crear defectos superficiales indeseados. Algunos de estos defectos son específicos del MHAC, aunque en muchos casos son comunes a los hormigones convencionales.

· Coqueras y burbujas:



Imagen 1.4 Coqueras y burbujas.

Las coqueras se forman cuando pequeñas burbujas de aire, agua o restos de aceite u otros productos del desencofrante quedan atrapados en el proceso del hormigonado. Este fenómeno depende de la cohesión del hormigón, de la calidad/tipo de encofrado, y del tipo de desencofrante. El aire saldrá más fácilmente del hormigón si el ritmo de vertido en el encofrado se realiza lentamente. El desplazamiento horizontal que realiza el MHAC por su propiedad expansiva dentro de un encofrado alargado también ayuda a expulsar el aire.

En la imagen 1.3, se observa los agujeros provocados por las burbujas de aire que han quedado al hormigonar.

Se recuerda q este tipo de micro hormigones no precisa de vibración, y por tanto es recomendable ser muy cuidadoso para que este tipo de problema no ocurra.

· Oquedades:



Imagen 1.5 Oquedades (Piel de hormigón) [4]

Se pueden conseguir por una pérdida de lechada en el encofrado, pero es más habitual que ocurra por la poca capacidad de paso del hormigón o el bloqueo del árido grueso en zonas de paso estrecho. Esto puede pasar en los casos siguientes:

- Mala calidad de la mezcla.
- Alta viscosidad.
- Tamaño máximo del árido demasiado grande.
- Poca cantidad de cemento o demasiado árido.

En la imagen 1.4 se puede observar el acabado de una superficie bastante irregular debido a la pérdida de lechada en el encofrado.

- Variaciones de color:

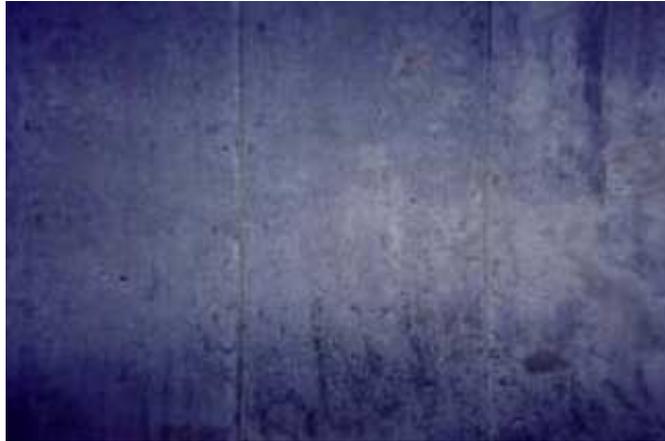


Imagen 1.6. Variaciones de color

Las manchas verticales (correnterías) en el MHAC no son habituales y suelen estar relacionadas con una pérdida de lechada (imagen 1.5). La lechada tiende a acumularse en los paramentos verticales de los encofrados y fluir hacia arriba, dejando líneas de corriente visibles en el hormigón endurecido.

Las causas pueden ser varias:

- Alta relación agua/cemento.
- Viscosidad muy baja.
- Bajas temperaturas:
- Desigual secado de la superficie.
- Excesiva aplicación o mala elección del desencofrante.
- Diferencias entre los distintos hormigones que se dosifican.
- Fisuración de la superficie por retracción:

Al igual que el micro hormigón vibrado tradicional, se pueden crear fisuras por retracción. Éstas pueden llegar a ser bastante largas, pero habitualmente son poco profundas, por lo que pueden ser reparadas fácilmente con la paleta antes de que el hormigón endurezca.



a) b)

Imagen 1.7 a) y b) Fisuras en el micro hormigón

Cortes en las zonas de unión de distintos suministros:

Debido a endurecimientos superficiales muy altos y rápidos, que no permite que las tongadas se cosan entre si.

Malos acabados superficiales de planeidad e irregularidad:

Se pueden producir, entre otros factores, por deformaciones de los moldes, mal cimbrado o desencofrado excesivamente rápido.

1.2_ HORMIGONES CON FIBRAS (HRF)

La incorporación de fibras a materiales frágiles o quebradizos, constituye una técnica utilizada desde hace ya miles de años.

En 1911, Graham utilizó por primera vez fibras de acero para incrementar la resistencia y estabilidad de un hormigón armado convencional. Sin embargo, los primeros estudios de tipo científico sobre el comportamiento de estos materiales, se debe a Griffith, en 1920, a los que siguieron en 1963 los de Romualdi y Batinson y Romualdi y Mandel.

Hoy en día son múltiples las aplicaciones que se han hecho de este material en países como Estados Unidos, Inglaterra, Francia y España.

Los factores fundamentales de los que depende el comportamiento de este compuesto son las propiedades físicas y mecánicas de las fibras y de la matriz, de la adherencia de ambos y de la compatibilidad de tensiones entre fibras y matriz.



Imagen 1.8 Hormigón con fibras. (ItalcementiGroup) [5]

Para mejorar algunas prestaciones, se pueden emplear fibras en el hormigón, las cuales pueden modificar algunas de sus propiedades.

La adición de fibras es admisible en hormigones en masa, armados o pretensados, por lo que las fibras podrán estar presentes tanto con armaduras pasivas como activas. La adición de las fibras se puede hacer con cualquiera de los diversos sistemas, sancionados por la práctica, de incorporación de las fibras al hormigón y, en el caso de que así no se hiciera, debe explicitarse el sistema utilizado.

En la imagen 1.8 observamos un hormigón con fibras ya endurecido, en el que las fibras quedan claramente vistas debido a un corte o sección de éste.

La aplicación de estos hormigones puede tener tanto finalidad estructural como no estructural. La vertiente estructural puede implicar la sustitución parcial o total de armadura en algunas aplicaciones. El empleo de fibras en el hormigón tiene finalidad estructural cuando se utiliza su contribución en los cálculos relativos a alguno de los estados límite últimos o de servicio. Puede incluirse fibras en el hormigón con otros objetivos como la mejora de la resistencia al fuego o el control de la fisuración. En estos casos se considerará que las fibras no tienen función estructural.

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

La incorporación de fibras con función estructural favorece la ductilidad y, consecuentemente, la posibilidad de redistribución de esfuerzos.

Además, dado el incremento de tenacidad en todas direcciones que proporciona, incrementa la aplicabilidad de los métodos de cálculo plástico, que permiten optimizar la solución al plantear de forma coherente el cálculo estructural y el cálculo a nivel sección. Ello puede ser aún más evidente en el caso de cálculo de placas por métodos de cálculo de líneas de rotura.

Los momentos plásticos o últimos se obtendrán de acuerdo con el Artículo 39.5 y, para placas macizas, se considerará que las líneas de rotura tienen suficiente capacidad de rotación si la profundidad de la fibra neutra en ELU de flexión simple es menor que $0,3 d$.

Las evaluaciones estructurales a estos efectos deben hacerse por medio de ensayos que representen las condiciones reales.

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

Al usar estas fibras se hace innecesaria la utilización de la malla de reparto, que exige la Instrucción, a situar en medio de los recubrimientos superiores a 50mm.

Además, las fibras mejoran la resistencia a la erosión.

En resumen la incorporación de las fibras al hormigón:

- No modifica:

- Peso específico del mismo.
- Coeficientes parciales de seguridad.

- Si modifica:

- Comportamiento no lineal (ductilidad).
- Idoneidad de los métodos de cálculo plástico.
- Aumenta anchura de las bielas de compresión (bielas y tirantes).

1.2.1_ RESISTENCIA A FLEJO-TRACCIÓN RESIDUAL

En gráfico 1.1, se muestran los resultados a flexo-tracción de un hormigón convencional (scc), un hormigón con un porcentaje de fibras (sccfms1), y otro hormigón con un porcentaje de fibras superior al anterior (sccfms2). En él se observa como el hormigón sin fibras rompe frágilmente tras superar su carga admisible, mientras que a medida que aumentamos el porcentaje de fibras el hormigón se vuelve menos frágil deformando previamente a la rotura.

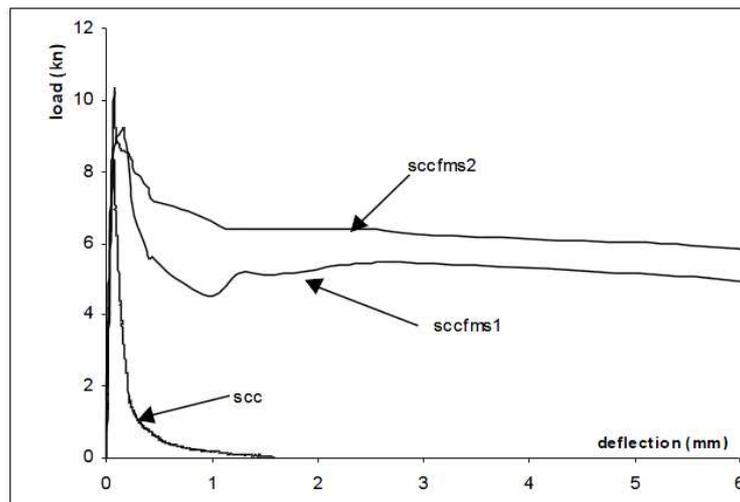


Grafico 1.1 "Resistencia a flexo-tracción"

USOS:

- Soleras y pavimentos industriales

La siguiente imagen (imagen 1.8), muestra una solera realizada con hormigón y fibras, se observa el hormigón aún en estado fresco y su puesta en obra.



Imagen 1.9 Solera hormigón con fibras. (Hormigones Reforzados con fibras. E. Torroja) [6]

- Capas de compresión de forjados.

- Túneles (imagen 1.10)



Imagen 1.10 "Túnel hormigón con fibras" (A.Aguado) [7]

- Placas de contención de tierras (Imagen 1.11)



Imagen 1.11 Trozo de placa de contención de tierras. Hormigón con fibras. (A. Aguado) [7]

1.3_ FIBRAS DE POLIPROPILENO

Estas fibras sintéticas están formadas por diferentes materiales poliméricos extrusionados y luego cortados. Éstas pueden adicionarse en forma homogénea a hormigones y morteros.

Las fibras de polipropileno se empezaron a utilizar alrededor de 1965, para construcciones sometidas a altas presiones debido al viento (estados de carga dinámicos). El polipropileno es un material barato, abundante y fácilmente trabajable, siendo los problemas de producción de las fibras más bien pocos, lo cual en conjunto hacen que las fibras de polipropileno sean un producto altamente competitivo en el mercado.

La adición de fibras es admisible en hormigones en masa, armados o pretensados, por lo que las fibras podrán estar presentes tanto con armaduras pasivas como activas. La adición de las fibras se puede hacer con cualquiera de los diversos sistemas, sancionados por la práctica, de incorporación de las fibras al hormigón y, en el caso de que así no se hiciera, debe explicitarse el sistema utilizado.

La aplicación de estos hormigones puede tener tanto finalidad estructural como no estructural. La vertiente estructural puede implicar la sustitución parcial o total de armadura en algunas aplicaciones. El empleo de fibras en el hormigón tiene finalidad estructural cuando se utiliza su contribución en los cálculos relativos a alguno de los estados límite últimos o de servicio. Puede incluirse fibras en el hormigón con otros objetivos como la mejora de la resistencia al fuego o el control de la fisuración. En estos casos se considerará que las fibras no tienen función estructural.

Las fibras de polipropileno se obtienen en forma de filamentos o de redes plegadas (fibriladas). La longitud de las fibras oscila entre 25 y 75 mm. Estas fibras tienen un precio reducido.

El bajo módulo de elasticidad del polipropileno da lugar a que la resistencia a flexión del hormigón no aumente de forma sustancial y a que las deformaciones postfisuración del mismo sean muy elevadas.

Cuando se emplean monofilamentos de polipropileno en piezas sometidas a flexotracción la adherencia entre éstos y la matriz se pierde como consecuencia del alto valor del coeficiente de Poisson del plástico, produciéndose deslizamientos y grandes deformaciones y haciendo que, en ocasiones, la resistencia a tracción y flexotracción no quede mejorada e incluso que disminuya con respecto al del hormigón sin fibras. Este inconveniente se elimina empleando fibras en forma de redes que se abren en el hormigón y utilizando proporciones grandes de fibras. Con un 0,6% de contenido de fibras puede conseguirse, a 7 días, un incremento de la resistencia a flexión de un 25%. La resistencia a compresión, en general, disminuye y tanto más cuanto mayor es la dosificación de fibras y la longitud de las mismas.

La resistencia al impacto de estos hormigones queda muy mejorada llegando a ser de dos a diez veces superior a la del mismo hormigón sin fibras.

Las fibras de polipropileno se mezclan sin problemas en hormigoneras tradicionales no existiendo el peligro de formación de erizos o bolas cuando se utilizan grandes dosificaciones.

La consistencia de los hormigones reforzados con fibras de polipropileno aumenta en proporción al contenido de fibras; sin embargo, se ha observado que, al igual que ocurre con las fibras metálicas, mezclas que dan asiento cero en el cono de Abrams, son dóciles al ponerlas en obra mediante vibración.

Las fibras de polipropileno se prestan muy bien a su empleo en hormigones bombeado y gunitados.

Estas fibras poseen las ventajas de no ser atacadas por los álcalis y de que no se corroen; sin embargo, sus inconvenientes principales radican en su bajo módulo de elasticidad que las hace muy deformables y en la pobre adherencia que presentan con el hormigón especialmente, cuando se emplean en forma de filamentos.

1.4_ MHAC CON FIBRAS

Este tipo de hormigones aportan las características mecánicas de las fibras metálicas, tanto en resistencia a tracción como a flexión y el mejor comportamiento en cuanto al las fisuras por retracciones superficiales. Hay que tener en cuenta que el añadir estas fibras significa que parte de la lechada se tiene que ocupar de cubrir la superficie específica de las mismas, con lo cual deberemos desarrollar unas mezclas con mayores contenidos de aguas y cemento finos y, por supuesto, de aditivos. Además, debemos tener especial cuidado con que no se formen agrupaciones de fibras, habitualmente llamados "erizos", ya que en general las pastas autocompactantes favorecen algo más su formación.

En cuanto a MHAC con fibras de polipropileno para controlar retracciones, en las dosificaciones adecuadas no deben ocasionar otro problema que una bajada en la consistencia que se debe paliar con una sobredosificación controlada.

1.4.1_ CURADO DEL MICRO HORMIGÓN

- Sin refuerzo:

El micro hormigón fresco inmediatamente comienza a hidratarse y a perder agua a través de sistemas capilares que ocasiona la migración de humedad a la superficie exterior. A medida que el agua migra y se evapora van quedando espacios vacíos y la masa del hormigón comienza a retraerse. Una rápida evaporación podría ocasionar esfuerzos de retracción que llegan a exceder la resistencia a la tensión del hormigón fresco. En este punto, las micro-grietas que se forman producen un debilitamiento a través de toda la losa de hormigón. A medida que la matriz continúa retrayéndose las micro-grietas se propagan y se tornan cada vez más grandes y visibles. Las grietas de cualquier dimensión, no sólo reducen la calidad y durabilidad del hormigón sino también lo hacen estéticamente inaceptable.

- Con malla soldada:

Históricamente las mallas soldadas han sido utilizadas como refuerzo secundario para controlar agrietamiento por retracción. Sin embargo, en la práctica, la colocación o suspensión de la malla en el lugar indicado es raramente lograda. Aunque se logre colocar correctamente, las mallas solamente mantienen el hormigón unido después que éste se ha agrietado. El refuerzo secundario de un solo plano no hace nada en absoluto para retardar o inhibir las micro grietas que ocurren en el proceso normal de curado del hormigón, tampoco afecta la etapa de evaporación.

- Con Fibras:

La presencia de fibra soporta a la mezcla homogénea y funciona como millones de puentes que distribuyen uniformemente los esfuerzos internos de retracción que tratan de separar la matriz. Estas mismas fibras interceptan la

propagación de las micro-grietas y paralizan su crecimiento. Las fibras interrumpen la acción capilar de la humedad y por ende permiten un curado más lento.

Al mezclarse la fibra a una matriz de hormigón, la curva carga-deformación presenta un incremento en la capacidad de carga, así mismo, se mejora el post-agrietamiento permitiendo sostener cargas hasta valores altos de deformación, dando como resultado, mayor ductilidad en el elemento. En un hormigón sin fibras inicialmente la curva es lineal, luego se presenta un brusco descenso en la capacidad de carga, fallando súbitamente el material.

El incremento de resistencia a la fatiga (que tiene directa relación con la durabilidad), resistencia al impacto y reducción de la permeabilidad, contribuyen a una mayor duración del hormigón beneficiando a largo plazo los costos asociados por mantenimiento.

La distribución tridimensional de las mini-redes, conlleva directamente a la reducción en el agrietamiento del hormigón y consecuentemente a una modificación en su comportamiento; en efecto, en la fase retracción plástica se produce un gran número de micro grietas.

Cuando se somete el hormigón a un esfuerzo, las micro grietas van evolucionando haciéndose mayores y enlazándose unas con otras. Al continuar ejerciéndose la carga, algunas de estas grietas comienzan a hacerse inestables y a fallar traspasando el hormigón de un lado a otro, las fibras definitivamente interrumpen y estabilizan las micro grietas.

La resistencia al impacto (capacidad de absorber energía), como una forma de medir la degradación del micro hormigón resultante de una carga puntual, refleja las características de pegado de las fibras al mantener unidos los segmentos fracturados de un hormigón originalmente sano. Las modificaciones en la relación del concreto, la propiedad de ser químicamente inerte, (además de antialcalino y no corrosivo), y la reducción en el fraguado, permiten la aplicación de fibras de polipropileno en ambientes de ion cloruro.

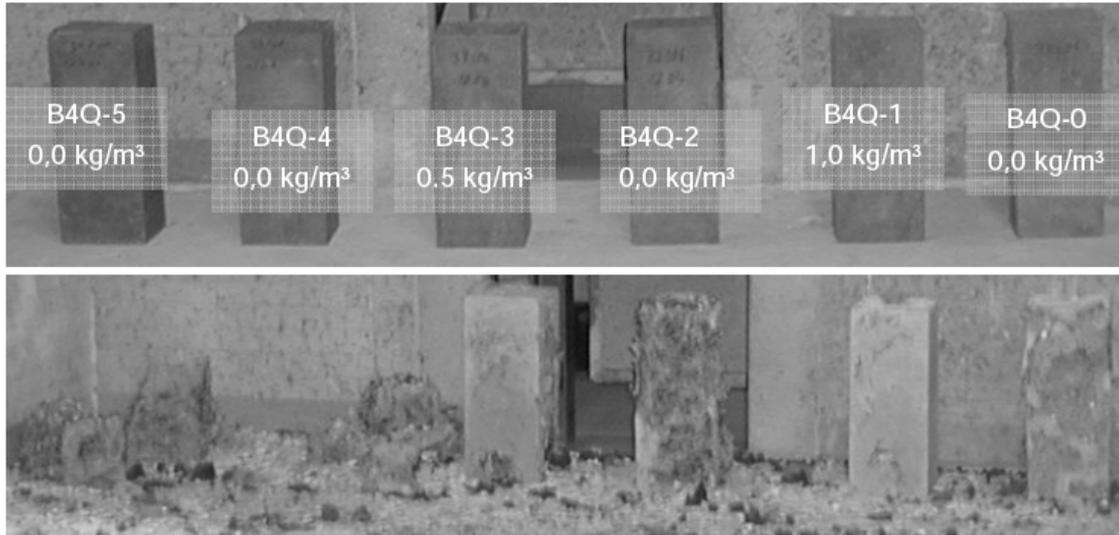
No afecta las características de terminación del micro hormigón, mejora además todas las texturas y tratamientos de superficie, el emparejado con llana, las superficies aplanadas y el agregado expuesto.

1.4.2_ RESISTENCIA AL FUEGO TRAS LA INTRODUCCIÓN DE FIBRAS:

El comportamiento al fuego del micro hormigón se ve mejorado por la adición de fibras de polipropileno, puesto que no estalla la superficie del hormigón tras 90 minutos de exposición al fuego.

Durante el proceso de fraguado, el vapor de agua que tiende a salir del hormigón queda atrapado en la superficie de la fibra de polipropileno, con lo cual también esta beneficiando su resistencia al fuego.

En el incendio cuando se alcanza los 160 °C, las fibras de polipropileno se funden creando canales de aire que retrasan y disminuyen la conductividad térmica del material.



Fotografía 1.12: Resultado de los distintos tipos de hormigón tras 90 minutos de incendio normalizado.

En la imagen anterior (imagen 1.12), se puede apreciar el estado de varias probetas con un hormigón (el mismo en cada caso), tras haber sido expuesto al fuego durante 90 minutos.

Como se puede observar en la imagen 1.9, el estado de las probetas con fibras poliméricas, es considerablemente mejor que las que no poseen estas fibras.

Con esto llegamos a la conclusión, que un micro hormigón con fibras poliméricas responde bastante mejor frente al fuego que el mismo micro hormigón sin éstas.

2_ OBJETIVOS

El objetivo de la realización de este estudio es la investigación del micro hormigón autocompactante, aditivado con un promotor de adherencia, tras la introducción de fibras, en este caso poliméricas, y ver, en general, cómo afectan éstas a las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, y la puesta en obra, si se produce una mejora o merma de las capacidades de éste.

Se estudiará el efecto de las fibras poliméricas en la docilidad, en su gran facilidad de colocación, homogeneidad y estabilidad, que no presente segregación o bloqueo de árido grueso, ni sangrado o exudación de la lechada, compactándose por la acción de su propio peso.

Además se observara la reacción mecánica del micro hormigón autocompactante tras la introducción de dichas fibras y promotor de adherencia, comprobando el aumento de resistencia y comparándolo con el mismo hormigón de idéntica dosificación pero sin la incorporación de dichas fibras.

Se hablará también de los diferentes tipos de fibras, las características de cada una, centrándonos más en las poliméricas, ya que son las que vamos a emplear en este estudio, introduciéndolas en el micro hormigón autocompactante, intentando incorporar la dosificación más adecuada para que surja el efecto positivo deseado.

Todo esto lo comprobaremos realizando los ensayos en estado endurecido (de compresión y flexo-tracción), necesarios, descritos en el apartado 4.

En resumen, el objetivo principal de este proyecto es el estudio de un micro hormigón con fibra monofilamento a base de poliolefinas y aditivado con un promotor de adherencia.

3_ ESTADO DEL ARTE

3.1_ MATERIALES

Los materiales utilizados en la fabricación de los MHAC son los mismos que se emplean para un hormigón convencional, pero las proporciones utilizadas en su dosificación son distintas, especialmente en lo relativo al contenido en materiales finos, para evitar riesgos de segregación.

Por otra parte, la utilización de aditivos superfluidificantes de 4ª generación o reductores de agua de alto rango son imprescindibles a la hora de obtener hormigones autocompactantes, ya que se busca la fluidez del hormigón pero sin prescindir de su calidad.

- Materiales empleados:

3.1.1_ÁRIDOS



Imagen 3.1: Áridos.

Para la fabricación de micro hormigón autocompactante pueden emplearse los mismos áridos que se emplean en el hormigón convencional; no se requiere de ninguna especificación físico-química particular, aunque debe cuidarse especialmente la calidad de los mismos, así como la regularidad del suministro durante el proceso de fabricación del hormigón.

La distribución de los tamaños de partículas de los áridos influye principalmente en las propiedades del hormigón convencional en estado fresco. Como el micro hormigón autocompactante es un material que se distingue del resto de los hormigones por su comportamiento en estado fresco, la selección que se haga de los áridos influirá en gran medida en las características del mismo.

Por razones económicas, en cualquier mezcla de hormigón convencional se busca reducir el volumen de partículas finas y, en consecuencia, aumentar la proporción de partículas más gruesas. En el micro hormigón autocompactante estas partículas finas son las que gobiernan en gran medida las características

de autocompactabilidad del hormigón, ya que la habilidad para atravesar zonas fuertemente armadas se rige principalmente por el volumen de mortero y la proporción de árido grueso de la mezcla. Las partículas más finas han de mantener la cohesión de la mezcla, evitando la segregación de la misma, y arrastrar a las partículas más pesadas cuando el hormigón se pone en movimiento.

Las limitaciones de los áridos para la fabricación de los MHAC están en relación con su tamaño máximo. En la imagen 3.1 se muestran diferentes tipos de áridos empleados en hormigones.

El tamaño máximo de árido para el hormigón autocompactante, se limita a 25mm, siendo recomendable utilizar tamaños máximos comprendidos entre 12mm y 20mm, en función de la disposición de armaduras, y que el árido fino tenga un módulo de finura próximo a 3.

Asimismo, es muy frecuente encontrar referencias donde se ha utilizado tamaño máximo igual o incluso inferior a 12mm.

Según el artículo 28.1 de la EHE 08, para la fabricación de hormigones de alta resistencia, se utilizarán áridos con propiedades mecánicas idóneas, ya sean rodados o procedentes de rocas machacadas de altas prestaciones mecánicas. Los áridos más recomendables desde el punto de vista mineralógico son los basaltos, cuarcitas, riolitas, sienitas, ofitas y calizas de buena calidad, con densidades superiores a 2600 kg/m³.

Si se mezclan áridos de densidad muy diferente, se deberá prestar atención para que no se produzca segregación.

ARENA

Pueden emplearse todas las arenas que cumplan con las especificaciones establecidas en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), prestando especial atención a la parte de finos menor que 0,125 mm, puesto que el volumen de partículas por debajo de ese tamaño afecta enormemente a las propiedades de autocompactabilidad del hormigón.

La dosificación de las mezclas se hace por lo general ajustando la relación entre el agua y los finos por debajo de los 0,125 mm. La reología de la mezcla, principalmente su viscosidad, varía con la arena que se elija, aunque también depende de la relación entre las partículas finas y las de árido grueso. Una arena con una proporción relativamente elevada de partículas por debajo de 0,125 mm reduce la necesidad de incorporación de un filler mineral que complete el volumen de pasta requerido. Al aumentar la cantidad de finos, la relación agua/finos se reduce, aumentando la viscosidad de la pasta y del hormigón. Esta es una de las razones por la que la proporción de arena de un hormigón autocompactante frente al volumen total de los áridos de la mezcla, es mayor que en el hormigón convencional.

Pueden emplearse arenas de machaqueo con un contenido de finos por debajo de 0,063 mm superior al límite establecido para hormigones convencionales, siempre que se asegure que estos finos en cantidad y

calidad, cumplan con los requisitos de la EHE. El empleo de estas arenas conlleva el aumento de la demanda de agua del hormigón, al aumentar la superficie específica de los áridos que es necesario mojar. El aumento de la demanda de agua se ve compensado por el empleo de superplastificantes, aditivos sin los que no es posible fabricar HAC.

Sobre las arenas hay que tener en cuenta que las arenas rodadas tienen una superficie que favorece la trabajabilidad del hormigón, mientras que las arenas machacadas poseen formas que aumentan considerablemente el rozamiento interno de la mezcla, por eso necesitan más agua para lograr los mismos resultados que los obtenidos con las arenas de río.

Otro factor que se debe considerar a la hora de elegir la arena es el contenido en finos. Arenas con muchos finos proporcionan una reducción en los niveles de adiciones necesarias y en algunos casos se pueden llegar a eliminar completamente. Debe garantizarse que los finos aportados por las arenas no sean perjudiciales para el hormigonado.

ÁRIDO GRUESO

A excepción del tamaño máximo del árido, no se requiere ninguna especificación en particular. Debe limitarse para evitar el bloqueo en el paso de la masa fresca entre las armaduras.

El tamaño máximo de árido grueso recomendado en el hormigón autocompactante, según la EHE, es de 25 mm, aunque se aconseja no superar los 20 mm. Los tamaños máximos habituales están comprendidos entre 12 y 16 mm. Sin embargo, debido a las especiales características reológicas del HAC, conviene tener presente que el árido utilizado puede contener partículas de tamaño superior al tamaño máximo del árido. En este sentido, conviene utilizar áridos con un buen índice de lajas y coeficiente de forma.

Las partículas más gruesas gobiernan el paso del hormigón a través de estrechamientos, puesto que pueden formar acumulaciones que bloqueen el paso del hormigón. Una reducción relativa en la proporción de las partículas gruesas implica que la distancia entre las mismas aumenta dentro de la mezcla, por lo que la probabilidad de formación de bloqueo disminuye. El riesgo de bloqueo aumenta considerablemente en estructuras fuertemente armadas. En estos casos adquiere gran importancia el estudio de las granulometrías de los áridos gruesos disponibles. En ocasiones, una leve reducción del tamaño máximo de los áridos, de 18 a 16 mm, puede producir mejoras significativas.

FILLER MINERAL

El filler mineral se emplea en los hormigones autocompactantes con el objetivo de dar cohesión y aumentar el volumen de pasta para dar trabajabilidad necesaria a la mezcla. Como consecuencia se evita la segregación de los áridos gruesos y la exudación de agua.

La selección del filler ha de hacerse con especial cuidado puesto que su finura, granulometría y naturaleza influyen especialmente en el comportamiento del hormigón autocompactante. Debe tenerse presente, que la finura del filler seleccionado incide sobre la demanda de agua y/o aditivo superplastificante.

Granulometría del filler.

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

Granulometría de filler (EHE 08) [16]

Para el hormigón autocompactante, la EHE recomienda que la cantidad máxima de finos menores que 0,063 mm, resultante de sumar el contenido de finos de los áridos fino y grueso y el filler, sea 250 kg/m³. Cuando se utilicen cementos que contengan una adición complementaria de tipo calizo (L o LL), esta adición ha de tenerse en cuenta en la cantidad de partículas finas que se quiera añadir, de tal manera que entre ambas no se superen los 250 kg/m³.

La EHE 08 en el apartado 30 contempla que en aplicaciones concretas de hormigón de alta resistencia, fabricado con CEM I, se permite la utilización simultánea del humo de sílice y de las cenizas volantes siempre que el porcentaje de humo de sílice no sea superior al 10% y que el porcentaje total de adiciones (humo de sílice y cenizas volantes), no sea superior al 20%, en ambos casos con respecto al peso del cemento.

En este caso la ceniza volante sólo se contempla a efecto de mejorar la compacidad y reología del hormigón.

Si se requiere trabajar con una relación agua/cemento determinada, pero es necesario aumentar la cantidad de finos del hormigón, por ejemplo para aumentar su resistencia al bloqueo mediante aumento del volumen de pasta (manteniendo prácticamente su peso), puede ser adecuado recurrir a un filler más grueso que no requiera mucho agua para su dispersión, y por tanto que no disminuya innecesariamente la fluidez del hormigón.

En el caso contrario, si para una relación agua/cemento determinada se observa excesiva fluidez del hormigón y falta de viscosidad y/o robustez, y no se desea aumentar más la cantidad de los finos del mismo, se puede emplear un filler más fino.

Los finos tienen como principal función dar cohesión y evitar la segregación de la mezcla. Su utilización es necesaria en la mayoría de las dosificaciones, pero en algunos casos pueden ser sustituidas, bien por aditivos cohesionantes o bien por los propios finos aportados por los áridos.

Los materiales más utilizados para incrementar el volumen de finos en los HAC suelen ser las cenizas volantes y humo de sílice, o inertes como el filler calizo, silicio o la marmolina en función de las posibilidades de suministro de la zona y del coste.

3.1.2_ AGUA

El agua empleada para la fabricación de MHAC, debe seguir los mismos requisitos que cualquier agua empleada en el hormigón convencional, tal y como se indica en la Instrucción EHE.

El agua es el segundo componente del hormigón, empleándose en el amasado del mismo y en su curado. Dependiendo de que se emplee con uno u otro fin se le exigirán unas u otras características.

El agua que se añade en la hormigonera, junto con los demás componentes del hormigón, tiene las siguientes misiones: una primera, de hidratación de los componentes activos del cemento; una segunda, de actuar como lubricante haciendo posible que la masa fresca sea trabajable y, una tercera, de creadora de espacio en la pasta para los productos resultantes de la hidratación del cemento.

Para que un agua sea apta para el amasado de un hormigón debe estar limpia y encontrarse libre de impurezas por encima de determinados límites a fin de que no se produzcan alteraciones en la hidratación del cemento, retrasos en su fraguado y endurecimiento, reducciones en sus resistencias, ni peligros en su durabilidad. El que un agua tenga aspecto limpio no ofrece seguridad suficiente sobre su pureza.

Se consideran como aguas dañinas al hormigón las que contienen azúcares, tanino, materia orgánica, aceites, sulfatos, ácido húmico, sales alcalinas, gas carbónico, así como productos procedentes de residuos industriales.

3.1.3_ CEMENTO

No existen requisitos específicos en cuanto al tipo de cemento que se pueda utilizar en el hormigón autocompactante y se utilizarán aquellos cementos que cumplan con la vigente Instrucción EHE para la Recepción de Cementos.

Para la fabricación de los HAC, se pueden utilizar todos los tipos cementos existentes en el mercado, la elección entre uno u otro debe estar asociada al tipo de aplicación del hormigón, de la calidad exigida al hormigón, de la disponibilidad en el mercado y de su finura.

La cantidad adoptada puede variar de acuerdo con la calidad del hormigón que se desea obtener, con el contenido de adiciones y con el tamaño máximo del árido utilizado en la mezcla.

Las cantidades de cemento utilizadas, no deben superar 500Kg / m³ debido a los riesgos de aumento en la retracción. Cuantías inferiores a los 350Kg / m³ solo resultan adecuadas si se incluye otro tipo de fino, como cenizas volantes, puzolanas, etc. En general el consumo suele estar entre 350 y 450Kg/m³, por debajo de los 300kg/m³ ya es complicado (J.R. Albiol). Pero se han obtenido hormigones autocompactables con 260Kg/m³ de cemento (cemento Portland con escorias tipo CEM II), para el puente Akashi-Kaikyo en Japón; obteniendo una resistencia a compresión los 28 días de 24N/mm², cuando el proyecto demandaba 20N/mm². El límite para conseguir un HAC, ha sido con 200Kg/m³ de cemento (Gomes, et al., 2001).

Se recomienda limitar el contenido en C₃A del cemento o emplear cementos de bajo calor de hidratación para minimizar los problemas de retracción que una masa con tanta cantidad de finos pueda generar.

3.1.4_ ADITIVOS

Los aditivos químicos son un componente esencial del HAC, ya que sin su incorporación no es posible su fabricación. De hecho, el desarrollo del HAC, tuvo lugar gracias al desarrollo de aditivos superplastificantes de tipo policarboxilato que proporcionan una elevada capacidad reductora de agua en comparación con los superplastificantes tradicionales basados en naftaleno-sulfonado o melamina-sulfonada.

Aunque los aditivos superplastificantes son fundamentales e imprescindibles para preparar un HAC, también se pueden emplear otro tipo de aditivos químicos en función de las condiciones y materiales. Entre ellos destacan los cohesionantes también conocidos como aditivos moduladores de la viscosidad, que mejoran la estabilidad del hormigón frente a segregación y exudación especialmente cuando el contenido de finos no es excesivamente alto.

Asimismo, se puede emplear cualquiera de los aditivos definidos en la norma UNE-EN 934-2. Así, los aditivos retenedores de agua, inclusotes de aire, aceleradores, retardadores o hidrófugos se emplearán con el objetivo de cumplir con los requerimientos de cada aplicación.

Al igual que en los hormigones convencionales, en el caso de emplear más de un aditivo debe evaluarse la compatibilidad entre los mismos.

Básicamente son dos los tipos de aditivos utilizados para fabricar los HAC: los reductores de agua y los cohesionantes.

El uso de un aditivo superplastificante es requisito fundamental en el hormigón autocompactante y, en ocasiones, puede ser conveniente el uso de un aditivo modulador de la viscosidad que minimiza los efectos de la variación del contenido de humedad, el contenido de finos o la distribución granulométrica, haciendo que el hormigón autocompactante sea menos sensible, en cuanto a la propiedad de autocompactabilidad se refiere, a pequeñas variaciones en la calidad de las materias primas y en sus proporciones.

Su empleo se realizará después de conocer su compatibilidad con el cemento y las adiciones, comprobando un buen mantenimiento de las propiedades reológicas durante el tiempo previsto para la puesta en obra del hormigón autocompactante, así como las características mecánicas correspondientes mediante la realización de ensayos previos.

Los aditivos moduladores de viscosidad, ayudan a conseguir mezclas adecuadas minimizando los efectos de la variación del contenido de humedad, el contenido de finos o la distribución granulométrica.

Los reductores de agua de alto rango o superplastificantes, nombrados anteriormente, son imprescindibles en la dosificación de los HAC. Éstos, disminuyen significativamente el contenido de agua de un hormigón sin modificar la trabajabilidad o aumentarla significativamente, sin modificar el contenido de agua.

SUPERPLASTIFICANTES

Los aditivos superplastificantes/reductores de agua de alta actividad (UNE-EN 934-2), proporcionan una elevada trabajabilidad manteniendo una baja relación agua/cemento, garantizando un buen desarrollo de propiedades mecánicas y durabilidad en el HAC. Su empleo es indispensable en el HAC y, en la mayoría de casos, los superplastificantes de nueva generación o policarboxilatos son los únicos capaces de satisfacer los elevados requerimientos de reducción de agua de este tipo de hormigones. Cabe destacar que la capacidad reductora de agua de los superplastificantes de nueva generación puede ser de hasta un 40%.

Este tipo de superplastificantes actúan como dispersantes de las partículas de cemento mediante la adsorción de sus moléculas sobre la superficie del cemento y posterior generación de una fuerza repulsiva de carácter mayoritariamente estérico que evita la floculación de los granos de cemento y, por tanto, mejora su dispersión en la solución acuosa (Sakai y Daimon, 1995). Consecuentemente, el agua inicialmente atrapada en los flóculos o aglomerados de partículas de cemento, queda libre proporcionando una mayor trabajabilidad.

La selección del tipo y dosis óptima de aditivo, se puede realizar mediante una serie de ensayos previos basados en pasta de cemento, mortero o hormigón (Gomes et al., 2002) aunque se deben observar una serie de normas básicas a la hora de su correcta selección. En este sentido, es fundamental seguir las recomendaciones del fabricante, especialmente en lo que se refiere a límites de dosificación recomendados.

Además de la capacidad reductora de agua, otros criterios a considerar que condicionarán 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 (ACHE, 2008).

La compatibilidad entre cementos de base Pórtland y aditivos superplastificantes, es otro factor importante a considerar a la hora de seleccionar la mejor combinación cemento-aditivo, especialmente cuando se trabaja a bajas relaciones agua/cemento. Una inadecuada y prematura pérdida de autocompactabilidad, un bajo efecto de fluidificación, segregación o exudación, excesivo retraso de fraguado, pérdida de aire ocluido e incluso una elevada incorporación de aire, pueden ser consecuencias de un problema de compactabilidad entre el cemento y el aditivo. La realización de ensayos previos en pasta de cemento o mortero mediante el cono de Marsh (de Larrard, 1990; Aïtcin et al., 1994; Toralles-

Carbonari et al., 1996; Gettu et al., 1997), Mini-slump (Altchin, 1998; Kantro, 1980) o ensayo de mesa en sacudidas (UNE-EN 1015-3), revelarán de una forma fácil y rápida los posibles problemas de incompatibilidad, si los hubiere (ACHE, 2009).

Los Lignosulfonatos permiten reducir el agua en el hormigón como máximo un 10%. Presentan una tendencia a producir retrasos en el fraguado del hormigón cuando se utilizan altas dosificaciones.

Los naftalenos son subproductos del proceso de refinado del carbón. Permiten reducir hasta un 20% el agua de amasado del hormigón. Pueden ocluir aire, aunque en cantidades no demasiado elevadas.

Las melaminas son productos basados en polímeros sintéticos. Su capacidad de reducción de agua es similar a de los naftalenos. Como característica fundamental se destaca el aumento de la resistencia a edades tempranas.

Estos superplastificantes de segunda generación han tenido como efecto negativo principal que la pérdida de trabajabilidad del hormigón es demasiado rápida, y a bajas relaciones A/C este puede producir un flujo demasiado viscoso.

Los copolímeros de vinilo productos mas efectivos que las melaminas, permitiendo una reducción de agua del 30% y confiere al hormigón un mayor tiempo de manejabilidad.

Los policarboxilatos pertenecen a la tercera generación de aditivos superplastificantes.

Los aditivos, basados en éteres policarboxílicos, fundamentan su efecto dispersante principalmente en importantes cadenas laterales y mucho menos en la pura repulsión electrostática. Las largas cadenas laterales crecen más allá de los productos de hidratación del cemento formados, proporcionando una mayor dispersión y son responsables del efecto estérico. Así se logra una actividad más duradera en el tiempo.

La alta trabajabilidad exigida por un HAC solo puede ser obtenida mediante la utilización de productos de 4ª generación producidos a base de éteres policarboxílicos.

Los fluidificantes normales producidos a base de naftalenos, sulfonatos, melanina e incluso los vinílicos no suelen ser suficientemente potentes para garantizar la fluidez necesaria.

MODULADORES DE VISCOSIDAD O COHESIONANTES

Los cohesionantes que, tal como su nombre indica, sirven para dar cohesión a la mezcla, son aplicados en los casos en que la mezcla carece de suficientes finos en su dosificación. Su utilización no siempre es necesaria. Estos aditivos también conocidos como "agentes coloidales" normalmente son derivados de la celulosa y de polisacáridos.

Los aditivos moduladores de viscosidad (AMV), son compuestos químicos que mejoran sustancialmente la cohesión del hormigón limitando la pérdida de agua por exudación y minimizando la tendencia a segregación. A pesar de que se han utilizado ampliamente en otras aplicaciones diferentes al HAC desde hace varios años, estos aditivos no están contemplados en la normativa actual.

La composición química de estos aditivos es muy variable, así como sus mecanismos de acción (Rixom y Mailvaganam, 1999). Algunos de ellos son polímeros sintéticos o naturales de alto peso molecular que fijan el agua libre del hormigón mediante la creación de puentes de hidrógeno impidiendo la exudación y proporcionando una solución acuosa de mayor viscosidad. Otros se adsorben sobre las partículas de cemento aumentando la viscosidad mediante atracción entre partículas.

Dentro de esta categoría se incluyen los aditivos cohesionantes basados en nanosílice que proporcionan una elevada estabilidad en el hormigón sin aumentar significativamente la demanda del agua del mismo. Se componen mayoritariamente de sílice (>99%) que se presenta en forma de suspensión líquida. A diferencia de la microsílice, que es un residuo de la industria metalúrgica, la nanosílice es un producto sintético fabricado a partir del vidrio. La superficie específica de las partículas en suspensión es del orden de 80-800 m²/g (la del cemento es del orden de 0,3-0,35 m²/g Blaine).

Su empleo, aunque no es imprescindible cuando se dispone de suficientes finos, es muy aconsejable ya que mejora significativamente la robustez del HAC frente a cambios del contenido del agua y el módulo de finura de la arena (Sedran, 1995). Sin embargo, su empleo es casi imprescindible en el caso de no disponer localmente de filler o si las arenas tienen bajos contenidos de finos.

Por otro lado, es bien sabido que los HAC tienen un elevado contenido de cemento + filler, con el único objetivo de proporcionar la reología adecuada aunque ello conlleve un exceso no requerido de propiedades mecánicas. El empleo de nuevos y avanzados modificadores de la viscosidad, permite minimizar el contenido de cemento de manera que es posible fabricar HAC con contenidos de cemento + filler inferiores a 380 kg/m³ cuando los requerimientos mecánicos son menores (Roncero, et al. 2007). Estos aditivos proporcionan un significativo aumento de la viscosidad plástica en comparación con los aditivos modificadores de viscosidad tradicionales y esto permite minimizar al máximo el contenido de finos del hormigón.

El rango de dosificación de estos productos es muy variable y depende de la naturaleza del aditivo modificador de viscosidad. En general, éste suele variar entre 0.05% y 2%. El fabricante proporcionará las indicaciones adecuadas en cuanto a su dosificación y rango de empleo.

La clave para obtener un buen HAC caracterizado por una elevada cohesión y con propiedades autocompactantes, radica en la correcta optimización de la combinación superplastificante-aditivo de viscosidad. Es importante

destacar que una sobredosificación de este tipo de aditivos puede causar una pérdida importante de fluidez.

OTROS ADITIVOS

Cualquier otro aditivo químico definido en la normativa UNE-EN 934-2, se puede utilizar en el HAC con el objetivo de proporcionar los requerimientos necesarios para cada aplicación. Esto incluye aditivos retenedores de agua, inclusores de aire, aceleradores, retardantes o hidrófugos.

Por otro lado, aun sin estar contemplados en la normativa UNE-EN 934-2, los aditivos reductores de retracción se pueden emplear en el HAC con el objetivo de reducir las deformaciones por retracción del mismo. Los aditivos reductores de retracción proporcionan una disminución de la retracción por secado del hormigón del orden del 30-50%. Además también proporcionan una considerable disminución de la retracción endógena y la retracción plástica (Gettu et al., 2002). Los elevados contenidos de cemento junto con una baja relación agua/cemento del HAC aumentan el riesgo de figuración por retracción plástica. Por otro lado, la presencia de adiciones minerales tipo cenizas volantes, escorias o microsílíce, también contribuye a incrementar la retracción endógena del hormigón. Por ello el empleo de aditivos reductores de retracción es muy aconsejable en el caso de HAC con elevado contenido de cemento y/o finos en general.

Ficha técnica de aditivo:

SikaPlast® 380

Powered by ViscoCrete®

Superplastificante de alto rango para hormigones.

Descripción del Producto

Aditivo superplastificante de alto rendimiento para la fabricación de todo tipo de hormigones realizados en plantas de hormigón preparado; especialmente aquellos con consistencia fluida mejorando su bombeabilidad.

No ejerce ninguna acción corrosiva sobre las armaduras debido a que es un producto exento de cloruros.

Usos

- Aditivo muy adecuado para mezclas "robustas", donde existen frecuentes variaciones en las materias primas y en la humedad de estas
- Realización de todo tipo de hormigones, mejorando considerablemente la consistencia y facilidad de colocación de los mismos
- El hormigón puede transportarse a largas distancias sin pérdida de trabajabilidad
- Apto para la confección de hormigón autocompactante
- La segregación y exudación de agua en el hormigón se ven muy disminuidas

Características/Ventajas

- Facilita notablemente la colocación o puesta en obra de los hormigones, mejorando la adherencia a las armaduras.
- Aumento de la densidad del hormigón mejorando sus resistencias mecánicas, durabilidad e impermeabilidad .
- Incrementa la estabilidad y la cohesión de las mezclas.
- Mejora notablemente el acabado superficial de los hormigones.
- Por su alto poder de reducción de agua, optimiza al máximo las mezclas, economizando el precio del m3 de hormigón
- Ventajas estéticas. Aditivo válido para hormigón blanco.
- Reducción o eliminación total del proceso de vibrado en el hormigón

Certificados/Normas

Cumple con la Norma UNE -EN 934-2. Grupo 11: Reductor de agua/ Retardante/ Superplastificante

Datos del Producto

Forma

Apariencia/color: Líquido verde

Presentación: Contenedores de 1 m3. Bajo pedido puede suministrarse a granel.

Almacenamiento

Condiciones de almacenamiento/ Conservación: 12 meses desde su fecha de fabricación, en sus envases de origen bien cerrados y no deteriorados . En lugar seco y fresco protegiéndolos de las heladas y el frío excesivo, a una temperatura entre +5 °C y +30 °C.

Proteger de la exposición a luz directa del sol.

Datos Técnicos

Composición química: Polímeros modificados en solución acuosa

Densidad (20°C): Aprox. 1,1 kg/l.

Contenido de sólidos: Aprox. 25%

Valor del pH: Aprox. 5

Información del Sistema

Detalles de Aplicación

Consumo/Dosificación: Según las propiedades deseadas, SikaPlastR- 380 se dosificará entre el 0.5% y el 1.8% del peso del cemento

Instrucciones de Aplicación: Añadir en el agua de amasado o en la mezcladora al mismo tiempo que el agua.

Se recomienda amasar el hormigón para la perfecta homogenización y actuación del aditivo.

SikaPlastR- 380 puede utilizarse en combinación con otros aditivos Sika. Se recomienda realizar ensayos previos para determinar las dosificaciones adecuadas.

Notas de aplicación/Límites: Con heladas intensas y prolongadas, SikaPlast R-380 puede helarse, pero unavez deshelado lentamente y agitado cuidadosamente y verificando que no se haya desestabilizado, puede emplearse sin problemas.

Debido a la acción de los rayos del sol, el producto puede perder su coloración, sin que esto afecte a las propiedades del producto.

Para cualquier aclaración rogamos consulten con nuestro Departamento Técnico.

Nota: Todos los datos técnicos de esta Hoja de Datos de Producto están basados en ensayos de laboratorio. Los datos reales pueden variar debido a circunstancias que escapan de nuestro control.

Instrucciones de Seguridad e Higiene

Para cualquier información referida a cuestiones de seguridad en el uso, manejo, almacenamiento y eliminación de residuos de productos químicos, los usuarios deben consultar la versión mas reciente de la Hoja de Seguridad del producto, que contiene datos físicos, ecológicos, toxicológicos y demás cuestiones relacionadas con la seguridad.

3.1.5_ FIBRAS:

Históricamente las fibras han sido utilizadas para mejorar y reforzar diferentes tipos de materiales de construcción.

Estas fibras anteriormente eran de origen vegetal. En tiempos modernos las fibras de vidrio, asbestos, acero y poliméricas han ganado popularidad para remediar y mejorar problemas en el hormigón.

Las fibras son elementos de diferentes longitudes, relativamente cortas 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.

NATURALEZA Y TIPOS DE FIBRAS:

CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS					
FIBRA	DIAMETRO (um)	DENSIDAD (g/cm ³)	MODULO DE ELASTICIDAD (Gpa)	TENSION DE ROTURA (Gpa)	ALARGAMIENTO (%)
ACERO	5-1000	7,80	200	0,5-3	3,5
ACERO INOX	5-100	7,86	160	2,1	3
VIDRIO	9-15	2,60	70-80	2-2,4	2-3,6
CROCIDOLITA	0,02-0,04	3,4	196	3,5	2-3
CRISOTILO	0,02-0,04	2,6	164	3,1	2-3
POLIPROPILENO	10-200	0,90	5-77	0,4-0,8	8
ARAMIDA	10-15	1,45	65-133	2,9-3,6	2,1-4
CARBONO	9-20	1,9	230	2,6-3	1
NYLON	-	1,10	4	0,9	13-15
CELULOSA	-	1,2	10	0,3-0,5	-
ACRÍLICA	14-18	1,18	14-19,5	0,4-1	3
POLIESTER	-	1,4	8,2	0,7-0,9	11-13
POLIETILENO	-	0,95	0,3	0,7X10 ⁻³	10
MADERA	-	1,5	71	0,9	-
SISAL	10-50	1,50	-	0,4-0,8	3
MATRIZ DE CEMENTO		2,50	10-45	(3,7-8)X10 ⁻³	0,02

Tabla 3.1 Características de los diferentes tipos de fibras. (HRF. ETS de Arquitectura de Sevilla) [8]

PRODUCTOS FABRICADOS CON FRC		
FIBRA DE ACERO	PREMEZCLADO	PANELES DE FACHADA FORJADOS ELEMENTOS CAJA ELEM. AISLANTES REFRACTARIOS PREFABRICADOS TUBERIAS ESTR. AGRÍCOLAS
FIBRA DE POLIPROPILENO	MONOFILAMENTOS	PANELES DE FACHADA
	FIBRILADO	PANELES DE FACHADA PILOTES
	FIBRA KRENIT	PANELES DE FACHADA PLACAS CONDUCTOS TEJAS
FIBRA DE CELULOSA		PLACAS DE INTERIOR
FIBRA DE SISAL		PLACAS TEJAS

Tabla 3.2 Productos fabricados con los diferentes tipos de fibras. (HRF. ETS de Arquitectura de Sevilla) [8]

COMPORTAMIENTO A TEMPERATURA Y RESISTENCIAS QUÍMICAS Y MECÁNICAS DE LAS FIBRAS			
FIBRA	Resistencias mecánicas	Resistencias Químicas	Resistencias a temperaturas
ACERO	Alta	Media o Alta (g/l)	>400°C (Inox)
ARAMIDA	Alta	Media	200-400°C
CARBONO	Alta	Alta	200-400°C
CELULOSA	Nula	Baja	Mala
POLIACRILONOTRILO	Alta	Alta	200-400°C
POLIESTER	Media	Alta	Mala
POLIPROPILENO	Media	Alta	Mala
POLIVINILO	Media	Alta	200-400°C
SISAL	Media	Baja	-
TEFLON TFE	Nula	Alta	200-400°C
VIDRIO	Alta	Alta	200-400°C

Tabla 3.3 Resistencias de las fibras según la temperatura. (HRF. ETS de Arquitectura de Sevilla) [8]

DISPOSICION DE LAS FIBRAS:

La distribución homogénea de las fibras en el hormigón es muy importante para obtener un buen resultado.

En la siguiente figura (Fig. 3.1, se muestran dos ejemplos de disposición ideal de fibras en una sección transversal, donde a) muestra una matriz cuadrada regular, y b) una matriz triangular regular.

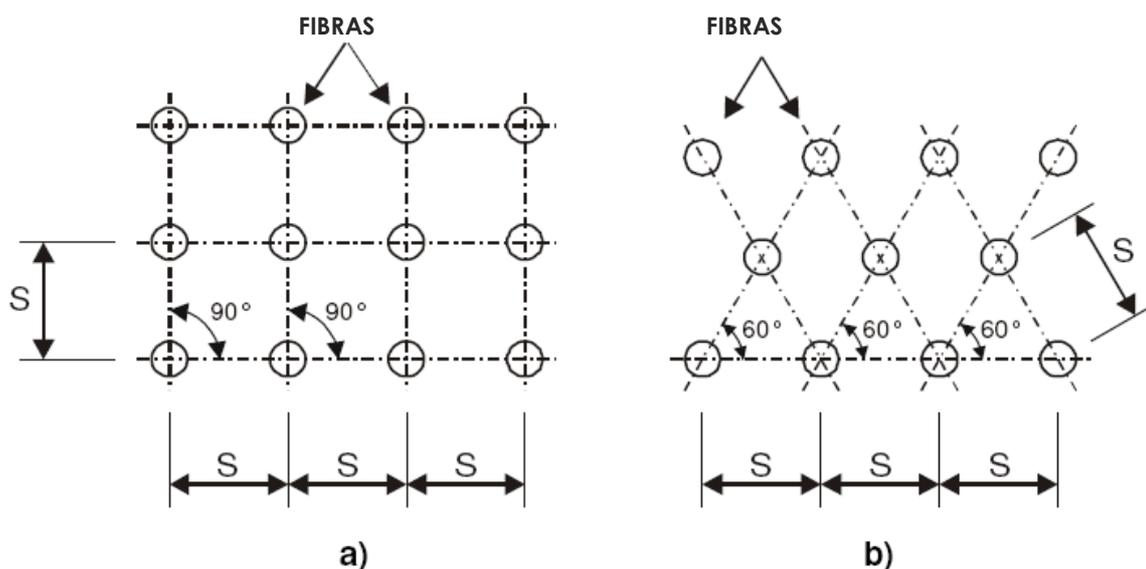


Fig. 3.1 Disposición de las fibras. (I.Marckovic) [9]

Para que esto pudiera ser así (fig 3.1), los granos deberían disponerse entre las fibras y su tamaño máximo debe caber entre las fibras (fig3.2 a), y los granos

de tamaño medio se colocarán de modo que estén en contacto entre sí (fig 3.2 b).

Si ambas condiciones se cumplen, el hormigón con fibras será capaz de estar correctamente dispuesto para alcanzar la mayor trabajabilidad posible.

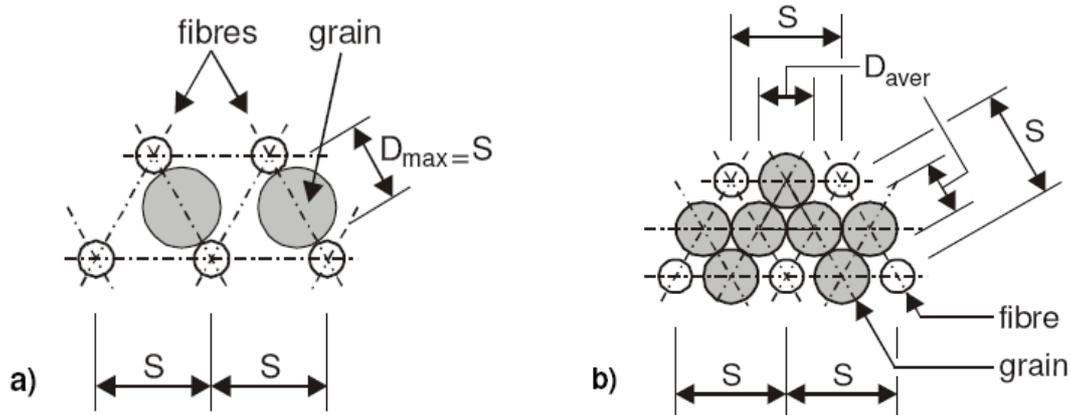


Fig. 3.2 Disposición de las fibras. (I.Markovic) [9]

CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS:

Las características geométricas de las fibras (Longitud (l_f), Diámetro equivalente (d_f), Esbeltez (λ)), se establecerán de acuerdo con UNE 83.500-1 y UNE 83.500-2. Por otro lado, de acuerdo con su naturaleza las fibras se clasifican en:

- Fibras de acero
- Fibras poliméricas
- Otras fibras inorgánicas

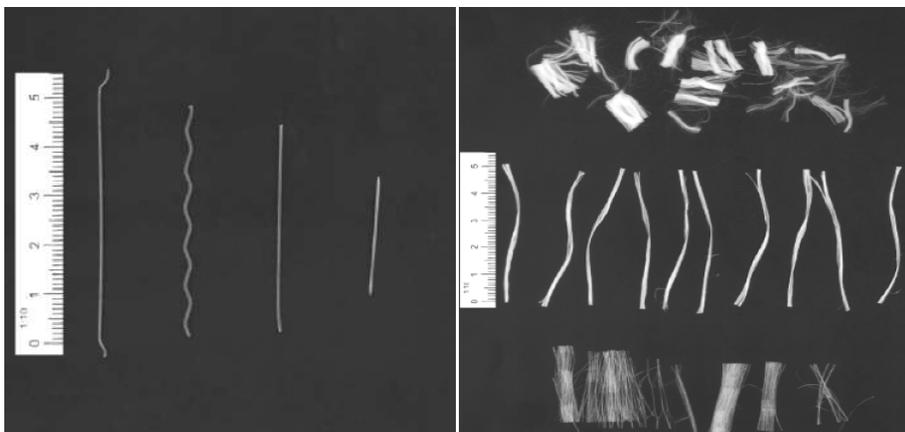


Imagen 3.2: Fibras metálicas y poliméricas y sus diferentes longitudes y tipos. (HRF. A. Aguado) [10]

Clasificación según el proceso de fabricación:

- Trefiladas (Tipo I)
- Cortadas en láminas (Tipo II)
- Extraídas por rascado en caliente (Tipo III)
- Otras, por ejemplo: fibras de acero fundido (Tipo IV)

Clasificación Según la forma:

- Rectas
- Onduladas corrugadas
- Conformadas en extremos de distinta forma



Imagen 3.3: Diferentes formas de fibras metálicas. (HRF A. Aguado) [10]

Clasificación según el material:

- Polipropileno y/o polipropileno de alta densidad.
- Aramida
- Alcohol de polivinilo
- Acrílico
- Nylon
- Poliester

Clasificación según el proceso de fabricación:

- Monofilamentos extruidos (Tipo I)
- Láminas fibriladas (Tipo II)

Clasificación según las dimensiones:

- Micro-fibras: $< 0,20$ mm diámetro
- Macro-fibras: $\geq 0,20$ mm diámetro

Aumento de la resistencia con las fibras:

Durante muchos años, la tendencia del hormigón a agrietarse ha sido aceptada como un hecho natural. Hay solamente una razón por la que las grietas ocurren en el hormigón, existen tensiones que exceden la resistencia del hormigón en un momento específico.

Las tensiones derivadas de las fuerzas externas pueden ser compensadas proveyendo resistencias estructurales mayores en las estructuras de hormigón, en los pavimentos y en las losas. Sin embargo históricamente ha sido un problema controlar las tensiones intrínsecas, ocasionadas por el encogimiento dentro del propio hormigón, debido a su variedad y ocurrencia impredecibles.

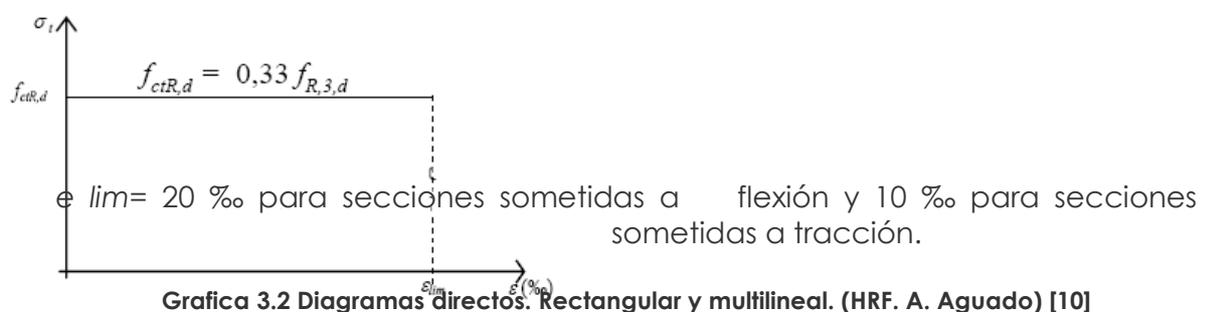
El tipo más común de grietas intrínsecas aparece en el estado plástico y este es ocasionado por la retracción al ocurrir el secado. Estas grietas se forman dentro de las primeras seis horas posteriores a la colocación del hormigón. Por lo general, las grietas debido a la retracción plástica cruzan toda la losa y forman planos débiles que reducen permanentemente la integridad de la estructura antes de que el hormigón tenga la oportunidad de obtener la resistencia de diseño.

En muchas ocasiones, las grietas por retracción plástica no se observan sino hasta que transcurra un tiempo. Con frecuencia, estas son selladas en la superficie al llevar a cabo la operación de terminado o simplemente, no son lo suficientemente anchas para ser observadas sino hasta que el hormigón se encoge más o una carga hace que estos planos débiles aumenten hasta convertirse en grietas visibles.

Las fibras trabajan con resistencias residuales a flexotracción:

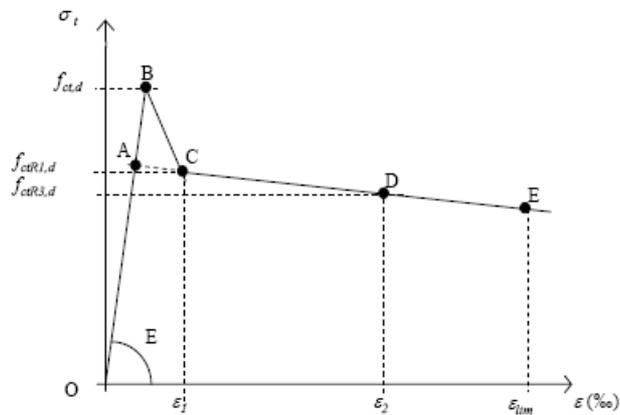
- Posibilidad de otros ensayos UNE 83515: Ensayo Barcelona
- Diagramas directos (rectangular y multilineal)

- Diagrama σ - ϵ de cálculo (1):



- Diagrama σ - ϵ de cálculo (2):

Interesante para un análisis no lineal con pequeñas deformaciones.



Grafica 3.3 Diagramas directos. Rectangular y multilineal. (HRF. A. Aguado) [10]

fL = Carga correspondiente al límite de proporcionalidad.

$$f_{ct,d} = 0,6 f_{ct,fl,d} ; f_{ctR1,d} = 0,45 f_{R,1,d} ; f_{ctR3,d} = k1 (0,5 f_{R,3,d} - 0,2 f_{R,1,d})$$

$k1 = 1$ en secciones a flexión y $0,7$ en secciones a tracción

$$\epsilon_1 = 0,1 + 1000 \cdot f_{ct,d} / E_c,0 ; \epsilon_2 = 2,5 / l_{cs} ;$$

$\epsilon_{lim} = 20 ‰$ para secciones a flexión y $10 ‰$ para secciones a tracción

l_{cs} = Longitud crítica (en metros) del elemento calculado

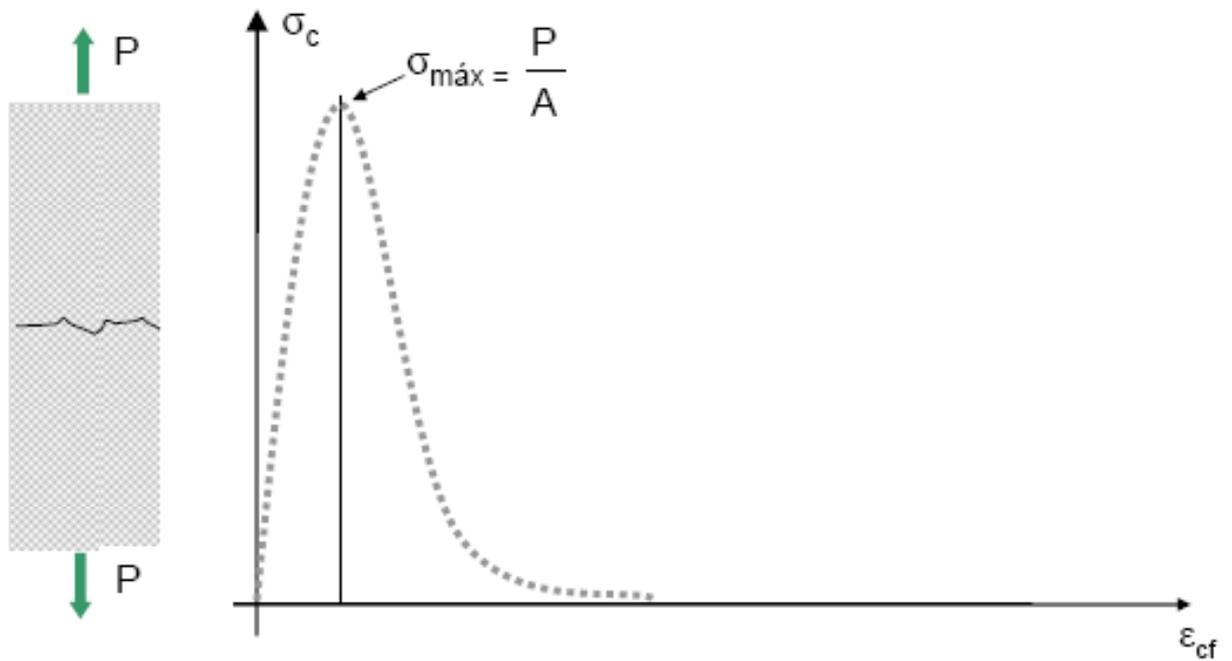
$l_{cs} = \min (sm, h - x)$ siendo: x = profundidad del eje neutro

$h - x$ = distancia del eje neutro al extremo más traccionado

sm = distancia media entre fisuras.

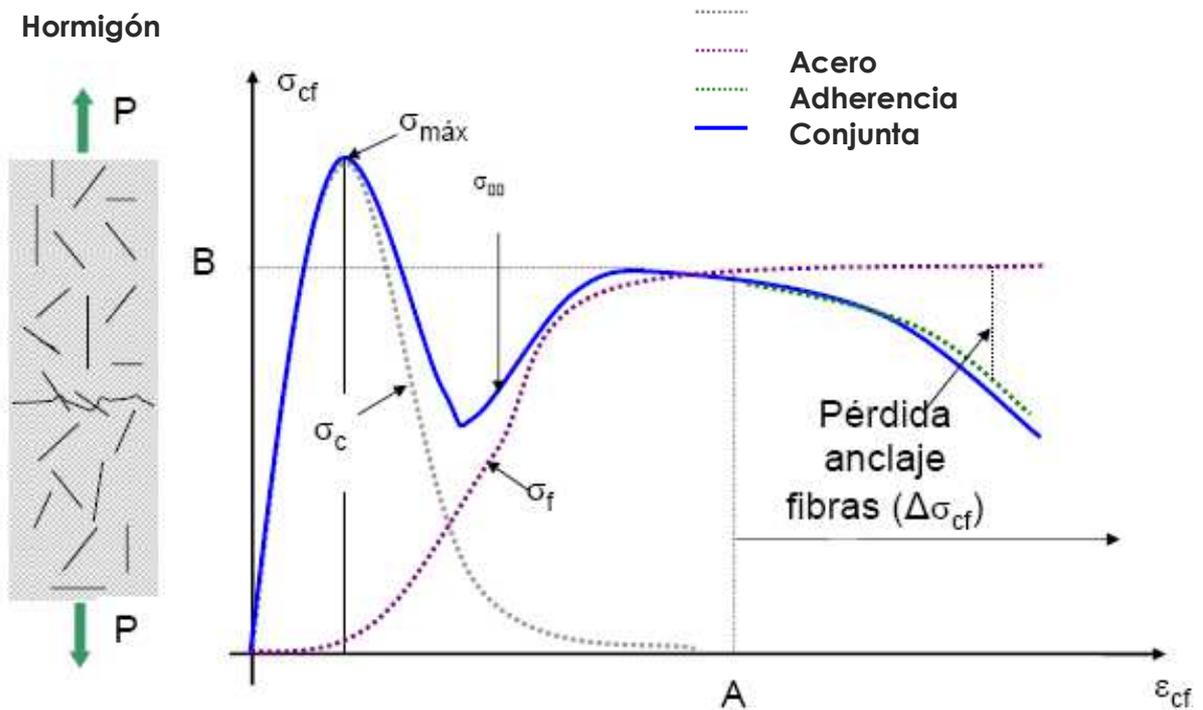
Diagrama σ - ϵ de cálculo directo:

a) Hormigón sin fibras



Grafica 3.4 Hormigón sin fibras. (La inclusión de fibras como refuerzo del hormigón. A. Aguado) [7]

b) Comportamiento conceptual conjunto.



Grafica 3.5 Hormigón con fibras. (La inclusión de fibras como refuerzo del hormigón. A. Aguado) [7]

Las gráficas anteriores (graf.3.4 y 3.5), nos muestran la repercusión de las fibras en el hormigón.

Se puede observar, como las fibras otorgan al hormigón cierta plasticidad, evitando así la rotura frágil característica de este.

Se observa en la gráfica 3.4, como un hormigón sin fibras, cuando alcanza el punto máximo de su tensión admisible, rompe frágilmente.

A diferencia de éste, en el gráfico 3.5, se puede observar cómo un hormigón con fibras, al alcanzar su tensión máxima admisible, en vez de romper frágilmente, deforma previamente.

Modelización continua de secciones hasta rotura:

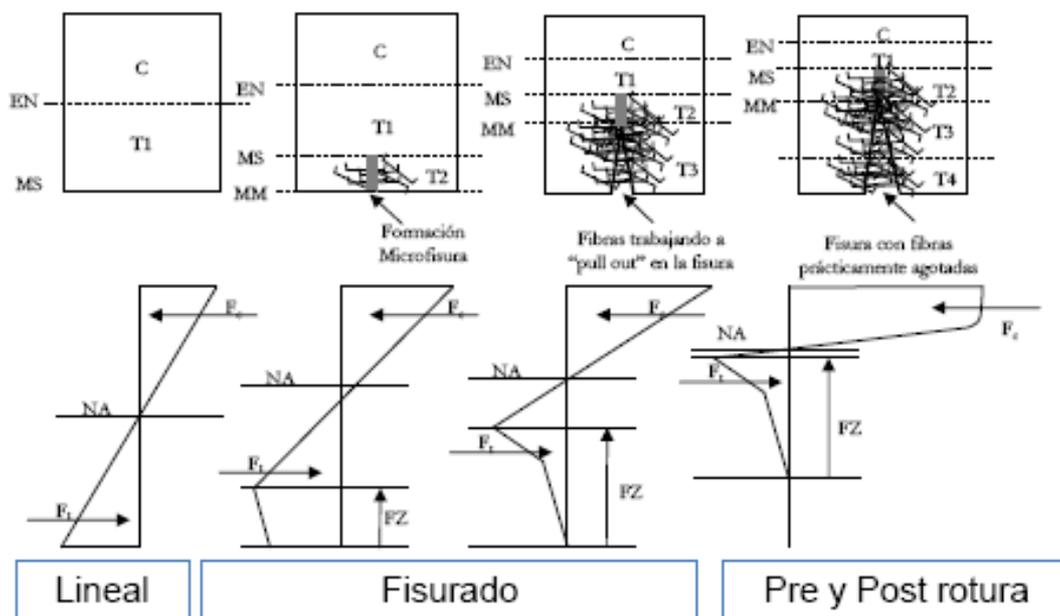


Fig.3.3 Modelización continua de secciones hasta rotura. (La inclusión de fibras como refuerzo del hormigón. A. Aguado) [7]

En la figura 3.3 se puede apreciar los diagramas de trabajabilidad de fuerzas del hormigón según los diferentes grados de rotura.

- Modelo general para cualquier tipo de fibras estructurales.

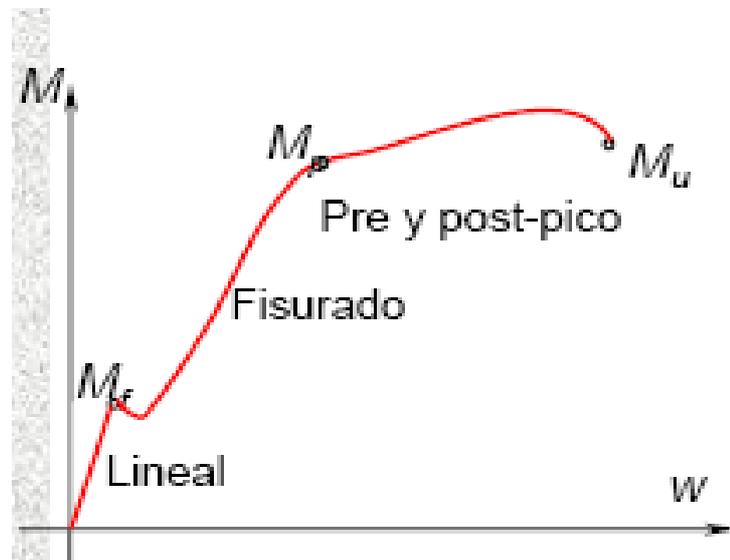


Fig.3.4 (La inclusión de fibras como refuerzo del hormigón. A. Aguado) [7]

En la figura 3.4, se muestra un diagrama donde se reproduce el comportamiento hasta rotura de secciones con refuerzo mixto fibras + armadura pasiva tradicional.

- Cantidad de fibras en hormigón fresco



Imagen 3.5 Fibras

En la imagen 3.5, se muestran la cantidad de fibras a introducir en una amasada específica.

- TIPOS DE FIBRAS:

Fibras de acero



Estas fibras (imagen 3.6), deberán ser conformes con UNE 83.500-1 y según el proceso de fabricación se clasifican en: trefiladas (Tipo I), cortadas en láminas (Tipo II), extraídas por rascado en caliente (virutas de acero) (Tipo III) u otras (por ejemplo, fibras de acero fundidas) (Tipo IV). La forma de la fibra tiene una incidencia importante en las características adherentes de la fibra con el hormigón y puede ser muy variada: rectas, onduladas, corrugadas, conformadas en extremos de distintas formas, etc.

Imagen 3.6 Fibras metálicas

La longitud de la fibra (l_f) se recomienda sea, como mínimo, 2 veces el tamaño del árido mayor. Es usual el empleo de longitudes de 2,5 a 3 veces el tamaño máximo de árido. Además el diámetro de la tubería de bombeo, que exige que la longitud de la fibra sea inferior a $2/3$ del diámetro del tubo. Por otro lado, la longitud de la fibra debe ser suficiente para dar una adherencia necesaria a la matriz y evitar arrancamientos con demasiada facilidad.

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 espaciamiento 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.

· ACEROS	- Al carbono - Inoxidables (Refractarios, Est. Marinas)
· LONGITUD	19 / 76 mm
· DIAMETRO	0,3 / 1 mm
· FORMAS	- Onduladas - Acampanadas en los extremos - Encoladas (25 a 50 unid.) - Clip

- PROPIEDADES:

- Las fibras afectan poco a la resistencia a compresión:
 - Incrementos $\leq 25\%$
 - Aumento importante de la resistencia a tracción
 - 5% fibras en dirección tensión: 133%
 - Distribución al azar: 30%
 - Resistencia a flexión: se incrementa hasta un 100% con respecto al hormigón sin fibras.
 - Incremento de la tenacidad (energía necesaria para la ruptura completa del material), es 40 veces mayor.
 - Menor docilidad: añadir la fibra al final.
 - Mayor durabilidad: menos fisuras.
 - Mayor costo: adición 1% (doble costo).
- Las fibras metálicas y la electricidad:

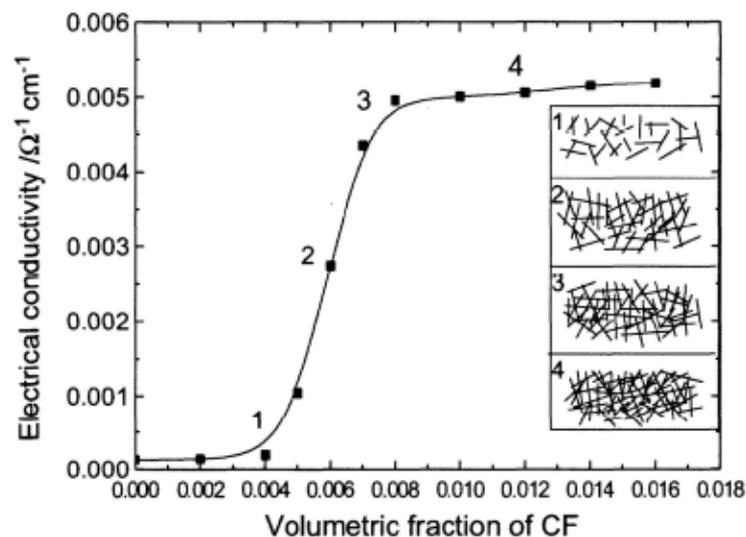


Gráfico 3.6 Intersección de control de producción con control de recepción. (HRF. A. Aguado) [10]

Como podemos observar en el gráfico 3.6, al aumentar la cantidad de fibras metálicas en un hormigón, aumentamos también la conducción de electricidad en este.

Este detalle se podría tener en cuenta a la hora de emplear este tipo de fibras en hormigones que se van a aplicar en determinadas zonas o usos, ya que en algunos casos no sería recomendable.

APLICACIONES

- Firmes de carreteras y aeropuertos.
- Escudos de túneles.
- Forjados.
- Protección de laderas. Gunitados.

Fibras poliméricas



Imagen 3.7 Fibras poliméricas

Las fibras plásticas (imagen 3.7), están formadas por un material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster) extrusionado y posteriormente cortado. Estas pueden ser adicionadas homogéneamente al hormigón, mortero o pasta. Se rigen por la norma UNE 83500-2 y, según el proceso de fabricación se clasifican en: monofilamentos extruidos (Tipo I), láminas fibriladas (Tipo II).

Sus dimensiones pueden ser variables al igual que su diámetro y su formato:

- Micro-fibras: < 0,30mm diámetro
- Macro-fibras: > 0,30mm diámetro

Las macro-fibras pueden colaborar estructuralmente, siendo su longitud variable (desde 20mm a 60mm), que debe guardar relación con el tamaño máximo del árido (relación de longitud 3:1 fibra: TM).

Las micro-fibras se emplean para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, especialmente en pavimentos y soleras, pero no pueden asumir ninguna función estructural. También se utilizan para mejorar el comportamiento frente al fuego, siendo conveniente en este caso que el número de fibras por kg sea muy elevado.

Además de por sus características físico-químicas, las micro-fibras se caracterizan por su frecuencia de fibra, que indica el número de fibras presentes en 1kg, y que depende de la longitud de fibra y muy especialmente de su diámetro.

-Fibras de Polipropileno:

- Cortada y lisa (multifilamento o filamento individual), (imagen 3.8).



Imagen 3.8 Fibras poliméricas en multifilamentos.

· En malla (multifilamento fibrilado o rafia), (imagen 3.9).



Imagen 3.9 Fibras poliméricas fibriladas.

- Hormigón con fibras poliméricas.



Imagen 3.10 Hormigón con fibras poliméricas (HRF. A. Aguado) [10]

-Ventajas:

- Reduce retracción plástica (hasta 7 veces).
- Disminuye permeabilidad y absorción de agua.
- Aumenta resistencia de agrietamiento por impacto.
- Distribución homogénea de fibras.
- Mejora la trabajabilidad del hormigón y elimina el resudado de la lechada.
- Permite una menor adición del agua (un exceso produciría segregaciones)
- Elimina las manipulaciones del mallazo.

- Resistente a los álcalis.
- Temperatura de fusión alta : 165° C
- Coste bajo.

- Inconvenientes:

- Escasa resistencia al fuego.
- Sensibilidad a la luz solar y al oxígeno.
- Módulo de elasticidad bajo.
- Adherencia al mortero reducida.

- La matriz protege del fuego y del ambiente.

- Módulo, adherencia: Fibras especiales.

- Tipos:

· Caricrete (Shell):

Hilos cortados o mantas continuas.

Módulo E: 1/8 Gpa.

Tensión de rotura a tracción 300/400 Mpa.

Diámetro 50 µm/0.5 mm.

· Krenit:

Módulo E: 9/18 Gpa.

Tensión de rotura a tracción 500/700 Mpa.

Diámetro:

- 20 µm/120 µm → Sustituir Amianto.
- 30 µm/200 µm → Refuerzo

- Características: (Fibras que se comercializan actualmente en España)

· Diámetro: 10 a 32µm.

· Longitud: 6 a 20mm.

· Densidad: 0.91g/cm³.

· Resistencia a tracción: 300 a 770GPa.

- Alargamiento en rotura: 20 a 30%.
- Punto fusión: 160 a 170°C.
- Modulo elasticidad: 3.5 GPa. 5-77
- Dosificación: 450 a 950gr/m3.

- Productos fabricados con fibra de polipropileno:

· Monofilamento:

- Paneles de fachada
- Soleras

· Fibrilado:

- Paneles de fachada
 - Pilotes
 - Soleras

· Fibra Krenit:

- Paneles de fachada
- Placas
- Conductos
- Tejas

APLICACIONES

- Láminas delgadas (sustituye fibra de amianto)
 - Contenido $\geq 5\%$ de fibra.
 - Amianto: mayor resistencia a tracción.
 - Fibra de polipropileno:
 - > Tenacidad.
 - > Resistencia a tracción.
- Refuerzo secundario del hormigón
 - Contenido 1 a 3 %.
 - Control de fisuración (retracción, ambiente).
 - Fibras cortas: 6 / 60 mm.

- Soleras y pavimentos industriales
- Capas de compresión de forjados
- Recrecido de suelos (≥ 3 cm.)
- Revoco de fachadas.
- Morteros especiales.
- Prefabricados:
 - Bordillos.
 - Tubos.
 - Celosías.
 - Jardineras...

Otras fibras Inorgánicas



Imagen 3.11 Fibras de vidrio

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

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 realizan actuaciones tanto sobre la fibra como sobre la matriz cementícea para su protección.

En este sentido, las fibras pueden presentarse con una capa protectora superficial de un material epoxidico que reduce la afinidad de las mismas con el hidróxido de calcio, proceso responsable de la fragilización del compuesto.

Las Mallas de Fibra de Vidrio (imagen 3.12), son resistentes a la dilatación, a la descomposición y tienen propiedades ignífugas.

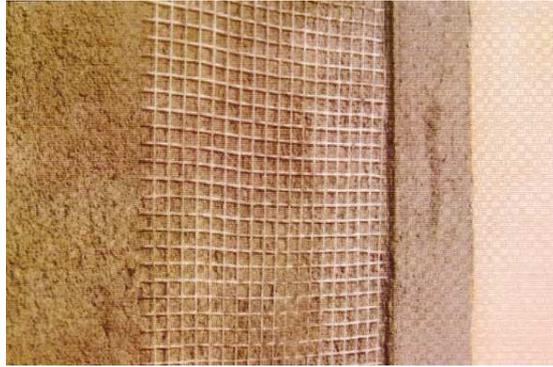


Imagen 3.12 Malla de fibra de vidrio.

- De las distintas fibras mencionadas, unas de las que mejor satisfacen técnicamente son las de polipropileno.

El uso del hormigón reforzado con fibras ha pasado de las pequeñas escalas de aplicación experimental a los trabajos de rutina y aplicaciones de campo, que involucran su utilización en muchos de miles de metros cúbicos por año en todo el mundo.

El agregado de fibras para alcanzar determinadas propiedades y exigencias en el hormigón, se asienta sobre bases técnicas y científicas indudablemente muy sólidas.

La tenacidad o resistencia es la medida de la capacidad de absorción de energía de un material y es utilizada para caracterizar la aptitud para resistir fracturas cuando es sometido a esfuerzos estáticos, dinámicos o impacto de pesos.

Otra de las características del hormigón fibrado, es su alta propensión a evitar la formación de fisuras y grietas, y a la propagación de las mismas. La explicación de esta capacidad reside en que el compuesto fibra-hormigón posee una elevada resistencia a la tracción, aportada por las 500 +/- 150 MPa de las fibras (aunque no en relación lineal con la resistencia del conjunto), más posibilidades de elongación plástica ante las tensiones potencialmente generadoras de fisuras.

Sometidas a cargas dinámicas, las fibras pueden sostener la masa, aun después de los primeros agrietamientos. El beneficio resultante es otorgar al hormigón considerable ductilidad pos agrietamiento. La transformación de un material frías en elasto-plástico incrementa las capacidades para resistir cargas de impacto. El hormigón fibrado incorpora millones de fibrillas bien ancladas en las tres direcciones de coordenadas, para absorber altas sollicitaciones sin fisuras ni grietas.

La adición de fibras al hormigón permite que estructuras sin altas exigencias de cargas puedan hacerse más delgadas de las que usualmente se refuerzan secundariamente con acero. Gran número de elementos convencionales manufacturados con hormigón premoldeado, necesitan armaduras de acero

para reforzarlos solamente durante el estibaje, manipuleo y transporte, aunque ulteriormente no sean sometidos a sollicitaciones significativas en su lugar de emplazamiento. Además de las dificultades de instalación, el acero necesita una capa suficiente de hormigón sobre él mismo para evitar su posible oxidación y corrosión, más la aparición de ulteriores manchas de de óxido en las superficies. La utilidad del refuerzo de acero durante la vida de la pieza fue prácticamente nula.

Las fibras se elaboran con polipropileno virgen; material impermeable, hidrófugo que no es mojado por el cemento, mortero o revoque. La perfecta distribución de las fibras entre las partículas de la masa se obtiene por efecto mecánico. No es necesario un largo contacto entre las fibras y el cemento, basta con introducirlas durante la preparación de la mezcla.

Las fibras se presentan en longitudes de media, una y dos pulgadas. Sus efectos son iguales, dependiendo la elección de las preferencias del usuario y también de las dimensiones de la aplicación. La proporción indicativa de uso es de un kilogramo por metro cúbico de hormigón, pero está vinculada con las sollicitaciones que debe atender, pudiendo, según el caso, satisfacerse con proporciones hasta 25 % menores. Esto debe determinarse por ensayo de probetas.

El hormigón adicionado con fibras obtiene las siguientes propiedades: lo refuerza tridimensionalmente, evita la formación de hundimientos y fisuras en edades tempranas, impide y controla la formación de grietas en edades superiores, incrementa la resistencia a la tracción, flexión y compresión, aumenta la resistencia a los impactos, las cargas repetitivas y vibratorias, evita el desgranamiento, el deslizamiento del hormigón en planos inclinados, en el gunitado evita el deslizamiento vertical, reduce la permeabilidad y aumenta la resistencia a los factores abrasivos y corrosivos.

La resistencia mecánica y las fibras:

La efectividad de las fibras puede valorarse por medio de la energía de rotura, expresada en Julios (J), que se evaluará para hormigón moldeado mediante la norma UNE 83.510. Alternativamente, al objeto de reducir la dispersión y los tiempos de ensayo, el Autor del Proyecto o, en su caso, la Dirección Facultativa valorarán, bajo su responsabilidad, el empleo de otros procedimientos, como el ensayo de doble punzonamiento sobre probeta cilíndrica de 15x15 cm (ensayo Barcelona), descrito en UNE 83515/07.

Con el fin de aumentar la resistencia a tracción del hormigón, y detener o limitar la ampliación de microgrietas, se debería de emplear un mecanismo adecuado de resistencia.

En el hormigón convencional, el único mecanismo que resiste es la pasta de cemento (Fig. 4.2.a y b).

Cuanto mayor sea la cantidad de agregados, menor es la distancia entre los granos. En consecuencia, según (Prado & Van Mier, 2003), las microgrietas se pueden propagar más rápido y más fácilmente en un hormigón simple con una cantidad mayor de volumen de agregados (Fig.3.1.a), en comparación con el hormigón con menos volumen de áridos (Fig.3.1.b).

En el caso del hormigón con fibras (Fig.3.2.c,d), el desarrollo controlado de microfisuras puede ser muy eficaz.

Si hay más fibras y el espacio entre fibras es el menor posible, con una orientación óptima, estarán presentes en las zonas de microfisuración. Cuanto menor sea la distancia de fibra, más lenta es la propagación de las microfisuras (Van Mier, 2004 a,b).

Como consecuencia de ello, la primera macrofisura se desarrollará con un mayor esfuerzo de tensión y podrá ser localizada.

En la siguiente figura (fig.3.7), se muestra un hormigón con fibras bajo la acción de un esfuerzo por tracción uniaxial; a) grieta producida en hormigón con las fibras colocadas en la misma dirección a la fuerza a tracción ; b) grieta producida en hormigón con fibras orientadas al azar tras la aplicación de una fuerza a tracción.

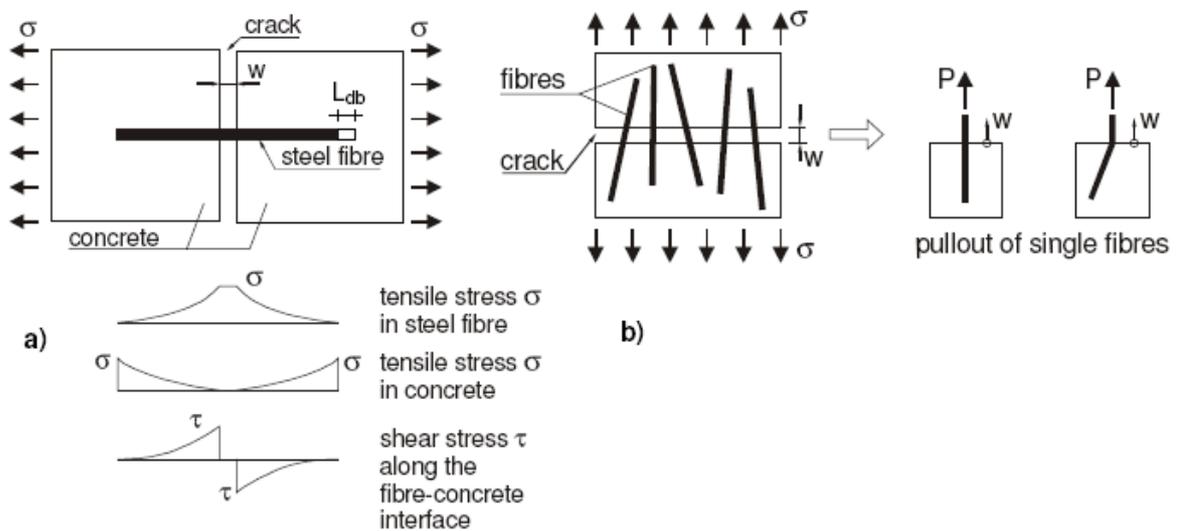


Fig. 3.7 Disposición de fibras. (I. Markovic) [9]

Se llega a la conclusión, de que el conjunto hormigón-fibras, trabaja mucho mejor tras la aplicación de una fuerza a tracción, cuando las fibras están orientadas en la misma dirección que la fuerza.

En la figura 3.8, se muestra en la primera fila el proceso de retirada de las fibras en posición lineal con respecto a la fuerza P , y en la segunda fila el proceso de retirada de las fibras en posición inclinada con respecto a la fuerza P .

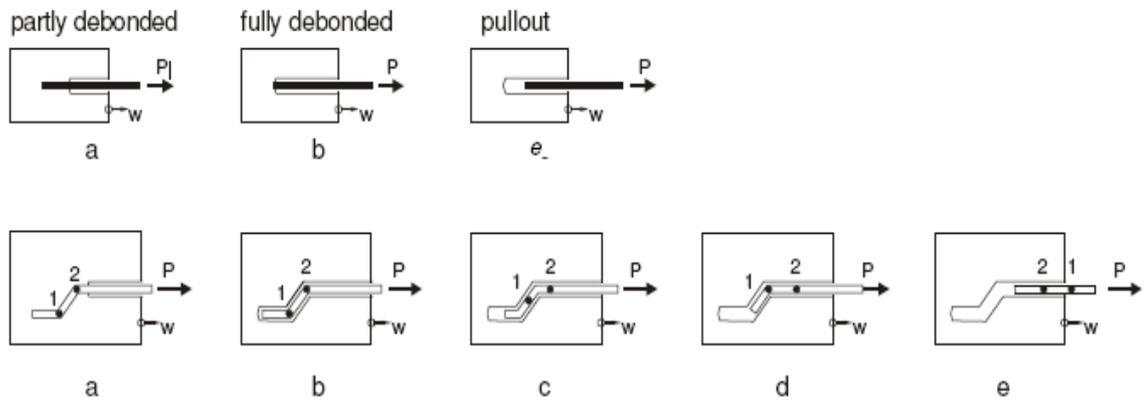


Fig. 3.8 Disposición de fibras. (I. Markovic) [9]

3.2_DOSIFICACIÓN AUTOCOMPACTANTE + FIBRAS

Como indica la EHE, al dosificar un hormigón autocompactante, deberán contemplarse las correspondientes exigencias relacionadas con el proyecto, a saber:

- Exigencias estructurales: espacio entre barras de armadura, dimensiones del elemento, complejidad arquitectónica del encofrado, caras vistas, particularidades del proyecto que puedan influir en el escurrimiento del hormigón como variaciones de espesores, abultamientos, etc.
- Operativas: modalidad de llenado (bomba, cubilote, canaleta, etc.), velocidad y duración de llenado, características del encofrado, visibilidad del hormigón durante el llenado, distancia a la que ha de llegar el escurrimiento, altura de caída, accesibilidad del camión hormigonero, posicionamiento de los equipos de bombeo, etc.
- Ambientales: clima y temperatura ambiente en el momento del llenado, temperatura de los materiales, duración del transporte, eventuales situaciones críticas de tráfico, etc.
- De prestaciones: clase de exposición ambiental, resistencia característica, y demás requisitos del proyecto.

Como características generales, en un hormigón autocompactante el contenido total de finos (tamaño de partícula $<0,125$ mm), es decir, cemento, adiciones y fillers, se encuentra en el intervalo de $450-600$ kg/m³ (180 a 240 litros/m³) aunque el empleo de aditivos moduladores de viscosidad permite utilizar cantidades inferiores de finos. El contenido de cemento está normalmente en el rango de 250 a 500 kg/m³. El volumen de pasta (agua, cemento, adiciones minerales activas, fillers y aditivos) se encuentra habitualmente por encima de los 350 litros/m³.

El volumen de árido grueso resulta menor en el hormigón autocompactante que en el hormigón convencional, generalmente no superando el 50% del total de áridos y siendo su tamaño máximo inferior a los 25 mm. La pasta es la encargada de proporcionar la fluidez "lubricando" el sistema y arrastrando el árido.

En los últimos años se han propuesto varios métodos de dosificación, generalmente empíricos, para el hormigón autocompactante. La mayoría separa el proceso en dos fases de diseño: una "continua" que cubre por un lado la pasta (agua, aditivo, cemento y fillers), y por otro lado la fase del "esqueleto granular", que considera el árido fino y grueso. Existen también modelos teóricos o semiteóricos, basados en sistemas iterativos hasta obtener la dosificación final.

Para que el hormigón obtenga las características de un HAC su dosificación debe ser cuidadosamente estudiada.

Se insiste en la necesidad de utilizar una alta cantidad de finos ya que sirven para dar cohesión a la mezcla y para evitar la segregación.

Las características de las mezclas de HAC difieren respecto de las de un hormigón convencional:

- Alta fluidez:
 - Uso de superplastificantes
 - Mayor volumen de pasta (> 35 %)
 - Uso de finos minerales (tamaño de partícula < 125 micras)
 - Menor contenido de árido grueso

- Bajo riesgo de bloqueo:
 - Menor contenido de árido grueso
 - Árido grueso de menor Dmax (\leq 20-25 mm)

- Cohesión:
 - Baja relación agua / finos
 - Uso de finos minerales y/o AMVs (aditivos modificadores de la viscosidad)

Aunque no existen métodos específicos para el diseño del hormigón autocompactante, se aplicarán los requisitos básicos para los componentes de hormigón de la EN 206-1:2000 en su Apartado 5.1 y se cumplirán las especificaciones de la Instrucción EHE.

En un hormigón autocompactante los componentes de la mezcla son variados y deben estudiarse cuidadosamente para conseguir que un hormigón de alta consistencia y cohesión pueda atravesar una densa armadura con un perfecto relleno sin bloqueo del árido grueso y sin segregación ni exudación.

Ejemplos de dosificaciones:

Hormigón	1	2	3	4	5	6	7
Tipo de cemento	I 42,5 R/SR	CEM II/A-V 42,5 N	CEM II/A-V 42,5 R	CEM I/A-V 42,5 R	I 42,5 R/SR	CEM II/A-S 42,5 N	BL II/A-L 42,5 R
Tipo de adición	Ceniza Volante	Filler Calizo	Filler Calizo	Filler Calizo	Filler Calizo	Filler Calizo	Filler Calizo
Cemento	280 Kg	300 Kg	325 Kg	350 Kg	325 Kg	350 Kg	375 Kg
Adición (*)	200 Kg	200 Kg	200 Kg	200 Kg	220 Kg	200 Kg	156 Kg
Agua	140 Kg	150 Kg	162 Kg	193 Kg	179 Kg	193 Kg	206 Kg
Arena	960 Kg	960 Kg	960 Kg	960 Kg	960 Kg	960 Kg	960 Kg
Grava	695 Kg	695 Kg	695 Kg	695 Kg	695 Kg	695 Kg	695 Kg
Aditivo	4,62 Kg (1,65%)	3,9 Kg (1,30%)	6,50 Kg (2%)	7,35 Kg (2,10%)	7,05 Kg (2,17%)	2,8 Kg (0,80%)	4,31 Kg (1,15%)
a/c	0,50	0,50	0,50	0,50	0,55	0,55	0,55

(*) Sin incluir la adición del propio cemento.

Tabla 3.5 Dosificaciones de HAC (E. B. Bermejo) [11]

Desde el Método General, inicialmente presentado por Okamura en Tokio en 1986, muchas han sido las propuestas de diseño de mezcla para los HAC. Varias de estas propuestas se presentan como modificaciones o evoluciones del método general y resultaron en una serie de aplicaciones.

MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

En este apartado se presentan, en orden cronológico de aparición, los métodos más difundidos para la dosificación de mezclas de hormigón autocompactante.

· Método de la suspensión de sólidos del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Sedran et., 1996)

El método de diseño propuesto por Sedran et al. Se basa en el Modelo de Suspensión de Sólidos (de Larrard et al., 1995). El principio del Modelo de Suspensión de Sólidos es que parte del agua del hormigón se emplea para rellenar los huecos entre el esqueleto granular (áridos más ligantes), y el resto para controlar la trabajabilidad.

Reduciendo al mínimo las oquedades en el esqueleto granular, la trabajabilidad de una mezcla puede verse incrementada para el mismo contenido de agua. En esencia, la compacidad del árido y del ligante se mejora.

· Estudio granulometría: Método General.

El llamado "Método General" de Okamura y Ouchi (1997) incluye una propuesta de dosificación que define las proporciones de árido grueso, árido fino y pasta en función de la densidad de Conjunto del árido grueso. La Optimización de la composición de la pasta se lleva a cabo por medio de ensayos sobre morteros.

El procedimiento se describe a continuación:

Se considera como árido grueso todas las partículas retenidas en el tamiz de 4 mm.

Se considera árido fino la fracción granulométrica entre 0.09mm y 4 mm.

Se considera como finos todas las partículas de tamaño inferior a 0.063 mm.

Se determina la densidad de conjunto del árido grueso en Kg/m³.

La dosificación de árido grueso por metro cúbico de hormigón corresponde al 50% de la masa obtenida en el ensayo de densidad de conjunto.

Este criterio suele conducir a dosificaciones de aproximadamente 800 kg/m³ de árido grueso, lo que representa un volumen sólido del orden del 30 – 34% del volumen total del hormigón. Las cuantías así obtenidas son sensiblemente inferiores a las normalmente empleadas en hormigones tradicionales.

El resto del volumen de hormigón se completa con un mortero. El volumen sólido del árido fino debe ser el 40% del volumen del mortero. Las proporciones relativas de agua, cemento, aditivo y otros finos que deben completar el resto del volumen del hormigón se determinan por medio de ensayos sobre morteros.

La relación agua/cemento o agua/material cementante en general estará condicionada por las exigencias mecánicas y de durabilidad del hormigón.

Con estas limitaciones se realizarán ensayos optimizando las dosificaciones de los componentes mediante pruebas de flujo y embudo en V para morteros.

Se considera que un valor adecuado en estos ensayos es: $G_m = 5$ y $R_m = 1$ a 2. Esto equivale a tiempo de flujo entre 5 y 10 segundos y diámetros de escurrimiento próximos a 250mm.

El procedimiento concluye con ensayos sobre hormigón por medio del Escurrimiento y se propone alcanzar un escurrimiento de 650mm.

Estos criterios se han determinado mediante estudios experimentales sobre la tendencia al bloqueo de los áridos (Okamura, 1996, 2000), utilizando los ensayos de la caja U y el Vesel test.

· **Método ACI (American Concrete Institute)**

Se parte de un criterio inicial, donde se define el comportamiento del Escurrimiento deseado.

A continuación se ajustan las proporciones de los materiales siguiendo las recomendaciones de las tablas 3.6 y 3.7.

Se genera una amasada de prueba y se realizan los ensayos de Escurrimiento, anillo J y caja L.

A partir de los resultados de la amasada de prueba se ajustan las proporciones de los materiales hasta que la ésta alcance las propiedades de autocompactabilidad inicialmente definidas.

Escurrimiento (mm)	< 550	550 - 600	> 650
Contenido en finos (Kg)	355 - 385	385 - 445	> 458

Tabla 3.6 Sugerencia del ACI para el contenido en finos. (V. Jonhson) [12]

Parámetro	Recomendación
% Grava (<12 mm)	28 – 32
% Pasta	34 - 40
% Mortero	68 - 72
Agua / material cementante	0,32 – 0,45
Contenido en cemento	386 - 475

Tabla 3.7 ACI Valores recomendados para dosificar un HAC. (V. Jonhson) [12]

· Diseño de mezclas

Composición de la mezcla:

Las dosificaciones de los distintos componentes que entran a formar parte de un HAC deben ser cuidadosamente estudiadas para poder realizar un hormigón de elevada consistencia y una cohesividad que atraviese un denso armado sin bloqueo del árido grueso y que sea compatible con la ausencia de segregación.

Se puede partir de unos "Criterios de construcción" por la demanda especial que existe para cada proyecto, pero como norma se debe de partir de las solicitudes generales de relación agua-cemento, resistencia a la compresión, separación entre armaduras, impermeabilidad, etc. que son los requerimientos comunes en todos los proyectos.

La siguiente fase en el diseño es averiguar el "volumen mínimo de pasta" de la mezcla para rellenar todos los huecos entre las diferentes granulometrías de los agregados (arenas y áridos); teniendo en cuenta que dos volúmenes iguales tienen una superficie específica diferente en función de las proporciones de áridos gruesos, intermedios y arenas debido a que el árido grueso es el que presenta menor superficie específica que el intermedio o que las arenas para un mismo volumen.

Los criterios de bloqueo se basan en calcular la relación entre el árido grueso, el árido total y el espacio entre armaduras que define un punto de inflexión por encima del cual la posibilidad de bloqueo se incrementa.

Diseño inicial de la mezcla:

Al diseñar la mezcla es preciso tener en cuenta las proporciones relativas de los componentes clave en cuanto al volumen y no a la masa. Los márgenes indicativos generales de las proporciones y cantidades para alcanzar la autocompactación pueden ser:

- Relación agua / finos en volumen de 0,80 a 1,10
- Contenido total de finos de 400 a 600 por metro cúbico

- El contenido de árido grueso suele ser del 28 al 35 % por volumen de la mezcla
- La relación agua/cemento se selecciona sobre la base de los requisitos de EN 206.

En general, se aconseja una táctica conservadora de diseño para garantizar que el hormigón pueda mantener sus propiedades especificadas en fresco a pesar de las variaciones en la calidad de las materias primas.

También deben esperarse y permitirse algunas variaciones en el contenido de humedad de los áridos en la fase de diseño de la mezcla. Normalmente, los aditivos que modifican la viscosidad constituyen una útil herramienta para compensar las fluctuaciones debidas a cualquier variación en la granulometría de la arena y el contenido de humedad de los áridos.

Ajuste de la dosificación:

Los ensayos de laboratorio sirven para verificar las propiedades de la composición inicial de la mezcla. Si es preciso, en este momento deberán aplicarse los ajustes en dicha composición.

Una vez satisfechos todos los requisitos, la mezcla debe contrastarse a escala completa en la planta de hormigón o en la obra.

Producción:

La producción del hormigón autocompactable debe ejecutarse en plantas donde el equipamiento, el funcionamiento y los materiales se controlen de manera adecuada. En consecuencia, la producción debe realizarse en plantas con sistemas de calidad que cumplan la ISO 9000 o norma similar.

Se recomienda que la plantilla de producción que participe en la fabricación de HAC tenga una mínima experiencia o reciba una formación.

• Almacenamiento de los componentes.

El almacenamiento del cemento debe hacerse en silos o recipientes estancos que garanticen su aislamiento de la humedad. El tiempo de almacenamiento debe ser el mínimo posible, siendo aconsejable que no supere 1, 2 ó 3 meses para las clases resistentes 52.5, 42.5, 32.5 respectivamente. En caso contrario, se deben realizar ensayos de resistencia y fraguado del cemento antes de usarlo.

Si es posible, los áridos deben estar cubiertos para minimizar la fluctuación en el contenido de humedad. Deben acopiarse con separaciones que impidan la mezcla de distintas fracciones.

Deben regarse hasta aproximarse a alcanzar su grado de saturación; teniendo en cuenta que una elevada humedad superficial, dificulta la fabricación de HAC, donde es necesario un buen control de la cantidad de agua a emplear. Por otra parte, una humedad inferior a la de absorción implica que el árido

absorba agua de la mezcla de hormigón, disminuyendo la fluidez y aumentando la viscosidad de la misma.

Es necesario disponer de una buena capacidad de almacenamiento para los áridos y las adiciones.

El almacenamiento de los aditivos para hormigón puede realizarse del mismo modo que en el caso del hormigón convencional, de manera que no se contaminen o se alteren sus propiedades.

- **Amasado.**

No hay un requisito respecto para ningún tipo específico de amasadora. Pueden utilizarse las mezcladoras de acción forzada, las mezcladoras de paletas, las amasadoras de caída libre, incluyendo los camiones hormigonera (aunque se debe preferir las amasadoras de amasado forzado). El período de mezcla necesario debe determinarse mediante ensayos prácticos.

En general, los períodos de mezcla deben ser más largos que en el caso de las mezclas convencionales, dado el mayor contenido de finos y debido a la necesidad de dar el tiempo necesario al superplastificante para su dispersión y actuación.

El momento de la adición de aditivos es importante y es preciso acordar los procedimientos con el proveedor después de los ensayos en planta.

- **Control de producción:**

Los hormigones autocompactantes no requieren exigencias específicas en el proceso de la fabricación y amasado respecto al hormigón convencional. El único ligero inconveniente podría derivar de que el HAC es más exigente en el control de sus materias primas, pudiendo verse alterado por pequeñas variaciones de la dosificación. Por tanto, se recomienda tener un cuidado especial en el almacenaje y dosificación de las materias primas, por ejemplo, contemplando la variedad de humedad de los áridos.

Habitualmente, debido a la cantidad y tipos de finos (inertes o no) y aditivos, el hormigón autocompactante requiere un tiempo mayor de amasado que el hormigón convencional para alcanzar una apropiada homogeneidad de la mezcla. Por estas mismas razones, resulta altamente recomendable el uso de amasadoras fijas, evitando el mezclado en camión hormigonera.

- **Proceso de mezcla.**

Al principio de la obra y en caso de carecer de experiencia previa con el diseño de mezcla concreto, es posible que se requieran recursos adicionales para supervisar todos los aspectos de la producción inicial de HAC.

Dado que la calidad del hormigón recién fabricada puede fluctuar al principio de la producción, se recomienda que los ensayos de trabajabilidad sean

realizados por el productor en cada carga, hasta obtener resultados satisfactorios y consistentes.

Posteriormente, cada lote entregado debe comprobarse visualmente antes de transportarlo a la obra y los ensayos rutinarios deben aplicarse con la frecuencia especificada en EN 206.

Ejecución:

- Encofrados y moldes:

Los encofrados y moldes se deben diseñar para resistir adecuadamente las presiones producidas por el hormigón fresco, manteniendo su geometría con ausencia de deformaciones fuera de las tolerancias establecidas en el proyecto.

El encofrado ha de encontrarse en buenas condiciones pero no son necesarias medidas especiales para prevenir la pérdida de lechada.

En el caso de encofrados con una altura superior a los 3 metros, es necesario tomar en consideración la presión hidrostática completa.

La facilidad del HAC para rellenar espacios de geometría complicada, así como adaptarse a cualquier diseño de superficie, hace que sea muy adecuado para la ejecución de paramentos de hormigón visto con acabados arquitectónicos, superficiales o volumétricos.

- Distancias de ejecución:

Aunque es más fácil colocar el HAC que el hormigón ordinario, se aconseja limitar la distancia de caída libre vertical a 5 m y limitar la distancia permisible de flujo horizontal desde el punto de descarga a 10 m.

- Juntas frías:

Aunque el HAC se adhiere bien con el hormigón colocado previamente, la probabilidad de daños resultantes de una junta fría no puede mitigarse mediante vibración, como sucede con el hormigón normal.

- Curado:

La presencia de fibra soporta a la mezcla homogénea y funciona como millones de puentes que distribuyen uniformemente los esfuerzos internos de retracción que tratan de separar la matriz. Estas mismas fibras interceptan la propagación de las micro-grietas y paralizan su crecimiento. Las fibras interrumpen la acción capilar de la humedad y por ende permiten un curado más lento.

Al mezclarse la fibra a una matriz de hormigón, la curva carga-deformación presenta un incremento en la capacidad de carga, así mismo, se mejora el

post-agrietamiento permitiendo sostener cargas hasta valores altos de deformación, dando como resultado, mayor ductilidad en el elemento. En un hormigón sin fibras inicialmente la curva es lineal, luego se presenta un brusco descenso en la capacidad de carga, fallando súbitamente el material.

El incremento de resistencia a la fatiga (que tiene directa relación con la durabilidad), resistencia al impacto y reducción de la permeabilidad, contribuyen a una mayor duración del hormigón beneficiando a largo plazo los costos asociados por mantenimiento.

La distribución tridimensional de las mini-redes, conlleva directamente a la reducción en el agrietamiento del hormigón y consecuentemente a una modificación en su comportamiento; en efecto, en la fase retracción plástica se produce un gran número de micro grietas.

Cuando se somete el hormigón a un esfuerzo, las micro grietas van evolucionando haciéndose mayores y enlazándose unas con otras. Al continuar ejerciéndose la carga, algunas de estas grietas comienzan a hacerse inestables y a fallar traspasando el hormigón de un lado a otro, las fibras definitivamente interrumpen y estabilizan las micro grietas.

La resistencia al impacto (capacidad de absorber energía), como una forma de medir la degradación del hormigón resultante de una carga puntual, refleja las características de pegado de las fibras al mantener unidos los segmentos fracturados de un hormigón originalmente sano. Las modificaciones en la relación del concreto, la propiedad de ser químicamente inerte, (además de antialcalino y no corrosivo), y la reducción en el fraguado, permiten la aplicación de fibras de polipropileno en ambientes de ion cloruro.

No afecta las características de terminación del hormigón, mejora además todas las texturas y tratamientos de superficie, el emparejado con llana, las superficies aplanadas y el agregado expuesto.

- Acabado superficial:

Las superficies de HAC han de nivelarse aproximadamente según las dimensiones especificadas y luego debe aplicarse el tratamiento de acabado en el momento adecuado antes de que se endurezca el hormigón.

Pueden producirse dificultades durante el proceso convencional de endurecimiento final de la superficie en áreas horizontales que deben ser fratasadas.

Un hormigón con fibras se alisa y acaba como cualquier hormigón normal. No requiere de ninguna herramienta especial. La acción de la fibra, normalmente es reducir el asentamiento del hormigón en un 20% a 30%. Esto ocasiona una ilusión de requerimiento de agua adicional pero no deberá añadirse agua.

Para el aumento de asentamiento, deberá usarse un superplastificante o un reductor de agua ya que la adición de agua resultaría en una baja de resistencia.

- Estética:

El acabado estético con fibras dependerá de la manera como se terminó el hormigón. En el hormigón estampado no se verá la fibra.

Si la losa es alisada a mano se verán algunas. Si se acaba con escoba se verán las fibras, pero hay que acercarse mucho. Como regla general la presencia de fibras sobre las superficies de hormigón es aceptable, sin embargo, de no permitirse éstas podrán ser removidas con fuego ligero (soplete).

- Endurecimiento:

El HAC tiende a endurecerse más rápido que el hormigón convencional porque hay muy poca o ninguna agua en la superficie. Por consiguiente, el endurecimiento inicial debe iniciarse en cuanto sea posible después de la colocación con objeto de minimizar el riesgo de fisuras por retracción.

3.3_ CONTROL DE CALIDAD. EHE:

La conformidad de un hormigón con lo establecido en el proyecto se comprobará durante su recepción en la obra, e incluirá su comportamiento en relación con la docilidad, la resistencia y la durabilidad, además de cualquier otra característica que, en su caso, establezca el pliego de prescripciones técnicas particulares.

El control de recepción se aplicará tanto al hormigón preparado, como al fabricado en central de obra e incluirá una serie de comprobaciones de carácter documental y experimental.

En el caso del HAC es particularmente importante que se estandarice el control de recepción. Se debe acordar un procedimiento para la aceptación y cumplimiento al principio de la obra. Debe efectuarse una comprobación visual del hormigón. El controlador ha de asegurarse que un personal competente y preparado realiza los ensayos de aceptación en la obra, en un entorno adecuado; esto incluye un área protegida de condiciones climatológicas, un equipamiento bien calibrado y en buen estado y un suelo equilibrado y estable para realizar los ensayos pertinentes.

TOMA DE MUESTRAS:

La toma de muestras se realizará de acuerdo con lo indicado en la UNE EN 12350-1, pudiendo estar presentes en la misma los representantes de la Dirección Facultativa, del Constructor y del Suministrador del hormigón.

Salvo en los ensayos previos la toma de muestras se realizará en el punto de vertido del hormigón, a la salida de éste del correspondiente elemento de transporte y entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ de la descarga.

REALIZACION DE LOS ENSAYOS:

La comprobación de las especificaciones de la EHE para el hormigón endurecido, se llevará a cabo mediante ensayos realizados a la edad de 28 días.

- Ensayos de docilidad del hormigón:

La docilidad del hormigón autocompactante no puede ser caracterizada de la misma manera que la del hormigón convencional. La caracterización de la autocompactabilidad se realiza a través de métodos de ensayo específicos descritos más adelante, que permiten evaluar las prestaciones del material en términos: de fluidez (mediante ensayos de escurrimiento en embudo V según, UNE 83.364), de resistencia al bloqueo (mediante ensayos del escurrimiento con anillo Japonés, según UNE 83.362, y mediante ensayos de la caja L, según UNE 83.363), y de resistencia a la segregación que se aprecia a partir del comportamiento del material en los ensayos de escurrimiento y embudo en V; en el ensayo de escurrimiento debe observarse una distribución uniforme

del árido grueso y ningún tipo de segregación o exudación en el perímetro de la "torta" final del ensayo.

- Ensayos de resistencia del hormigón:

La resistencia del hormigón se comprobará mediante ensayos de resistencia a compresión efectuados sobre probetas fabricadas y curadas según la UNE 83301, en la que indica una modificación con respecto al hormigón convencional de que las probetas se fabricarán por vertido simple, de una sola vez y sin ningún tipo de compactación. Únicamente se admitirá el acabado superficial con llana.

- Ensayos de penetración de agua en el hormigón:

La comprobación de la profundidad de penetración de agua bajo presión en el hormigón, se ensayará según UNE-EN 12390-8. Antes de iniciar el ensayo, se someterá a las probetas a un período de secado previo de 72 horas en una estufa de tiro forzado a una temperatura de 50 ± 5 °C.

CONTROL PREVIO AL SUMINISTRO:

Se considera recomendable, en cualquier caso, la realización sistemática de los ensayos previos para optimizar la dosificación a utilizar en los hormigones autocompactantes, prestando especial atención a la característica de autocompactabilidad.

Tienen por objeto comprobar, antes del comienzo del suministro, que las características del hormigón que se va a colocar en la obra no son inferiores a las previstas en el proyecto.

CONTROL DURANTE EL SUMINISTRO

- Control documental durante el suministro.
- Control de la conformidad de la docilidad del hormigón durante el suministro. Realización de los ensayos.
- Modalidades de control de la conformidad de la resistencia del hormigón durante el suministro.
- Control estadístico de la resistencia del hormigón durante el suministro. Lotes de control de la resistencia. Realización de ensayos. Criterios de aceptación o rechazo de la resistencia del hormigón.
- Control de la resistencia del hormigón al 100 por 100. realización de ensayos. Criterios de aceptación o rechazo.
- Control indirecto de la resistencia del hormigón. Ensayos. Criterios de aceptación o rechazo.

CERTIFICADO DEL HORMIGON SUMINISTRADO:

Al finalizar el suministro de un hormigón a la obra, el Constructor facilitará a la Dirección Facultativa un certificado de los hormigones suministrados, con indicación de los tipos y cantidades de los mismos, elaborado por el Fabricante y firmado por persona física con representación suficiente.

DECISIONES DERIVADAS DEL CONTROL:

La decisión de aceptación de un hormigón estará condicionada a la comprobación de su conformidad.

- Previas al suministro.
- Previas a su puestas en obra.

El objetivo de este ensayo es estimar la resistencia del hormigón de una parte determinada de la obra, a una cierta edad o tras un curado en condiciones análogas a las de la obra. Estos ensayos pueden consistir en:

- La fabricación y rotura pe probetas.
- La rotura de probetas testigo extraídas del hormigón endurecido, conforme a UNE-EN 12390-3.
- El empleo de métodos no destructivos fiables, como complemento de los anteriormente descritos.

3.3.1_ ENSAYOS:

- CARACTERIZACIÓN DE LOS HAC EN ESTADO FRESCO

Los HAC en estado fresco poseen propiedades distintas a las de un hormigón tradicional. Estas características requieren métodos de ensayos distintos. La utilización del Cono de Abrams daría resultados próximos a 30 cm y otros métodos tradicionales tampoco son aplicables.

Existen métodos de ensayo muy extendidos que nos permite caracterizar los HAC en estado fresco. Entre los más utilizados analizaremos los siguientes:

- Ecurrimiento
- Ecurrimiento con Anillo Japonés
- Embudo en V
- Caja en L
- Caja en U

Estos métodos nos permiten analizar el HAC en su estado fresco y, en algunos casos, simular situaciones semejantes a las de puesta en obra.

3.3.1.1_ Ensayo del escurrimiento (“slumpflow”)

En la siguiente figura (Fig.3,10) se muestran las Dimensiones y montaje del ensayo de escurrimiento

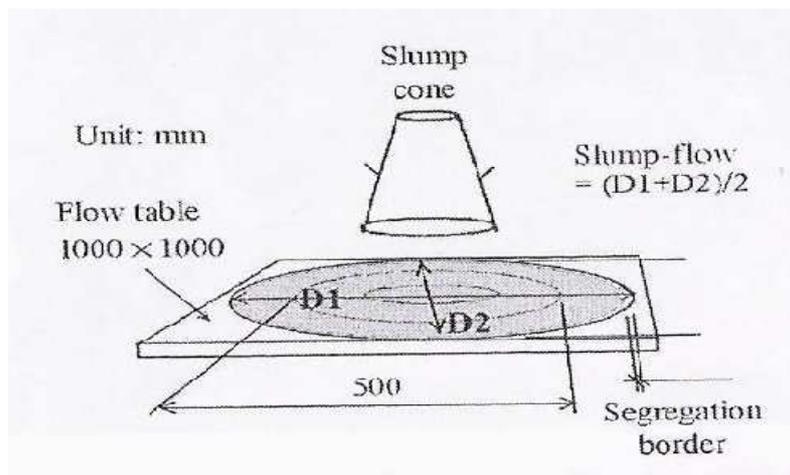


Fig.3.10 Ensayo Ecurrimiento (E. Bermejo) [11]

Este ensayo evalúa la fluidez del hormigón fresco bajo su propio peso. Además nos aporta, cualitativamente, una idea de si el hormigón tiene o no tendencia a la segregación.

Su procedimiento consiste en llenar el Cono de Abrams con una muestra de hormigón, sin ningún tipo de compactación, sobre una placa de superficie lisa y perfectamente plana que presente una marca circular con diámetro de 500mm. Tras levantar el cono y dejar fluir el hormigón, se mide el tiempo que

tarda la masa de hormigón en alcanzar un diámetro de 500mm (T500) y posteriormente el diámetro (Dmax) final alcanzado por la mezcla de hormigón.



En la siguiente imagen (img.3.14), se observa la realización de este ensayo, el de escurrimiento, se ve como se vierte el hormigón autocompactante en el cono de Abrams, situado sobre una plataforma metálica totalmente lisa.



Imagen 3.14 Método de ensayo Escurrimiento



Imagen 3.15 Torta Ensayo Escurrimiento

El aspecto final del hormigón debe ser homogéneo (Imag. 3.15), presentando una buena distribución de la grava. Una concentración de grava en el centro de la masa de hormigón ensayado, indica una tendencia a la segregación, y el borde del hormigón no debe presentar señales de exudación.

En la siguiente imagen (imag. 3,16), se muestra el aspecto de un hormigón autocompactante donde se ha producido segregación del árido grueso en el centro y de pérdida de agua en el frente de avance del ensayo:

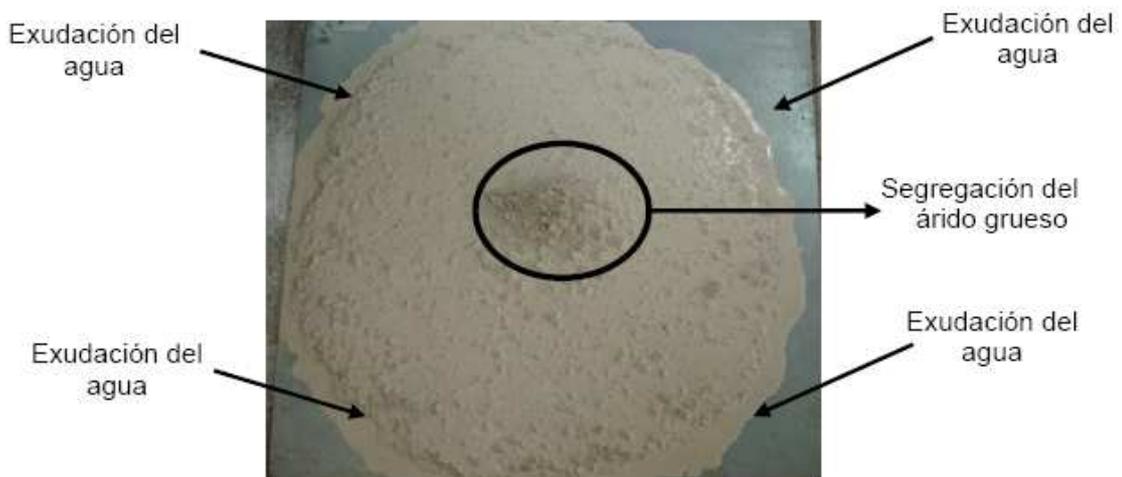


Imagen 3.16 Torta Ensayo Escurrimiento donde se ha producido segregación del árido grueso en el centro y de pérdida de agua en el frente de avance del ensayo. (E. Bermejo) [11]

Podemos observar la segregación en el centro de la "torta", y la falta de árido en los bordes de la misma.

Un resultado como este (imag.3.16), nos indicaría que no es un hormigón válido, ya que no podría dar problemas de retracción y una distribución poco homogénea de la mezcla.

3.3.1.2_ Ecurrimiento con anillo Japonés

La siguiente figura (fig 3.11), nos muestra las dimensiones básicas y montaje del ensayo de escurrimiento con anillo japonés.

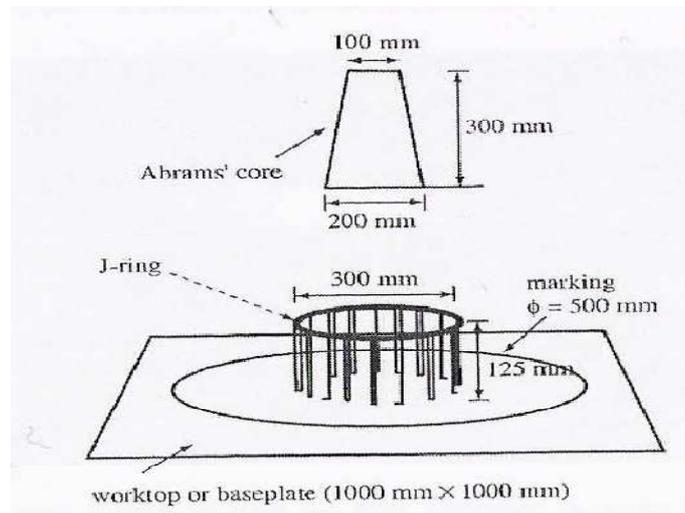


Fig.3.11 Anillo Japonés. (E. Bermejo) [11]

Este ensayo evalúa la fluidez y la capacidad de paso del hormigón a través de las barras de acero. Además se puede observar si hay segregación, exudación, o si se produce una mayor concentración de árido grueso en la zona central. Está normalizado por la norma UNE 83362:2007.

El aparato consiste en un anillo compuesto de barras de acero se desarrolla liberando una determinada masa de hormigón en el centro del anillo. El hormigón debe fluir a través de las barras de acero sin el árido grueso se quede bloqueado entre las mismas.

En la siguiente figura (fig 3.12) se muestra la configuración de las barras en el anillo J: a) tamaño máximo de árido ≤ 20 mm, y b) tamaño máximo de árido > 20 mm.

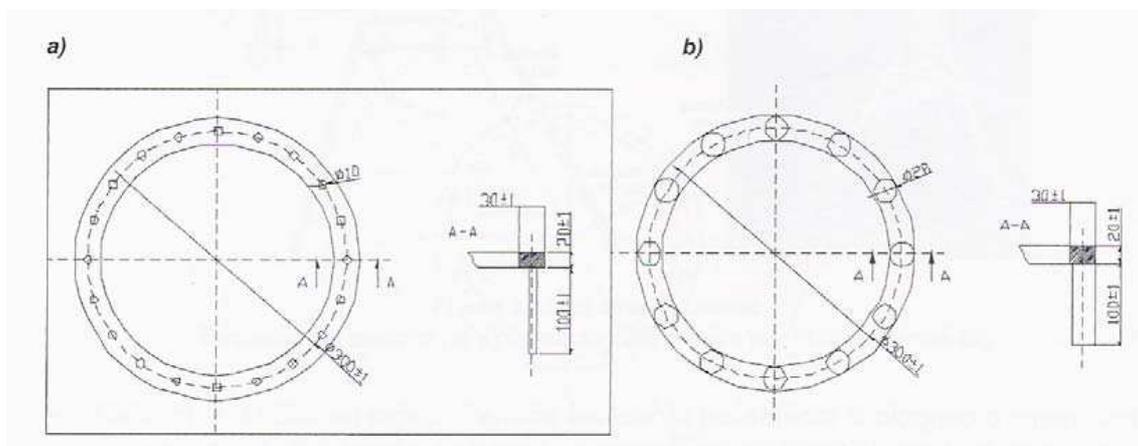


Fig. 3.12 Dimensiones Anillo Japonés(ACHE) [13]



Imagen 3.17 Método Ensayo Anillo Japonés

Se recomienda que el diámetro del anillo sea de 300mm mientras que el diámetro y el espacio entre barras pueden variar en función del diámetro máximo del árido que se utilice o de la armadura que se desee simular.

La UNE 83362 recomienda la utilización de 20 barras de 10mm de diámetro si el tamaño máximo del árido es menor o igual a 20mm. Y 12 barras de 28mm de diámetro si se utilizan áridos mayores que 20mm.



Imagen 3.18 Torta en Anillo Japonés

Al igual que en el Ecurrimiento, se medirá el tiempo T500 y, tras la estabilización del hormigón se medirá el diámetro final (D_f) como resultado específico de este ensayo se mide las alturas H_1 y H_2 alcanzadas por el hormigón, en los bordes interior y exterior del anillo. El anejo de la EHE sobre HAC recomienda que los diámetros alcanzados por el hormigón en este ensayo no deben diferir más que 50mm respecto al ensayo de Ecurrimiento del mismo hormigón.

En las imágenes 3.17 y 3.18 se observa cómo se realiza este ensayo. Primero se introduce el hormigón dentro del cono de Abrans, en el centro de un anillo (img 3.17), y luego se levanta el cono de la misma manera que el slumpflow y se deja fluir el hormigón por la barras (img 3,18). De esta manera se comprueba el bloqueo. Si el hormigón no fluye y quedase atrapado en las barras, este hormigón no sería apto para el paso entre armaduras.

3.3.1.3_ Caja L

En la siguiente figura (fig 3.13) podemos ver la configuración de la caja en L: a) vista general del molde, b) planta, c) disposición de las barras para un tamaño máximo de árido ≤ 20 mm, y d) disposición de las barras para un tamaño máximo de árido >20 mm.

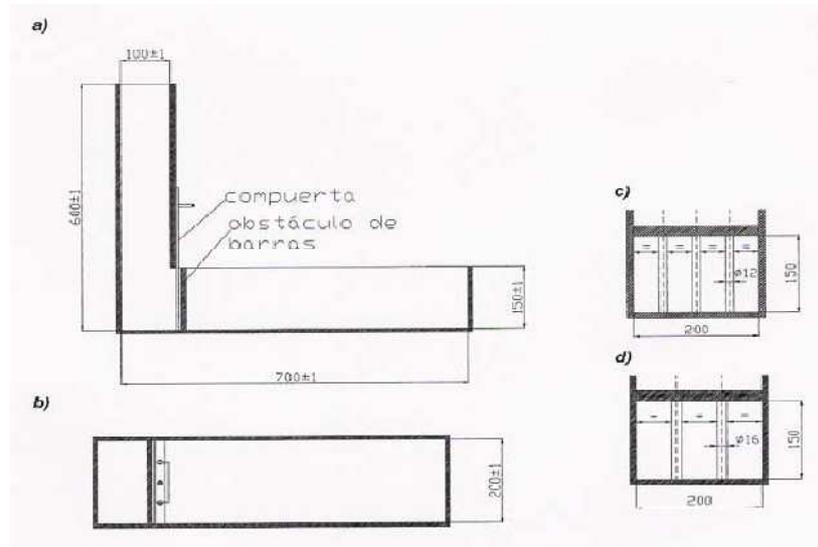


Fig 3.13 Dimensiones Caja L. (ACHE) [13]

El ensayo de la Caja en L evalúa propiedades del HAC como la habilidad de pasar entre las barras de acero, la capacidad de llenado y la resistencia a la segregación.

El aparato está compuesto por un compartimiento vertical y un canal horizontal separados por una compuerta (img 3.19). En el canal, y junto a la compuerta se acopla un sistema de armaduras instalado con la intención de dificultar el paso del hormigón. Tanto los diámetros de las barras utilizadas así como las separaciones entre ellas pueden ser modificados de acuerdo con el tipo de aplicación que se prevea para el hormigón. **Imagen 3.19 Ensayo Caja L**



La norma española, UNE 83363 define la utilización de 3 barras de 12mm de diámetro para ensayar hormigones con diámetro máximo de árido igual a 20mm, y, 2 barras de 16mm de diámetro para hormigones con diámetros máximos de árido superior a 20mm.

Para realizar el ensayo, se rellena completamente el compartimiento vertical de la caja, con una muestra de hormigón, sin compactación, manteniendo la compuerta cerrada.

Tras un minuto de reposo, se abre la compuerta y el hormigón empieza a fluir, por el canal horizontal, pasando a través de las barras de acero.

Respecto a los parámetros medidos en el ensayo, miden el tiempo final, es decir, el tiempo que el hormigón tarda en alcanzar el extremo de la sección horizontal de la caja, una vez se abre la compuerta.

Determinación de las alturas H_1 y H_2 (fig 3.14).

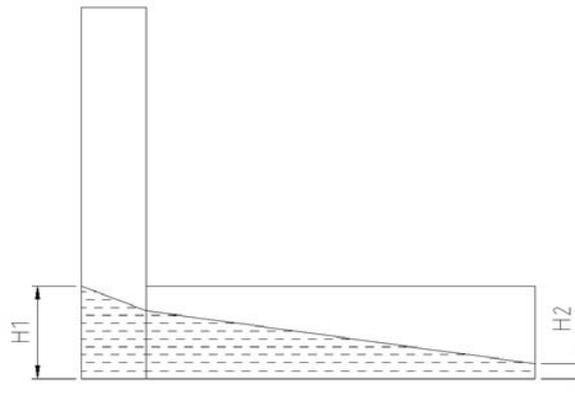


Figura 3.14Caja L (ACHE) [13]

Finalmente, después que la masa de hormigón se estabiliza, se analiza la capacidad de nivelación o el coeficiente de bloqueo, midiendo las alturas que alcanza el hormigón en los dos extremos del canal horizontal, antes y después de las barras de acero, dando como resultado el cociente entre la altura al final y al principio del tramo horizontal h_2 y h_1 (fig 3.14).

Un bloqueo frente las barras de acero puede ser causado básicamente por dos razones, la segregación de la mezcla debido a una dosificación inadecuada o la incompatibilidad entre el tamaño máximo del árido grueso y los vanos entre barras de acero.

En la siguiente imagen (img 3.20) se muestra el resultado final de un ejemplo de ensayo de la caja en L:

- a) Hormigón autocompactante que presenta bloqueo
- b) Hormigón autocompactante con una capacidad de paso adecuada

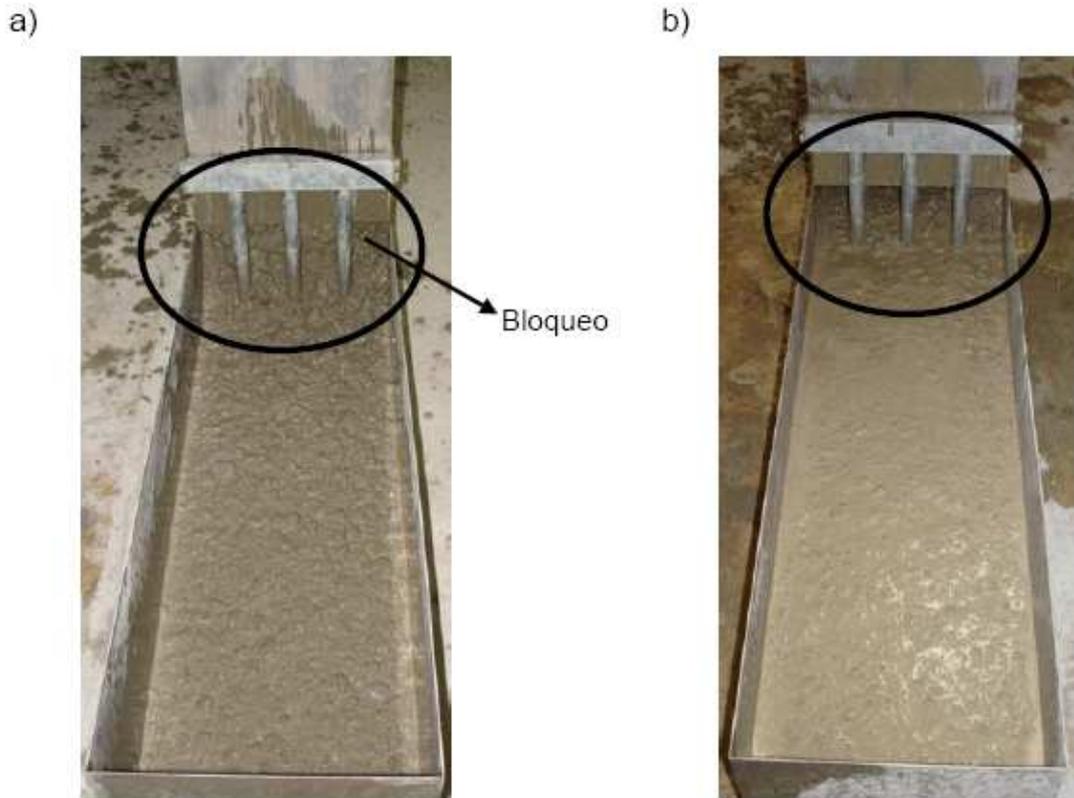


Imagen 3.20 Ensayo Caja L. (E. Bermejo) [11]

Como he mencionado anteriormente, en la imagen 3.20 a), se aprecia el bloqueo del hormigón en las barras. Esto indicaría una segregación o un tamaño máximo del árido demasiado grande para el paso entre armaduras de esas distancias.

3.3.1.4_ Caja en U

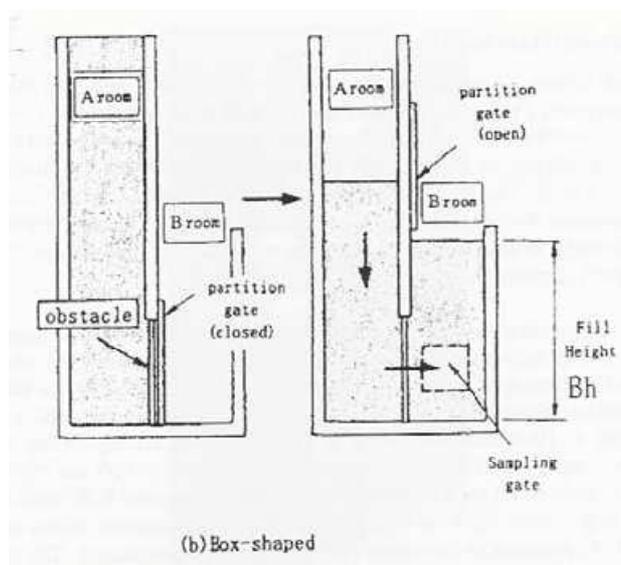


Figura 3.15. Ensayo de la Caja en U (Skarendahl) [2]

Al igual que la Caja L, la Caja U evalúa la habilidad de pasar entre las barras de acero, la capacidad de llenado y la resistencia a la segregación pero con un mayor nivel de exigencia en cuanto a la fluidez.

El aparato está compuesto de dos compartimentos verticales separados por una sección armada y una compuerta. Las dimensiones de la caja U (img 3.21).

El ensayo consiste en llenar el compartimiento alto A con la muestra de hormigón, manteniendo la compuerta cerrada. Tras un minuto de reposo se abre la compuerta, que separa los dos compartimentos, dejando que el hormigón fluya del compartimiento A al compartimiento B, pasando por la zona armada.

Posteriormente se mide la altura final alcanzada por el hormigón en el compartimiento B.



Imagen 3.21 Caja U

Los resultados de este ensayo propuestos por varios autores (Hayakawa 1993, Hokamura 1997, Edamatsu y Nishida 1999) y por guías para la fabricación de los HAC (Japan Society Civil 1998, EFNARC 2002) coinciden en que la altura del hormigón alcanzada en el compartimiento B debe superar los 300mm.

3.3.1.5_ Embudo en V

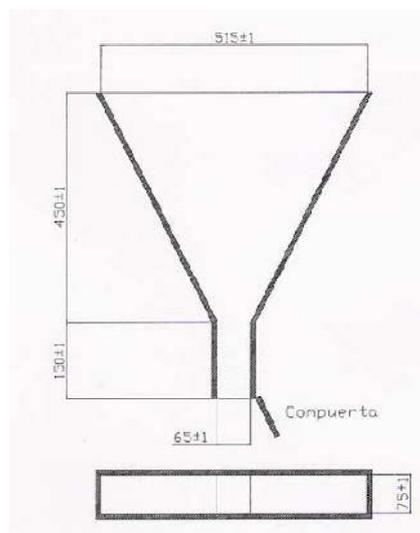


Figura 3.16. Dimensiones del embudo en V (ACHE) [13]



Imagen 3.22 Embudo V

Este ensayo permite evaluar la fluidez, la capacidad del hormigón para pasar por sitios estrechos y la resistencia a la segregación de la mezcla.

Para realizar el ensayo, primeramente se llena un embudo, sin compactación. Tras un minuto de reposo se abre la compuerta que se encuentra en la parte inferior del embudo.

Se mide el tiempo que la mezcla de hormigón tarda en fluir por el embudo desde el momento en que se abre la compuerta hasta que se vea, mirando desde arriba, la primera entrada de luz en la parte baja del mismo.

La masa de hormigón debe bajar de manera continua y con velocidad constante.

Variaciones en la velocidad de caída del hormigón indican que éste se está bloqueando debido a la segregación.



Imagen 3.23 Ensayo Embudo V

Altos tiempos de embudo en hormigones con velocidades de caída constante indican que la mezcla es demasiado cohesiva debido al exceso de finos, a la reducida cantidad de agua o a la baja dosificación de aditivo.

Okamura (1996, 2003) utilizó este ensayo para evaluar la influencia del volumen, forma y distribución del agregado grueso, en la velocidad del flujo del hormigón. Utilizando hormigones con tres módulos de finura distintos (6.45, 6.71 y 6.90) realizó ensayos de embudo en V con distintas aperturas de salida (55,65 y 75 mm).

Okamura concluyó que la frecuencia de contacto entre partículas sube a medida que se reduce la distancia relativa entre ellas.

Sin embargo, concluyó que la forma de agregado no afectará la fluidez del hormigón, cuando se utilice un mismo porcentaje de árido grueso.

Finalmente Okamura concluye que la velocidad de flujo del hormigón a través del embudo con apertura de salida de 55 mm se verá sensiblemente afectada por el módulo de finura del árido grueso.

3.3.1.6_ Otros ensayos

- FillingVessel Test (caja de relleno)

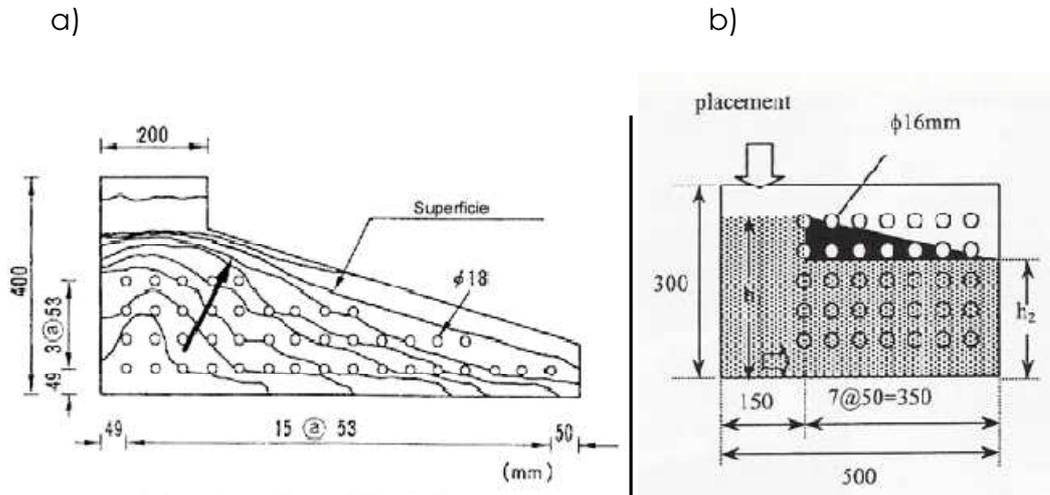


Figura 3.17 Ensayo de la caja de relleno: a) aparato original, y b) aparato modificado. (Skarendahl) [2]

Este ensayo permite evaluar las capacidades de llenado y nivelación del hormigón en zonas densamente armadas. El aparato original fue desarrollado por Ozawa en 1992.

Posteriormente este ensayo sufrió algunas modificaciones; Yurugi, M – 1993 y Takada, K – 1998.

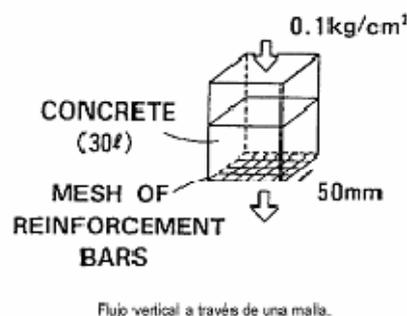


Figura 3.18 Ensayo del flujo vertical (Skarendahl) [2]

El ensayo de flujo vertical (Ozawa - 1992), al igual que el FillingVessel Test, evalúa la habilidad del hormigón de pasar por zonas densamente armadas. Consiste en llenar un recipiente, de aproximadamente 30 litros de hormigón, que posee en la parte inferior un esquema de armaduras.

Tras el llenado, se aplica una pequeña presión (0.1kg/cm²) y el hormigón empieza a fluir a través de la armadura.

- Orimet Test

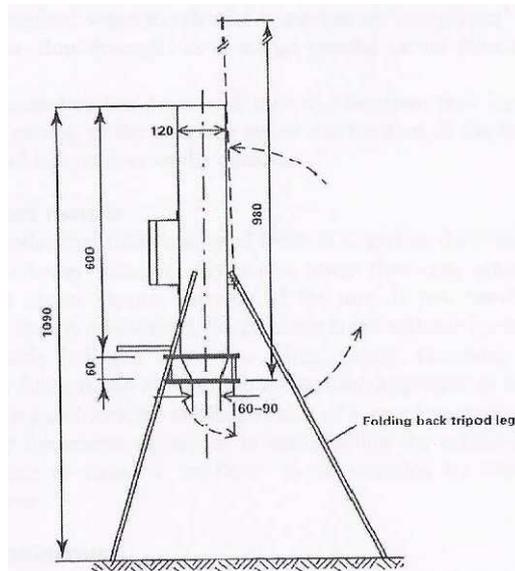


Figura 3.19. Dimensiones del ensayo de Orimet (en mm). El diámetro del orificio varía de 60 mm para morteros a 90 mm para áridos cuyo tamaño máximo es 25 mm, pero el diámetro común es 80 mm. (E. Bermejo) [11]



Imagen 3.24 Ensayo Orimet

El Orimet Test fue desarrollado por Bartos en 1978 inicialmente para evaluar hormigones fluidos y recientemente para analizar el comportamiento de los HAC respecto a su fluidez.

Este ensayo mide la capacidad de fluir del hormigón y en el caso de los HAC se consideran adecuados tiempos inferiores a los 5 segundos (Bartos y Grauers, 1999; Sonebi y Bartos, 2000).

El aparato está compuesto de un cilindro de 100mm de diámetro con fondo en forma de tronco cono invertido y dotado de un sistema de cierre en la parte inferior, (img 3.24). El diámetro interno del orificio puede variar de 70 a 90mm. Para hormigones con un tamaño máximo de árido de 20mm se recomienda que el diámetro inferior sea de 80mm de diámetro (EFNARC – 2002).

Para dificultar y evaluar la capacidad de paso del hormigón, se adaptaron dos barras de 10mm en la extremidad inferior del cilindro perpendiculares al flujo de la mezcla.

El procedimiento del ensayo consiste en llenar el aparato con una muestra de 8 litros de hormigón, sin compactarlo. Diez segundos tras el llenado se abre la compuerta dejando que el hormigón fluya simplemente por la acción de la

gravedad. Se mide el tiempo que el hormigón tarda en vaciar completamente el cilindro. Este procedimiento no debe superar los 5 minutos.

- Ensayos para analizar la segregación de los HAC

Evaluar los niveles de segregación de los áridos es un factor muy importante en este tipo de hormigones, ya que su gran fluidez puede venir acompañada de falta de cohesión.

Muchos autores recomiendan la realización de una inspección visual para comprobar la existencia de segregación o exudación (Khayat 1999), (Sedran 1999), (PCI TR-6-03-2003), (Rigueira 2004). Para cuantificar este parámetro se han desarrollado varios ensayos. Sedran y De Larrard (1999) propusieron utilizar el ensayo de tracción indirecta (Ensayo Brasileño) para romper una probeta cilíndrica y analizar la distribución de los áridos en el interior de la misma.

Cuando el hormigón tiene tendencia a segregar, al realizar este ensayo se detecta una capa superior sin árido grueso. Se define como segregado el hormigón que presente una capa superficial de pasta con 5mm de espesor medido entre la superficie de la probeta y el primer árido de diámetro superior a 8mm.

Ambroise 1997 propuso sacar muestras de distintas alturas de una probeta cilíndrica, que todavía no hubiera fraguado, tamizarlas y evaluar la cantidad de árido grueso en cada capa.

Este tipo de ensayo detecta una segregación de tipo estático, más relacionado con la sedimentación y que podría pasar desapercibida por otros ensayos.

Para evaluar la estabilidad superficial Khayat (1999) y Guisan (1997) propusieron los dos métodos de ensayo. En ambos casos se utilizan probetas cilíndricas de 800 mm de altura y 200 mm de diámetro que se rellenan con una muestra de hormigón sin compactación.

El ensayo consiste en medir el descenso de un disco, de 150 mm de diámetro y 4 mm de espesor, colocado en la superficie de la probeta.

En el primer caso la medida se realiza por medio de un captador de desplazamiento situado en la parte superior de la probeta. El segundo método utiliza, un rayo láser que se refleja en un espejo colocado sobre el disco indicando el desplazamiento.

Los descensos de la placa son debidos a la segregación que se produce cuando un exceso de agua sube a la superficie por exudación.

En la Universidad Politécnica de Cataluña, Gomes (2002) ha desarrollado el ensayo del Tubo en U.

El ensayo consiste en rellenar un tubo, de 160mm en forma de U, vertiendo el hormigón por una de las bocas hasta que éste alcance la otra extremidad del

tubo de manera que las dos extremidades se queden niveladas. Se espera entre 3 y 6 horas hasta que el hormigón empiece a fraguar. Luego se abre el tubo y se cortan discos con 10 cm de espesor de distintas secciones del tubo. Estos discos son posteriormente lavados y pasados por un tamiz de 5mm, para eliminar el mortero. Con el árido grueso, lavado y seco, se determina la relación de segregación, definida por el cociente entre el contenido de árido grueso evaluado en el hormigón y el contenido teórico según la dosificación.

Ésta relación debe ser igual o superior a 0,9 (Gettu y Agulló 2004).

Para verificar la resistencia a la segregación se ha planteado en algunos casos la realización de pruebas de recepción en obra. Entre ellas, Ouchi en 1996, propuso la utilización del ensayo presentado que consiste en verter una muestra del hormigón suministrado en una caja donde una de las paredes laterales ha sido sustituida por una sección armada. La muestra debe fluir a través de la armadura sin que se produzca el bloqueo de la mezcla.

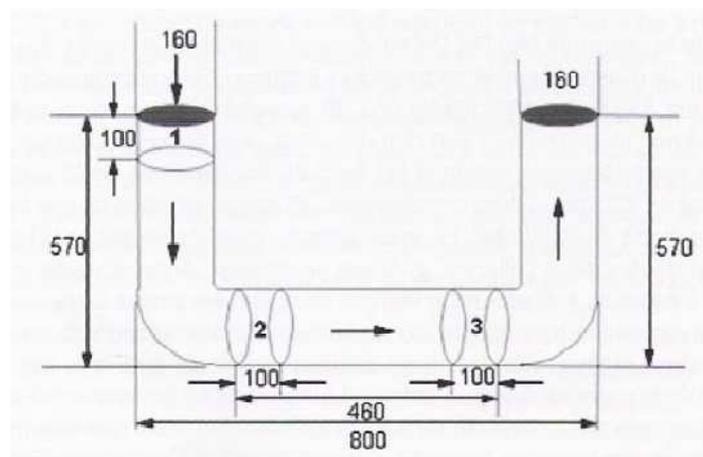


Figura 3.20. Dimensiones del equipo del ensayo de tubo-U (ACHE) [13]

DIFERENTES ENSAYOS POR AUTORES:

ENSAYOS	Escurrimiento		Caja L			CAJA U	EMBUDO V
	T500(s)	Dmax(mm)	T20(s)	T40(s)	H2/H1	h(mm)	T(s)
Hayakawa 1993	4-10	600-700	-	-	-	≥300	-
Ozawa 1994	-	-	-	-	-	-	6-10
Petersson1996	1-4	670-720	-	-	≥0,80	-	-
JapanSociety Civil Ing. 1998	-	-	-	-	-	≥300	-
Billberg 1999	3-8	600-700	-	-	≥0,80	-	-
Okamura 2000	-	-	-	-	-	≥300	-
Sonebi 2000	1-3	650-690	-	-	≥0,80	-	-
Bouzoubaâ 2000	-	-	-	-	-	-	3-7
BETTOR 2000	-	600-700	-	-	-	-	8-12
Alcantara 2001	-	600-750	-	-	≥0,80	-	-
Sika S/A 2001	3-6	650-750	-	3-6	≥0,80	-	-
Gomes 2002	3-7	600-750	1,5	2,5	≥0,80	-	≤15
Gettu 2002	3-7	600-750	1± 0,5	2± 0,5	≥0,80	-	7-13
EFNARC 2002	2-5	650-800	-	-	≥0,80	≥300	≤ 12
EuropeanGuidelines 2005	≤2 ≥2	550<Df<650 660<Df<750 760<Df<850	-	-	≥0,75	-	≤8 9≤Tv≤25
EHE 2006	≤8 2≤T≤8 2,5≤T≤8	550<Df1<650 650<Df2<750 750<Df3<850	-	-	0,75 - 1,0	-	4≤Tv≤6 6≤Tv≤10 10≤Tv≤20
ACI 2007	2-5	450-760	-	-	0,80 - 1,0	-	-

Tabla 3.8: Parámetros de los ensayos por autores (V. Johnson) [12]

3.3.2_ ENSAYOS. CARACTERIZACIÓN DE LOS ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO

Los hormigones autocompactantes se pueden considerar de una forma similar a los hormigones convencionales pudiéndose aplicar las mismas formulaciones del hormigón convencional, pero teniendo en cuenta que son aproximativas.

Debido a las diferencias en dosificación entre el hormigón autocompactante y el convencional, en los últimos años se han realizado diversas investigaciones sobre las propiedades en estado endurecido del hormigón autocompactante.

Hay que destacar que cuando se compara un hormigón autocompactante con uno convencional en estado endurecido, se hace con hormigones de resistencias similares.

3.3.2.1_ Resistencia a compresión

La resistencia a compresión es una de las propiedades más importantes del hormigón donde la relación agua/cemento juega un papel decisivo, pero en el autocompactante influyen otros factores como son: una microestructura más densa, el tamaño máximo del árido, la ausencia de vibración, el empleo de adiciones activas o una baja relación agua/finos entre otros factores (Skarendahl, et al., 2000; Klug et al., 2003; Georgiadis et al., 2007; Agranati, 2008) que hacen que, de forma general, se pueda decir que la resistencia a compresión es mayor en un hormigón autocompactante que en uno convencional, ambos con igual relación agua/cemento.

La vibración puede ser también un factor importante porque si un hormigón convencional tiene una mala vibración se producen coqueas en su interior y, por lo tanto, no se desarrollan adecuadamente sus propiedades. En cambio, en el hormigón autocompactante este problema desaparece.

Otro de los posibles factores que pueden influir notablemente en el desarrollo de resistencias son los superplastificantes de tipo policarboxilatos. Según la ACI (2007), este tipo de aditivos hacen que se mejore la resistencia a compresión sobre la que se tendría si se usasen otro tipo de aditivos en el hormigón autocompactante. Además, también recomienda determinar la resistencia a compresión a 91 días debido a que se mejoran las propiedades del hormigón autocompactante por el mayor contenido de material cementante.

En la bibliografía existente no existe consenso sobre cómo se desarrolla la resistencia a compresión en el hormigón autocompactante respecto al convencional como se puede ver a continuación (Agranati, 2008):

- Song et al. (2001) dicen que el desarrollo de la resistencia a compresión es más lento en el hormigón autocompactante que en el convencional, debido al uso de adiciones activas.
- Persson (2005) indica que la resistencia a compresión, a edades tempranas, es mayor en el hormigón autocompactante.
- Parra et al. (2007) determinan que la resistencia es equivalente en ambos hormigones si se emplea el mismo tipo de cemento y la misma relación agua/cemento.

3.3.2.2_ Resistencia a tracción indirecta

La resistencia a tracción indirecta está muy relacionada con la resistencia a compresión, de tal manera que un aumento de la resistencia a compresión conlleva un aumento de la resistencia a tracción indirecta.

En el hormigón convencional uno de los factores que influyen en la resistencia a tracción indirecta es la adherencia entre el cemento y los áridos dentro de la zona de transición (Mehta, 1993), pero en el autocompactante influyen otros factores como la microestructura, el proceso de microfisuración o las características de la zona de transición (Agranati, 2008).

Según autores:

- Klug et al. (2003) indican que la resistencia a tracción indirecta es ligeramente mayor en el hormigón autocompactante.
- Parra et al. (2007) determinan que la resistencia a tracción es un 18% menor en el hormigón autocompactante (adición filler calizo) respecto al convencional, siendo ambos hormigones de equivalente resistencia a compresión.
- Dinakar (2007) muestra que la resistencia a tracción es entre un 7-11% mayor en el hormigón autocompactante (alto contenido de ceniza volante como adición) respecto al convencional.

3.3.2.3_ Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es un parámetro del hormigón que está relacionado con las deformaciones y depende básicamente de tres factores en el hormigón convencional: árido, pasta y la zona de transición entre la pasta y el árido. Dichos factores también son válidos para el caso del hormigón autocompactante.

El primer factor es el árido. Se puede considerar que la naturaleza del árido en ambos hormigones es igual pero varía el volumen del mismo, ya que en el hormigón autocompactante se reduce el volumen del árido grueso por lo que conlleva una disminución del módulo de elasticidad.

El segundo factor es la pasta. El hormigón autocompactante tiene un alto contenido de adiciones y un volumen elevado de pasta y esto crea comportamientos inversos debido a que el primero aumenta el módulo de elasticidad, pero el gran volumen de pasta disminuye el módulo.

Por último, la zona de transición entre la pasta y el árido es la zona más débil del hormigón donde puede aparecer microfisuración. Es la zona más importante para el desarrollo de las propiedades mecánicas del hormigón.

En general, se relaciona el módulo de elasticidad con la resistencia a compresión en la mayoría de las formulaciones existentes para el hormigón convencional y que, en principio, son aplicables al hormigón autocompactante. Pero estas fórmulas habituales sobrevaloran el valor del módulo de elasticidad para el caso del autocompactante entre un 7 y un 15% (AFGC, 2002; Grupo de Proyecto Europeo (GPE), 2005; ACHE, 2008), no siendo importantes estas diferencias.

Según autores:

- Vieira et al. (2003) llevaron a cabo un estudio con hormigones cuya resistencia era aproximadamente 45 MPa y como adición emplearon ceniza volante y filler calizo y, determinaron que el módulo de elasticidad, a edades cortas, es mayor en el hormigón convencional que en el autocompactante,

pero a largo plazo ocurre lo contrario. A edades cortas influye el volumen de áridos porque el volumen de pasta es bajo, pero a largo plazo hay una mayor hidratación y, por lo tanto, un elevado volumen de pasta.

- Chopin et al. (2003) estudiaron cinco mezclas de hormigón autocompactante y una de hormigón convencional y, confirmaron que el módulo de elasticidad disminuye con el aumento del volumen de pasta, pero las diferencias no fueron importantes.
- Pons et al. (2003) realizaron una investigación con ocho tipos de hormigones autocompactantes y cuatro tipos de hormigones convencionales utilizando como adición caliza y humo de sílice. No obtuvieron diferencias notables entre el módulo de elasticidad de ambos hormigones.
- Georgiadis et al. (2007) estudiaron la influencia de diversos tipos de adiciones sobre el módulo de elasticidad y concluyeron que era menor en un hormigón autocompactante respecto al convencional y, que esa reducción dependía de la naturaleza de las adiciones.

3.3.2.4_ Retracción

La retracción se produce por la pérdida de agua y se puede dividir en dos tipos.

El primer tipo es la retracción endógena que se da en las primeras edades del hormigón debido a la pérdida de agua que se ha consumido en la fase de hidratación del cemento.

El segundo tipo es la retracción por secado que se produce a largo plazo debido a la pérdida de agua por evaporación.

Debido a que el hormigón autocompactante tiene un mayor volumen de pasta respecto al hormigón convencional, la retracción endógena es ligeramente superior en el primero. En cambio, la retracción por secado es inferior en el hormigón autocompactante respecto al convencional.

En los últimos años se han desarrollado numerosos estudios sobre la retracción en el hormigón autocompactante y sobre la forma en que afecta la dosificación de la mezcla a esta propiedad, teniendo en cuenta desde la naturaleza y tipo de la adición, cemento y áridos hasta las relaciones entre agua/cemento y agua/finos.

En el caso del hormigón autocompactante, la relación de agua/finos y el contenido de árido influyen de forma opuesta sobre la retracción. Al reducir el contenido de árido, la retracción debe de aumentar y, por el otro lado, la elevada relación agua/finos de la mezcla contribuye a una disminución de la misma (Agranati, 2008).

Los modelos de cálculo de retracción existentes se pueden aplicar en los hormigones autocompactantes debido a que no se aprecian diferencias destacables en el cálculo de la retracción entre los hormigones

autocompactantes y los convencionales como se reflejan en diversas investigaciones, pero hay que tener en cuenta que sí que existen diferencias de precisión entre los diferentes modelos de cálculo.

3.3.3_ EXIGENCIAS DE AUTOCOMPACTABILIDAD

En el hormigón autocompactante, se tienen que cumplir simultáneamente los tres requisitos principales de autocompactabilidad que se evalúan a través de los ensayos descritos anteriormente.

En España, las normas UNE solamente recogen cuatro de los ensayos como ya se ha mencionado y mediante esos ensayos las características de autocompactabilidad se evalúan del siguiente modo:

- Capacidad de relleno: ensayos de escurrimiento y embudo en V.
- Resistencia de bloqueo: ensayo del embudo en V, caja en L y escurrimiento con anillo japonés.
- Resistencia a la segregación: la Instrucción EHE-08 estipula que la resistencia a segregación se mida indirectamente a través de los ensayos de escurrimiento con y sin anillo japonés, y si se quiere de una manera directa se podría realizar con el ensayo de columna o con el tubo-U, aunque son ensayos que no están recogidos en las normas UNE.

En el Anejo 17 de la Instrucción EHE-08, en su Artículo 31.5º, se especifican los rangos admisibles de los parámetros de los ensayos normalizados y que se recogen en la Tabla 3.9. Es importante destacar que se tienen que cumplir simultáneamente para así obtener los requisitos de autocompactabilidad.

Ensayos	Parámetro medido	Rango admisible
Escurrecimiento	T 50	$T50 \geq 8 \text{ seg}$
	df	$550 \text{ mm} \leq df \leq 850 \text{ mm}$
Embudo en V	Tv	$4 \text{ s} \leq TV \leq 20 \text{ s}$
Caja en L	CbL	$0,75 \leq CbL \leq 1,00$
Escurrecimiento con anillo Japonés	djF	$\geq df - 50 \text{ mm}$

Tabla 3.9. Rango admisible de los ensayos normalizados (EHE-08) [16]

En la Tabla 3.10 se recogen los rangos recomendados de los ensayos que no están normalizados en España.

En la Tabla 3.11 se recogen los rangos recomendados para los diferentes ensayos de estado fresco por la EFNARC.

Ensayo	Parámetro medido	Rango admisible
Caja en U	h (altura de relleno)	≥ 300 mm
	Δh (diferencia de altura)	≤ 30 mm
Orimet	T (tiempo de flujo)	$T \leq 6$ s
Recipiente (fill box)	F (coeficiente de relleno)	$F \geq 90\%$
Estabilidad con el tamiz	porcentaje de lechada tamizada	$\leq 30\%$
Tubo en U)	RS (relación de segregación)	$\geq 0,90$
Columna	% de segregación	$< 10\%$

Tabla 3.10 Rango admisible de los ensayos no normalizados (ACHE) [13]

Ensayos	Parámetro medido	Rango admisible	
		Mínimo	Máximo
Escurrecimiento	mm	650	800
T50	segundos	2	5
Anillo japonés	mm	0	10
Embudo en V	segundos	6	12
Embudo en V en 5 min	segundos	0	3
Caja en L	H2/H1	0,8	1
Caja U	(H2-H1) mm	0	30
Caja de relleno	%	90	100
Ensayo de estabilidad	%	0	15
Orimet	segundos	0	5

Tabla 3.11 Parámetros de los ensayos en estado fresco (EFNARC) [14]

- Criterios de clasificación y aceptación de HAC

Para el control de recepción y la definición de los criterios de aceptación o rechazo de los HAC se suele proponer uno o varios de los ensayos comentados anteriormente.

En Japón ensayos como el Esgurrimiento, el embudo en V y la caja en U son normalmente los más utilizados a la hora de dar el visto bueno al hormigón en la obra.

En Suecia el método más utilizado para la aceptación del hormigón en estado fresco después del Esgurrimiento es la caja L.

En los dos casos los ensayos pueden presentar resultados fiables, e informar sobre las características del hormigón, pero su utilización es poco práctica.

No existen valores universalmente aceptados y recomendados para estos ensayos. En algunos casos hay divergencias de opiniones entre los autores, aunque en otros casos los valores recomendados varían muy poco. La altura final de la Caja U, se suele estipular superior a 300mm, y el cociente entre las alturas finales en la Caja L se propone superior al 0,75.

La "European Guidelines for SCC (2005)" propuso la clasificación de los HAC en función de los resultados de los ensayos de caracterización en estado fresco. El anejo de la EHE también ha adoptado este criterio.

El ACI (2007) presenta los valores mas bajos para el ensayo de Esgurrimiento y da especial importancia al análisis visual del hormigón.

En cualquier caso las diferencias entre las propuestas probablemente se deban a los diferentes materiales que se utilizan para la fabricación del HAC o al tipo de aplicación prevista, ya sea un hormigón muy fluido y muy rápido o simplemente autocompactante, con menor riesgo de segregación.

3.4_ PUESTA EN OBRA. EHE.



Imagen 3.25 Puesta en obra. (HAC. Criterios para su utilización. M. Burón, J. Fernández y L. Garrido) [15]



Imagen 3.26 Puesta en obra. (HAC. Criterios para su utilización. M. Burón, J. Fernández y L. Garrido) [15]

Las imágenes 3.25 y 3.26, nos muestran la puesta en obra del hormigón autocompactante mediante bombeo.

Es recomendable que el hormigón autocompactante sea bombeado frente al empleo de cubilotes, ya que debido a la caída desde demasiada altura, se puede producir disgregación.

El hormigón autocompactante permite ser colocado en obra sin precisar medios de compactación, mejorando significativamente la calidad, la durabilidad y la vida útil de las estructuras.

Durante la colocación hay que comprobar el hormigón autocompactante para asegurar que no se observan indicios de segregación.

Hay que prestar especial atención en la fijación y sellado del encofrado ya que debido a la presión hidrostática ejercida por el hormigón autocompactante el encofrado puede tener fugas de lechada en las juntas del encofrado e incluso se puede deformar.

Cuando el hormigón autocompactante se coloque mediante bombeo se tendrá en cuenta el incremento de presión correspondiente.

Cuando se utiliza este hormigón, se recomienda una distancia máxima de colocación de 10m desde el punto en el que se vierte el hormigón.

El bombeo es el método más usado para la colocación de hormigón autocompactante.

El mejor acabado de las superficies vistas y la menor oclusión de aire se obtienen cuando el hormigón se deposita lo más cerca posible del fondo del encofrado, por lo que, cuando se bombea, es recomendable iniciar el hormigonado situando la boca de salida de éste tan cerca como sea posible del mismo.

Debido a la condición de autocompactabilidad no es necesario, en general, someter al hormigón a un proceso de compactación.

Deberán extremarse las medidas para disminuir el riesgo de desecación en las diferentes etapas de fabricación, transporte, puesta en obra y curado, en las primeras horas.

Es conveniente realizar un buen curado que evite la desecación superficial y los efectos de la retracción plástica a la que el hormigón autocompactante puede resultar más vulnerable que el hormigón convencional.

La siguiente imagen (imag. 3.27), nos muestra un encofrado preparado para colocar el hormigón autocompactante mediante bombeo y de abajo hacía arriba.



Imagen 3.27 Encofrado y colocación de hormigón autocompactante mediante bombeo tradicional. (HAC. Criterios para su utilización) [15]

Además se puede observar que la boca de salida del hormigón no se coloca en la parte superior de todo el paramento a hormigonar, sino que se va hormigonando por tramos de manera ascendente debido a la elevada altura total del paramento (recomendable máximo 3m).

3.5_ ACABADOS HAC:



a) Imagen 3.28 a) y b) Acabado HAC.Iglesia de Saint Pierre de Firminy. (Piel de Hormigón) [4]



a) Imagen 3.29 a) y b). TEA, Tenerife Espacio de las Artes (Piel de Hormigón) [4]



a)



b)

Imagen 3.30 a) y b). Centro de las Artes de La Coruña. (Piel de Hormigón) [4]



a)



b)

Imagen 3.31 a) y b). Centro Nacional de Arte Dramático de Montreuil. (Piel de Hormigón) [4]

4_ PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1_ PLANTEAMIENTO DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental consiste en la introducción de fibras y promotor de adherencia en el micro hormigón autocompactante (MHAC) y analizar el comportamiento de este nuevo material, ensayándolo para su posterior comparación y poder así sacar una conclusión del comportamiento de éste tras la introducción de fibras.

- Inicialmente, el programa se planteará de la siguiente manera:

Para empezar, se realizarán con unas dosificaciones específicas y diferentes, tres MHAC a los que llamaremos Patrón 1, Patrón 2 y Patrón 3.

Seguidamente a cada uno de nuestros patrones, se les introducirá una cantidad de fibras (M50 o M60), aditivo plastificante y promotor de adherencia determinados.

Pasados éstos, se podrán realizar comparaciones de la resistencia mecánica antes y después de la introducción de las fibras y promotor de adherencia.

Los ensayos de resistencia mecánica, compresión y flexo-tracción, se realizarán a los 7 y 28 días tras su fabricación.

- Explicación más detallada del programa experimental inicial:

Nuestro estudio parte de tres patrones diferentes: Patrón 1 (300 kg/m³ de cemento), Patrón 2 (350 kg/m³ cemento) y Patrón 3 (400 kg/m³ de cemento). Partiendo de éstos, procedemos a realizar una tanda de amasadas con cada uno de ellos, calculando la humedad de nuestro árido para no tener posteriores fallos ni resultados no deseados en nuestras siguientes dosificaciones.

Una vez realizadas estas amasadas "Patrón", procedemos a las siguientes añadiendo distintos tipos de fibras, porcentaje de promotor de adherencia y aditivo plastificante, llegando a mezclar incluso todos los componentes citados con sus correspondientes dosificaciones, hasta un total de 21 amasadas.

Por lo tanto, como se ha mencionado anteriormente, el esquema de actuaciones en el laboratorio fue el siguiente:

- Amasada 1: Patrón 1.
- Amasada 2: Patrón 2.
- Amasada 3: Patrón 3.
- Amasada 4: Patrón 1 + 4kg de fibras M50 + aditivo plastificante 1.5%
- Amasada 5: Patrón 2 + 4Kg de fibras M50 + aditivo plastificante 1.5%
- Amasada 6: Patrón 3 + 4kg de fibras M50 + aditivo plastificante 1.5%
- Amasada 7: Patrón 1 + 4kg de fibras M60 + aditivo plastificante 1.5%
- Amasada 8: Patrón 2 + 4kg de fibras M60 + aditivo plastificante 1.5%

- Amasada 9: Patrón 3 + 4kg de fibras M60 + aditivo plastificante 1.5%
- Amasada 10: Patrón 1 + 4kg de fibras M50 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 1%
- Amasada 11: Patrón 2 + 4kg de fibras M50 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 1%
- Amasada 12: Patrón 3 + 4kg de fibras M50 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 1%
- Amasada 13: Patrón 1 + 4kg de fibras M50 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 2%
- Amasada 14: Patrón 2 + 4kg de fibras M50 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 2%
- Amasada 15: Patrón 3 + 4kg de fibras M50 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 2%
- Amasada 16: Patrón 1 + 4kg de fibras M60 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 1%
- Amasada 17: Patrón 2 + 4kg de fibras M60 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 1%
- Amasada 18: Patrón 3 + 4kg de fibras M60 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 1%
- Amasada 19: Patrón 1 + 4kg de fibras M60 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 2%
- Amasada 20: Patrón 2 + 4kg de fibras M60 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 2%
- Amasada 21: Patrón 3 + 4kg de fibras M60 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 2%

A continuación se detallan cada una de las amasadas con sus diferentes dosificaciones de cada uno de los materiales que componen el micro hormigón estudiado, al igual que la "matrícula" por la que las designamos.

AMASADA	1	2	3	PATRÓN* arres_ PATRON
H2O	244,74	244,74	244,74	116
Arena 0/2	1200	1150	1100	1200
Arena Sika	700	700	700	700
CEM	300	350	400	300
Promotor adherencia 0%	0	0	0	0
sin fibras POLIMERICAS	0	0	0	0
Aditivo Plastifi.	4,95	5,25	6	4,5
A/C	0,82	0,69	0,61	0,39
SUMATORIO	2449,69	2449,99	2450,74	2320,88

AMASADA	4	5	6	PATRON+M50/4
H2O	244,74	244,74	244,74	
Arena 0/2	1200	1200	1200	
Arena Sika	700	700	700	
CEM	300	350	400	
Promotor adherencia 0%	0	0	0	
fibras POLIMERICAS M50	4	4	4	

Aditivo Plastifi.	4,5	5,25	6
A/C	0,82	0,69	0,61
SUMATORIO	2454,06	2504,69	2555,35

AMASADA	7	8	9	PATRON+M60/4
H2O	244,74	244,74	244,74	
Arena 0/2	1200	1200	1200	
Arena Sika	700	700	700	
CEM	300	350	400	
Promotor adherencia 0%	0	0	0	
fibras POLIMERICAS M60	4	4	4	
Aditivo Plastifi.	4,5	5,25	6	
A/C	0,82	0,69	0,61	
SUMATORIO	2454,05	2504,69	2555,35	

AMASADA	10	11	12	PATRON+M50/4+1%ADH
H2O	244,74	244,74	244,74	
Arena 0/2	1200	1200	1200	
Arena Sika	700	700	700	
CEM	300	350	400	
Promotor adherencia 1%	3	3,5	4	
fibras POLIMERICAS M50	4	4	4	
Aditivo Plastifi.	4,5	5,25	6	
A/C	0,82	0,69	0,61	
SUMATORIO	2457,05	2508,19	2559,35	

AMASADA	13	14	15	PATRON+M50/4+2%ADH
H2O	244,74	244,74	244,74	
Arena 0/2	1200	1200	1200	
Arena Sika	700	700	700	
CEM	300	350	400	
Promotor adherencia 2%	6	7	8	
fibras POLIMERICAS M50	4	4	4	
Aditivo Plastifi.	4,5	5,25	6	
A/C	0,82	0,69	0,61	
SUMATORIO	2460,05	2511,69	2563,35	

AMASADA	16	17	18	PATRON+M60/4+1%ADH
H2O	244,74	244,74	244,74	
Arena 0/2	1200	1200	1200	
Arena Sika	700	700	700	
CEM	300	350	400	
Promotor adherencia 1%	3	3,5	4	
fibras POLIMERICAS M60	4	4	4	
Aditivo Plastifi.	4,5	5,25	6	
A/C	0,82	0,69	0,61	

SUMATORIO	2457,05	2508,19	2559,35
------------------	----------------	----------------	----------------

AMASADA	19	20	21	PATRON+M60/4+2%ADH
H2O	244,74	244,74	244,74	
Arena 0/2	1200	1200	1200	
Arena Sika	700	700	700	
CEM	300	350	400	
Promotor adherencia 2%	6	7	8	
fibras POLIMERICAS M60	4	4	4	
Aditivo Plastifi.	4,5	5,25	6	
A/C	0,82	0,69	0,61	
SUMATORIO	2460,05	2511,69	2563,35	

AMASADAS 08-may-12

AMASADAS 10-may-12

AMASADAS 17-may-12

AMASADAS 24-may-12

A las tres primeras amasadas (amasadas "patrón"), no les fueron añadidas ni fibras ni promotor de adherencia.

Obtenidos los resultados de los estudios en estado endurecido de éstas, se podrá observar cuál es la resistencia del micro hormigón con las diferentes cantidades de cemento.

Al resto de las amasadas sí les fueron añadidos los productos mencionados anteriormente; siempre variando entre los dos tipos de fibras utilizados en este estudio (M50 y M60), pero manteniendo la misma cantidad de ellas (4 gramos), y el porcentaje de promotor de adherencia (el cual oscilaba entre 1% y 2%). Con estos dos parámetros, podremos analizar con qué tipo de fibra el micro hormigón tiene mejor adherencia y la eficacia del promotor utilizado (Promotor de adherencia, 2ª generación, año 2011/2012).

5_ METODOLOGÍA

5.1_ MATERIALES EMPLEADOS PARA LA FABRICACIÓN DE MHAC CON FIBRAS EN ESTE ESTUDIO.

Como se pudo observar en el estado del arte (apartado 3), el micro hormigón autocompactante, está compuesto básicamente de los mismos materiales utilizados para fabricar un hormigón autocompactante tradicional.

A continuación se presentaran los materiales utilizados a lo largo de todo este estudio, y sus características.

5.1.1_ ÁRIDOS



Imagen 5.1 Arena 0.2



Imagen 5.2 Árido de sílice monogranular

Las limitaciones de los áridos para la fabricación de los micro hormigones autocompactantes están en relación con su tamaño máximo.

El tamaño máximo de árido para el micro hormigón autocompactante, se limita a 25mm, siendo recomendable utilizar tamaños máximos comprendidos entre 12mm y 20mm, en función de la disposición de armaduras, y que el árido fino tenga un módulo de finura próximo a 3.

Asimismo, es muy frecuente encontrar referencias donde se ha utilizado tamaño máximo igual o incluso inferior a 12mm.

El tamaño máximo de árido utilizado en nuestro proyecto, ha sido el de 2mm.

En este estudio, los áridos empleados son los que se muestran en las imágenes 4.1 y 4.2, dónde la 4.1 representaría a la arena 0.2, y la 4.2 al árido de sílice monogranular (arena sika).

Sobre las arenas hay que tener en cuenta que, las arenas rodadas tienen una superficie que favorece la trabajabilidad del hormigón (ACI 237R-07), mientras que las arenas machacadas poseen formas que aumentan considerablemente el rozamiento interno de la mezcla, por eso necesitan más agua para lograr los mismos resultados que los obtenidos con las arenas de río. La grava empleada en este estudio no es de canto rodado, pero aún así es una grava que aporta muy buenos resultados debido a su alta calidad y selección.

Otro factor que se debe considerar a la hora de elegir la arena es el contenido en finos. Arenas con muchos finos proporcionan una reducción en los niveles de adiciones necesarias y en algunos casos se pueden llegar a eliminar completamente. Debe garantizarse que los finos aportados por las arenas no sean perjudiciales para el hormigonado.

Según el artículo 28.1 de la EHE 08, para la fabricación de hormigones de alta resistencia, se utilizarán áridos con propiedades mecánicas idóneas, ya sean rodados o procedentes de rocas machacadas de altas prestaciones mecánicas. Los áridos más recomendables desde el punto de vista mineralógico son los basaltos, cuarcitas, riolitas, sienitas, ofitas y calizas de buena calidad, con densidades superiores a 2600 kg/m³.

Si se mezclan áridos de densidad muy diferente, se deberá prestar atención para que no se produzca segregación.

5.1.2_ AGUA

El agua es el segundo componente del hormigón, empleándose en el amasado del mismo y en su curado. Dependiendo de que se emplee con uno u otro fin se le exigirán unas u otras características.

El agua que se añade en la hormigonera, junto con los demás componentes del hormigón, tiene las siguientes misiones: una primera, de hidratación de los componentes activos del cemento; una segunda, de actuar como lubricante haciendo posible que la masa fresca sea trabajable y, una tercera, de creadora de espacio en la pasta para los productos resultantes de la hidratación del cemento.

Para que un agua sea apta para el amasado de un hormigón debe estar limpia y encontrarse libre de impurezas por encima de determinados límites a fin de que no se produzcan alteraciones en la hidratación del cemento, retrasos en su fraguado y endurecimiento, reducciones en sus resistencias, ni peligros en su durabilidad. El que un agua tenga aspecto limpio no ofrece seguridad suficiente sobre su pureza.

Se consideran como aguas dañinas al hormigón las que contienen azúcares, tanino, materia orgánica, aceites, sulfatos, ácido húmico, sales alcalinas, gas carbónico, así como productos procedentes de residuos industriales.

5.1.3_CEMENTO

Se utilizarán cementos que cumplan con la vigente Instrucción (EHE) para la Recepción de Cementos.

Para la fabricación de los MHAC, se pueden utilizar todos los tipos cementos existentes en el mercado, la elección entre uno u otro debe estar asociada al tipo de aplicación del hormigón, de la calidad exigida al hormigón, de la disponibilidad en el mercado y de su finura.

La cantidad adoptada puede variar de acuerdo con la calidad del hormigón que se desea obtener, con el contenido de adiciones y con el tamaño máximo del árido utilizado en la mezcla.

Las cantidades de cemento utilizadas, no deben superar $500\text{Kg} / \text{m}^3$ debido a los riesgos de aumento en la retracción. Cuantías inferiores a los $350\text{Kg} / \text{m}^3$ solo resultan adecuadas si se incluye otro tipo de fino, como cenizas volantes, puzolanas, etc.

En general el consumo suele estar entre 350 y $450\text{Kg}/\text{m}^3$, por debajo de los $300\text{kg}/\text{m}^3$ ya es complicado. Pero se han obtenido hormigones autocompactables con $260 \text{ Kg}/\text{m}^3$ de cemento (cemento Portland con escorias tipo CEM II), para el puente Akashi-Kaikyo en Japón; obteniendo una resistencia a compresión los 28 días de $24\text{N}/\text{mm}^2$, cuando el proyecto demandaba $20\text{N}/\text{mm}^2$. El límite para conseguir un HAC, ha sido con $200\text{Kg}/\text{m}^3$ de cemento (Gomes, et al., 2001).

Se recomienda limitar el contenido en C3A del cemento o emplear cementos de bajo calor de hidratación para minimizar los problemas de retracción que una masa con tanta cantidad de finos pueda generar.

El cemento que se emplea en este estudio, como se puede observar en la imagen 5.3 es el CEM I 42,5 R/SR.



Imagen 5.3 Cemento empleado en este estudio

5.1.4_ ADITIVOS

El aditivo que se empleó fue el superplastificante de altas prestaciones para obtener, con la ayuda de este, una mayor fluidez.

En la siguiente imagen (imag. 4.4), se muestra el aditivo empleado.



Imagen 5.4 Aditivo empleado en este estudio

Ficha tecnica del adtivo empleado:

SikaPlast® 380

Powered by ViscoCrete®

Superplastificante de alto rango para hormigones.

Descripción del Producto

Aditivo superplastificante de alto rendimiento para la fabricación de todo tipo de hormigones realizados en plantas de hormigón preparado; especialmente aquellos con consistencia fluida mejorando su bombeabilidad.

No ejerce ninguna acción corrosiva sobre las armaduras debido a que es un producto exento de cloruros.

Usos

- Aditivo muy adecuado para mezclas "robustas", donde existen frecuentes variaciones en las materias primas y en la humedad de estas
- Realización de todo tipo de hormigones, mejorando considerablemente la consistencia y facilidad de colocación de los mismos

- El hormigón puede transportarse a largas distancias sin pérdida de trabajabilidad
- Apto para la confección de hormigón autocompactante
- La segregación y exudación de agua en el hormigón se ven muy disminuidas

Características/Ventajas

- Facilita notablemente la colocación o puesta en obra de los hormigones, mejorando la adherencia a las armaduras.
- Aumento de la densidad del hormigón mejorando sus resistencias mecánicas, durabilidad e impermeabilidad .
- Incrementa la estabilidad y la cohesión de las mezclas.
- Mejora notablemente el acabado superficial de los hormigones.
- Por su alto poder de reducción de agua, optimiza al máximo las mezclas, economizando el precio del m3 de hormigón
- Ventajas estéticas. Aditivo válido para hormigón blanco.
- Reducción o eliminación total del proceso de vibrado en el hormigón

Certificados/Normas

Cumple con la Norma UNE -EN 934-2. Grupo 11: Reductor de agua/ Retardante/ Superplastificante

Datos del Producto

Forma

Apariencia/color: Líquido verde

Presentación: Contenedores de 1 m3. Bajo pedido puede suministrarse a granel.

Almacenamiento

Condiciones de almacenamiento/ Conservación: 12 meses desde su fecha de fabricación, en sus envases de origen bien cerrados y no deteriorados . En lugar seco y fresco protegiéndolos de las heladas y el frío excesivo, a una temperatura entre +5 °C y +30 °C.

Proteger de la exposición a luz directa del sol.

Datos Técnicos

Composición química: Polímeros modificados en solución acuosa

Densidad (20°C): Aprox. 1,1 kg/l.

Contenido de sólidos: Aprox. 25%

Valor del pH: Aprox. 5

Información del Sistema

Detalles de Aplicación

Consumo/Dosificación: Según las propiedades deseadas, SikaPlastR- 380 se dosificará entre el 0.5% y el 1.8% del peso del cemento

Instrucciones de Aplicación: Añadir en el agua de amasado o en la mezcladora al mismo tiempo que el agua.

Se recomienda amasar el hormigón para la perfecta homogenización y actuación del aditivo.

SikaPlastR- 380 puede utilizarse en combinación con otros aditivos Sika.

Se recomienda realizar ensayos previos para determinar las dosificaciones adecuadas.

Notas de aplicación/Límites: Con heladas intensas y prolongadas, SikaPlast R-380 puede helarse, pero unavez deshelado lentamente y agitado cuidadosamente y verificando que no se haya desestabilizado, puede emplearse sin problemas.

Debido a la acción de los rayos del sol, el producto puede perder su coloración, sin que esto afecte a las propiedades del producto.

Para cualquier aclaración rogamos consulten con nuestro Departamento Técnico.

Nota: Todos los datos técnicos de esta Hoja de Datos de Producto están basados en ensayos de laboratorio. Los datos reales pueden variar debido a circunstancias que escapan de nuestro control.

Instrucciones de Seguridad e Higiene

Para cualquier información referida a cuestiones de seguridad en el uso, manejo, almacenamiento y eliminación de residuos de productos químicos, los usuarios deben consultar la versión mas reciente de la Hoja de Seguridad del producto, que contiene datos físicos, ecológicos, toxicológicos y demás cuestiones relacionadas con la seguridad.

5.1.5_ FINOS



Imagen 5.5 Finos

Los finos tienen como principal función dar cohesión y evitar la segregación de la mezcla. Su utilización es necesaria en la mayoría de las dosificaciones, pero en algunos casos pueden ser sustituidas, bien por aditivos cohesionantes o bien por los propios finos aportados por los áridos.

Los materiales más utilizados para incrementar el volumen de finos en los HAC suelen ser las cenizas volantes y humo de sílice, o inertes como el filler calizo, silicio o la marmolina en función de las posibilidades de suministro de la zona y del coste.

La EHE, establece límites al contenido en finos menores a 0,063mm, de los áridos, en función del origen del árido y del ambiente en que trabajará el hormigón. También se recomienda que la masa total de materiales inferiores a 0.063mm, procedente de los áridos y de la componente caliza del cemento (en su caso), no supere los 250Kg/m³ de hormigón autocompactante.

5.1.6_ FIBRAS:

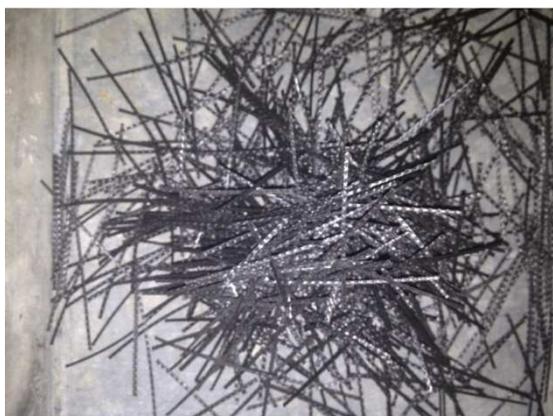


Imagen 5.6 Poliméricas Monofilamento

De las descritas en el apartado 3 (Estado del arte), las fibras empleadas en este estudio serán las poliméricas monofilamento M50 y M60 (imagen 4.6).

Para homogeneizar el producto, debido a la diferencia de longitud de los dos tipos de fibra, procedimos a cortarlas al mismo tamaño, quedándose éstas a 32mm aproximadamente; a la vez que reducíamos su tamaño original, siendo excesivo para el formato de nuestro MHAC.

Fibras poliméricas

Las fibras plásticas están formadas por un material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster) extrusionado y posteriormente cortado. Estas pueden ser adicionadas homogéneamente al hormigón, mortero o pasta. Se rigen por la

norma UNE 83500-2 y, según el proceso de fabricación se clasifican en: monofilamentos extruidos (Imagen 4.8), láminas fibriladas (Imagen 4.9).

Sus dimensiones pueden ser variables al igual que su diámetro y su formato:

- Micro-fibras: < 0,30mm diámetro
- Macro-fibras: > 0,30mm diámetro

Las macro-fibras pueden colaborar estructuralmente, siendo su longitud variable (desde 20mm a 60mm), que debe guardar relación con el tamaño máximo del árido (relación de longitud 3:1 fibra: TM).

Las micro-fibras se emplean para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, especialmente en pavimentos y soleras, pero no pueden asumir ninguna función estructural. También se utilizan para mejorar el comportamiento frente al fuego, siendo conveniente en este caso que el número de fibras por kg sea muy elevado.

Además de por sus características físico-químicas, las micro-fibras se caracterizan por su frecuencia de fibra, que indica el número de fibras presentes en 1kg, y que depende de la longitud de fibra y muy especialmente de su diámetro.

- Fibras de Polipropileno:

- Cortada y lisa (multifilamento o filamento individual)
- En malla (multifilamento fibrilado o rafia)

- Preparada superficialmente para poder formar una superficie homogénea.

-Ventajas:

- Reduce retracción plástica (hasta 7 veces).
- Disminuye permeabilidad y absorción de agua.
- Aumenta resistencia de agrietamiento por impacto.
- Distribución homogénea de fibras.
- Mejora la trabajabilidad del hormigón y elimina el resudado de la lechada.
- Permite una menor adición del agua (un exceso produciría segregaciones)
- Elimina las manipulaciones del mallazo.
- Resistente a los álcalis.
- Temperatura de fusión alta : 165° C
- Coste bajo.

- Inconvenientes:

- Escasa resistencia al fuego.
- Sensibilidad a la luz solar y al oxígeno.
- Módulo de elasticidad bajo.
- Adherencia al mortero reducida.

La matriz protege del fuego y del ambiente.
Módulo, adherencia: Fibras especiales.

- Características (Fibras que se comercializan actualmente en España):

- Diámetro: 10 a 32 μ m.
- Longitud: 6 a 20mm.
- Densidad: 0.91g/cm³.
- Resistencia a tracción: 300 a 770GPa.
- Alargamiento en rotura: 20 a 30%.
- Punto fusión: 160 a 170°C.
- Modulo elasticidad: 3.5 GPa. 5-77
- Dosificación: 450 a 950gr/m³.

5.2_ METODOLOGÍA DE ENSAYO.

5.2.1_ REALIZACIÓN HORMIGÓN



Imagen 5.7 Acopio áridos laboratorio



Imagen 5.8 Cámara húmeda

5.2.1.1_ PROCESO:

La idea que se tenía en mente para la realización de este proyecto en el laboratorio, era la de realizar un estudio comparativo de micro hormigones con fibra monofilamento, a base de poliolefina y aditivados con un promotor de adherencia.

Para cumplir nuestro objetivo recurrimos a la realización de 3 tipos diferentes de patrones, los cuales se diferencian entre ellos por la cantidad de cemento que contienen, a los que fuimos añadiendo una cantidad determinada de fibras, de promotor de adherencia y aditivo plastificante para posteriormente, realizar ensayos en estado endurecido de flexión y compresión, y poder analizar los resultados y comprobar si se mejora la capacidad resistente con los elementos introducidos antes señalados.

- Por lo tanto, como se ha mencionado anteriormente, el esquema de actuaciones en el laboratorio fue el siguiente:

- Amasada 1: Patrón 1.
- Amasada 2: Patrón 2.
- Amasada 3: Patrón 3.
- Amasada 4: Patrón 1 + 4kg de fibras M50 + aditivo plastificante 1.5%
- Amasada 5: Patrón 2 + 4Kg de fibras M50 + aditivo plastificante 1.5%
- Amasada 6: Patrón 3 + 4kg de fibras M50 + aditivo plastificante 1.5%
- Amasada 7: Patrón 1 + 4kg de fibras M60 + aditivo plastificante 1.5%
- Amasada 8: Patrón 2 + 4kg de fibras M60 + aditivo plastificante 1.5%
- Amasada 9: Patrón 3 + 4kg de fibras M60 + aditivo plastificante 1.5%
- Amasada 10: Patrón 1 + 4kg de fibras M50 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 1%
- Amasada 11: Patrón 2 + 4kg de fibras M50 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 1%
- Amasada 12: Patrón 3 + 4kg de fibras M50 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 1%
- Amasada 13: Patrón 1 + 4kg de fibras M50 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 2%
- Amasada 14: Patrón 2 + 4kg de fibras M50 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 2%
- Amasada 15: Patrón 3 + 4kg de fibras M50 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 2%
- Amasada 16: Patrón 1 + 4kg de fibras M60 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 1%
- Amasada 17: Patrón 2 + 4kg de fibras M60 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 1%
- Amasada 18: Patrón 3 + 4kg de fibras M60 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 1%
- Amasada 19: Patrón 1 + 4kg de fibras M60 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 2%
- Amasada 20: Patrón 2 + 4kg de fibras M60 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 2%

- Amasada 21: Patrón 3 + 4kg de fibras M60 + ad plastif 1.5% + promotor adherencia 2%

Para la realización del micro hormigón autocompactante, primero calculamos la humedad de los áridos para poder así reducir el agua conveniente en nuestra dosificación.

Para ello, introdujimos el árido en un recipiente (imagen 4.1) que nos permitió ir dándole calor mientras lo removíamos, hasta que desapareciera la humedad de nuestro árido.

Pesamos antes y después de calentarlo, y de este modo pudimos obtener dicho valor.



Imagen 5.9 Útiles obtención humedad árido

Seguidamente, pesamos los áridos, el cemento, el agua, el promotor de adherencia y aditivo y nos dispusimos a realizar la primera amasada (amasada 1).

Cada amasada se decidió realizarla en un recipiente de 5l.



Imagen 5.10 Componentes amasada



Imagen 5.11 Amasada

En la imagen 5.10, se puede observar los diferentes componentes de la amasada, una vez pesados, colocados en sus correspondientes recipientes, y justo después de la introducción de éstos, momento en el que la amasadora está realizando su función (imagen 5.11).

Una vez finalizada la preparación de cada uno de los componentes que van a formar parte de nuestro MHAC, nos propusimos a introducirlos en la amasadora con el siguiente orden: primero los áridos (imagen 5.12, 5.13), después el cemento y las fibras (imagen 5.14); con estos materiales, realizamos un PRE-mezclado, de 1 minuto de duración, para crear una mezcla más homogénea.



Imagen 5.12, 5.13 Áridos

Imagen 5.14 Fibras

Después, se introdujo el agua y se realizó la amasada. Durante la misma, se introdujo paulatinamente, el aditivo plastificante y el promotor de adherencia.

La duración de cada amasada oscila entre 4 y 5 minutos, aproximadamente.

Pasado el tiempo necesario para que la mezcla fuese lo suficientemente homogénea, se colocaron las probetas (limpias para evitar la contaminación de nuestro MHAC), y se realizó el vertido de la amasada resultante en ellas (imagen 5.15).



Imagen 5.15 Introducción en probeta

Imagen 5.16 Probeta

A continuación, se enrasó el hormigón con una regleta y se identificó el MHAC. Para ello utilizamos una "matricula" (imagen 5.17) que se desglosa de la siguiente manera:



Imagen 5.17 Designación MHAC

ARRÉS: apellido alumna

P: patrón (300 kg/m³ de cemento)

M50/4: modelo y cantidad de fibras (4 gramos)

1% ADH: porcentaje de promotor de adherencia.

Identificado éste, se procedió a la ubicación del mismo en la cámara de humedad durante 3 días, pasados los cuales, se realizó el desmoldado de la probeta y vuelta a la designación siguiendo el mismo modelo, pero esta vez se realiza con un grafito en el mismo MHAC (imagen 5.18).

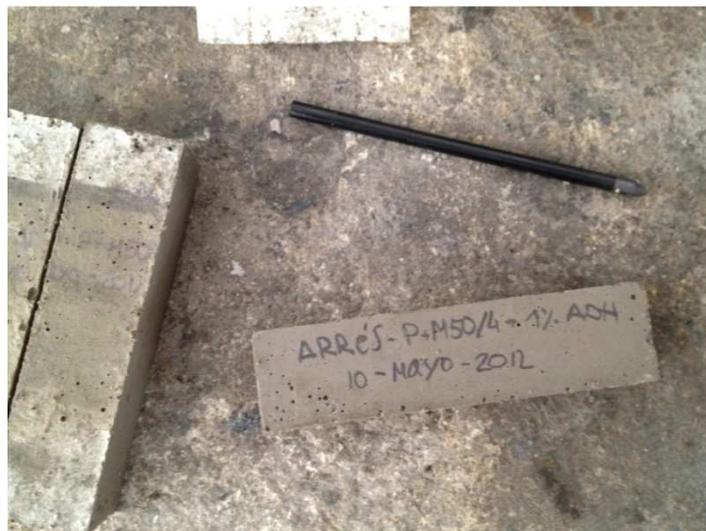


Imagen 5.18 Designación MHAC en probeta

Una vez designadas cada una de las probetas obtenidas de los moldes, se dispusieron en un recipiente lleno de agua (imagen 5.19), con grava en su base (para que el calor actúe también en la zona apoyada), en una estufa a 40 grados de temperatura (imagen 5.20) durante tres días.



Imagen 5.19 Recipiente con base de grava



Imagen 5.20 Horno a 40°

Pasados los tres días, se volvieron a introducir las probetas en la cámara de humedad hasta el séptimo día desde su fabricación, momento en el que se realizarán los primeros ensayos de resistencia mecánica: a compresión y flexotracción.

Llegado el séptimo día, las probetas se sacan de la cámara húmeda y se preparan para realizarle los ensayos en estado endurecido de resistencia mecánica (imagen 5.21)



Imagen 5.21 Preparación probetas para ensayo

Agrupadas por molde, procedemos a la rotura a flexión (imagen 5.22) de dos de las tres obtenidas por molde (imagen 5.23, 5.24) y anotamos los resultados.



Imagen 5.22 Ensayo a flexión



Imagen 5.23, 5.24 Probetas ensayadas a flexión

Con una de estas dos probetas ensayadas, realizamos los ensayos de compresión (imagen 5.22). La rotura a flexión rompe la pieza en dos partes, por lo que realizamos dos ensayos de compresión por probeta.

Anotamos los resultados y procedemos a la limpieza de la zona de ensayos del laboratorio.



Imagen 5.25, 5.26 Ensayo a compresión

Realizado este último ensayo, procedemos a introducir nuevamente en la cámara de humedad el resto de probetas (imagen 5.27), que serán: una intacta y otra rota a flexión por cada molde (la tercera ha sido destrozada en el ensayo a compresión; imagen 5.26) y se mantendrán ahí hasta el día 28 desde la fabricación del MHAC, día en el que se volverán a repetir los ensayos anteriores y se podrán evaluar los resultados de ambos días, pudiendo analizar si las fibras, aditivo de y promotor de adherencia, colaboran en resistencia o por el contrario no hay cambio alguno en las características iniciales del MHAC.



Imagen 5.27 Probetas en Cámara Húmeda

5.2.2_ ESTADO ENDURECIDO

Tras 7 días de endurecimiento del hormigón, se procedió a estudiar la resistencia mecánica del hormigón, realizando los ensayos de compresión y flexión de cada amasada en el laboratorio; utilizando dos muestras de cada probeta para el ensayo a flexión (2 roturas) y los restos de una de las roturas a flexión (2 trozos por probeta), para realizar el ensayo a compresión.

A los 28 días de la realización de cada una de las amasadas, volvemos a realizar los ensayos citados anteriormente; pero a diferencia de las roturas a 7 días, en esta ocasión utilizaremos la tercera muestra de cada probeta (estando ésta intacta) para el estudio a flexión, por lo que solamente obtendremos un dato.

Las siguientes imágenes (img. 5.28, 5.29), nos muestran las roturas de las probetas en el laboratorio una vez realizados dichos ensayos.

Se observa el estado final de las probetas tras sobrepasar sus cargas máximas admisibles.

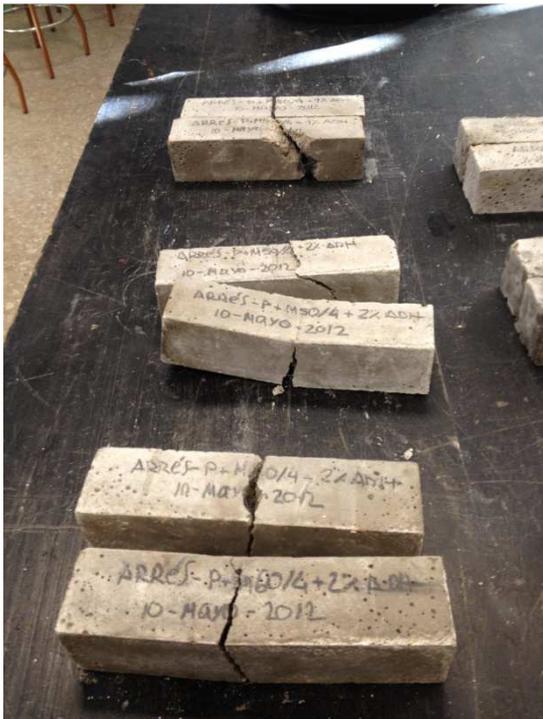


Imagen 5.28 Probetas rotas a flexión



Imagen 5.29 Probetas rotas a compresión

5.2.2.1_ COMPRESIÓN:

El ensayo a compresión se realizó tras estar 7 y 28 días de endurecimiento en la cámara de curado húmeda del hormigón. Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

Para realizar las roturas a compresión, se utilizaron los restos de las roturas a flexión, ya que éstas se realizan con una maquinaria específica en la que la muestra es apoyada en tres puntos dando como resultado la pieza dividida en 2.

Transcurrido este tiempo, se colocó la probeta en la máquina de ensayos (imagen 5.30).

Este equipo está compuesto por dos platos de compresión, uno inferior y otro superior adosados ambos al bastidor que está acoplado al pistón del equipo mediante una rótula de asiento esférico engrasada.

Una vez que el plato de compresión estuvo apoyado en la probeta, empezó el ensayo.

La siguiente imagen, nos muestra la rotura de una probeta cuando acaba de alcanzar su carga máxima admisible.



Imagen 5.30 Ensayo a Compresión

Una vez finalizado el ensayo, se leyó directamente la carga máxima admisible del registro electrónico del equipo (imagen 5.31).

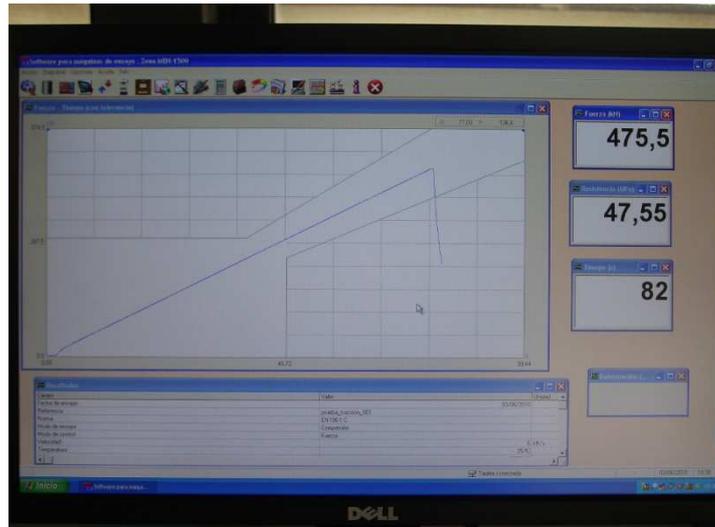


Imagen 5.31 Resultados en ordenador del ensayo a compresión

5.2.2.2_ FLEXIÓN

El ensayo a flexión se realizó tras estar 7 y 28 días de endurecimiento en el laboratorio dentro de la cámara húmeda de curado. Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

Las probetas que se usaron fueron prismáticas cuyas dimensiones eran de 40x40x160mm y una vez desmoldadas e introducidas en estufa a 40 grados durante tres días, se dejaron en ambiente de laboratorio dentro de la cámara de endurecimiento hasta alcanzar el séptimo día tras su amasada, día en el que se procedió a realizar los ensayos en estado endurecido de dos de las 3 probetas obtenidas en cada amasada.

El mismo ensayo se realizará a la tercera probeta a los 28 días.

Transcurrido este tiempo, se colocó la probeta en la máquina de ensayos (imagen 5.32).



Imagen 5.32 Ensayo a Flexión

Una vez finalizado el ensayo, se leyó directamente la tensión máxima de rotura del registro electrónico del equipo (imagen 5.33).

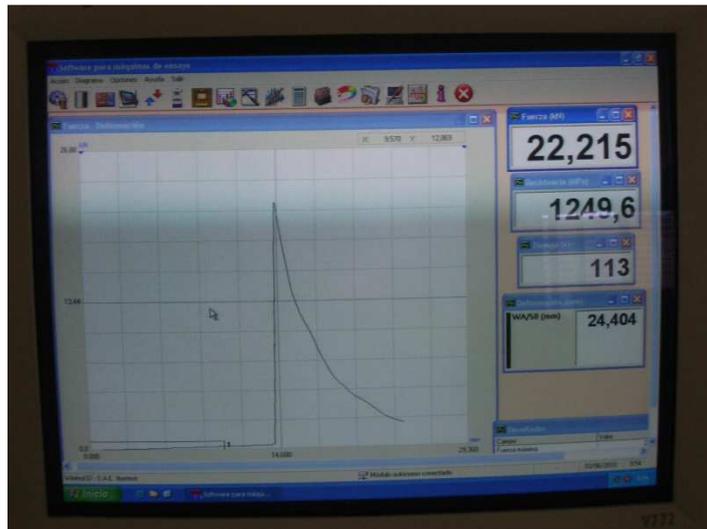


Imagen 5.33 Resultados ordenador ensayo a Flexión

La siguiente imagen (img5.34), nos muestra el estado de una probeta tras realizar su ensayo a flexión.

Se puede observar como la probeta queda fisurada al sobrepasar su tensión máxima admisible.

Las fibras ayudan a que el hormigón trabe y no parta del todo, si la fuerza se siguiera aplicando, la probeta se hubiera partido completamente.



Imagen 5.34 Probeta rota tras ensayo a Flexión

6_ RESULTADOS Y ANALISIS

6.1_ DOSIFICACIONES REALIZADAS

6.1.1_DOSIFICACIÓN AMASADA 1

AMASADA 1

DOSIFICACIÓN	Kg/m3
H2O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	300
Promotor adherencia 0%	0
sin fibras POLIMÉRICAS	0
Aditivo Plastifi.	4,95
A/C	0,82
SUMATORIO	2449,69

Tabla 6.1 dosificacoin sin fibras.

Posteriormente a obtener la amasada, y pasado el tiempo predispuesto curándose, se realizaron los ensayos en estado endurecido del micro hormigón, los ensayos a compresión y flexo-tracción.

Estos resultados se muestran en la tabla 6.1.1

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)
7 días	2,28	5,35	40,21	25,13
	2,55	5,97	39,28	24,55
28 días	2,78	6,51	42,68	26,67
			46,09	28,8

Tabla 6.1.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión (al igual que el primer ensayo a flexión) se realizó tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

Como se muestra en la tabla 6.1.1, en la amasada 1, tras el ensayo a flexión a los 7 días, se obtuvo una fuerza de 5,35 MPa en la primera probeta, y 5,97 MPa en la segunda. La resistencia obtenida en el ensayo a compresión de los dos trozos obtenidos tras el ensayo anterior de la probeta más resistente, fueron: 25,131 y 24,55 MPa.

Los datos obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 6,51 MPa y a compresión 26,67 y 28,80 MPa.

En la imagen 6.1 a), se muestra la realización del ensayo a compresión, y en la imagen 6.1 b), se muestra el estado de la probeta una vez realizado este ensayo.



Imagen 6.1 a) Ensayo a compresión



b) Probeta tras ensayo a compresión

6.1.2_DOSIFICACIÓN AMASADA 2

AMASADA 2

DOSIFICACIÓN	Kg/m ³
H ₂ O	244,74
Arena 0/2	1150
Arena Sika	700
CEM	350
Promotor adherencia 0%	0
sin fibras POLIMÉRICAS	0
Aditivo Plastifi.	5,25
A/C	0,69
SUMATORIO	2449,99

Tabla 6.2

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	3,15	7,38	44,19	27,61
	3,01	7,05	43,73	27,33
28 días	3,15	7,38	54,94	34,33
			54,47	34,1

Tabla 6.2.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

Como se observa en la tabla 6.2.1, la amasada 2 obtiene, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 7,38MPa en la primera probeta, y 7,05MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión de los dos segmentos obtenidos tras el ensayo anterior de la probeta más resistente, fueron: 27,61 y 27,33 MPa.

Los datos obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 7,38 MPa y a compresión 34,33 y 34,10 MPa.

6.1.3_DOSIFICACIÓN AMASADA 3

AMASADA 3

DOSIFICACIÓN	Kg/m3
H2O	244,74
Arena 0/2	1100
Arena Sika	700
CEM	400
Promotor adherencia 0%	0
sin fibras POLIMÉRICAS	0
Aditivo Plastifi.	6
A/C	0,61
SUMATORIO	2450,74

Tabla 6.3

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	3,07	7,19	58,03	36,26
	3,24	7,59	62,75	39,21
28 días	3,64	8,53	66,94	41,83
			67,51	42,19

Tabla 6.3.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

De la tabla 6.3.1, obtenemos de la amasada 3, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 7,19MPa en la primera probeta, y 7,59MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 36,26 y 39,21 MPa. Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 8,53 MPa y a compresión 41,83 y 42,19 MPa.

Observamos en estas tres amasadas, como las resistencias tanto a flexión como a compresión, aumentan; esto es debido a la variación de la cantidad de cemento, ya que en estas amasadas no se han introducido ni fibras, ni promotor de adherencia: cuanto más cemento, la resistencia es mayor.

6.1.4 DOSIFICACIÓN AMASADA 4

AMASADA 4

DOSIFICACIÓN	Kg/m3
H2O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	300
Promotor adherencia 0%	0
fibras POLIMÉRICAS M50	4
Aditivo Plastifi.	4,5
A/C	0,82
SUMATORIO	2454,06

Tabla 6.4

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,15	5,04	36,73	22,95
	2,07	4,85	36,67	22,92
28 días	2,17	5,08	41,88	26,17
			42,16	26,35

Tabla 6.4.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.4.1, podemos observar que la amasada 4, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 5,04MPa en la primera probeta, y 4,85MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 22,95 y 22,92 MPa. Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 5,08 MPa y a compresión 26,175 y 26,35 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M50, comparando resultados con el Patrón 1 (300 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 1, no se observa un aumento de resistencia.

6.1.5_DOSIFICACIÓN AMASADA 5

AMASADA 5

DOSIFICACIÓN	Kg/m3
H2O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	350
Promotor adherencia 0%	0
fibras POLIMÉRICAS M50	4
Aditivo Plastifi.	5,25
A/C	0,69
SUMATORIO	2504,69

Tabla 6.5

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,41	5,64	48,34	30,21
	2,38	5,57	47,42	29,64
28 días	2,79	6,54	50,9	31,81
			55,26	34,53

Tabla 6.5.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.5.1, podemos observar que la amasada 5, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 5,64 MPa en la primera probeta, y 5,57MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 30,21 y 29,63 MPa. Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 6,54 MPa y a compresión 31,81 y 34,53 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M50, comparando resultados con el Patrón 2 (350 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 2, no se observa un aumento de resistencia, sino lo contrario; la resistencia a flexión y compresión disminuyen.

6.1.6_DOSIFICACIÓN AMASADA 6

AMASADA 6

DOSIFICACIÓN	Kg/m3
H2O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	400
Promotor adherencia 0%	0
fibras POLIMÉRICAS M50	4
Aditivo Plastifi.	6
A/C	0,61
SUMATORIO	2555,35

Tabla 6.6

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	3,25	7,61	59,69	37,31
	2,84	6,65	58,79	36,74
28 días	3,5	8,21	67,97	42,48
			64,84	40,52

Tabla 6.6.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.6.1, podemos observar que la amasada 6, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 7,61 MPa en la primera probeta, y 6,65 MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 37,31 y 36,74 MPa. Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 8,21 MPa y a compresión 42,48 y 40,52 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M50, comparando resultados con el Patrón 2 (400 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 2, se observa un ligero aumento de resistencia.

6.1.7_DOSIFICACIÓN AMASADA 7

AMASADA 7

DOSIFICACIÓN	Kg/m3
H2O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	300
Promotor adherencia 0%	0
fibras POLIMÉRICAS M60	4
Aditivo Plastifi.	4,5
A/C	0,81
SUMATORIO	2454,06

Tabla 6.7

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,21	5,18	32,58	20,36
	1,93	4,52	31,72	19,82
28 días	2,31	5,41	40,64	25,4

Tabla 6.7.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.7.1, podemos observar que la amasada 7, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 5,18 MPa en la primera probeta, y 4,52 MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 20,36 y 19,82 MPa. Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 5,41 MPa y a compresión 25,40 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M60, comparando resultados con el Patrón 1 (300 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 1, no se observa aumento de resistencia, sino un ligero descenso.

La segunda rotura a los 7 días, se presenta más baja debido a que en la probeta aparecían mordeduras por la base.

6.1.8_DOSIFICACIÓN AMASADA 8

AMASADA 8

DOSIFICACIÓN	Kg/m3
H2O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	350
Promotor adherencia 0%	0
fibras POLIMÉRICAS M60	4
Aditivo Plastifi.	5,25
A/C	0,69
SUMATORIO	2504,67

Tabla 6.8

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,8	6,57	49,86	31,16
	2,81	6,58	47,62	29,76
28 días	3,06	7,17	54,97	34,35
			54,43	34,02

Tabla 6.8.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.8.1, podemos observar que la amasada 8, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 6,57 MPa en la primera probeta, y 6,58 MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 31,16 y 29,76 MPa. Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 7,17 MPa y a compresión 34,35 y 34,02 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M60, comparando resultados con el Patrón 2 (350 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 2, no se observa aumento de resistencia en el ensayo a flexión, sino un ligero descenso; sin embargo, aumenta la resistencia a compresión.

6.1.9_DOSIFICACIÓN AMASADA 9

AMASADA 9

DOSIFICACIÓN	Kg/m3
H2O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	400
Promotor adherencia 0%	0
fibras POLIMÉRICAS M60	4
Aditivo Plastifi.	6
A/C	0,61
SUMATORIO	2555,35

Tabla 6.9

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,87	6,73	55,13	34,45
	3,13	7,33	57,59	35,99
28 días	3,05	7,15	62,08	38,8
			51,55	32,21

Tabla 6.9.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.9.1, podemos observar que la amasada 9, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 6,73 MPa en la primera probeta, y 7,33 MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 34,45 y 35,99 MPa. Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 7,15 MPa y a compresión 38,80 y 32,21 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M60, comparando resultados con el Patrón 3 (400 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 3; se observa aumento de resistencia en ambos ensayos a 28 días.

6.1.10_DOSIFICACIÓN AMASADA 10

AMASADA 10

DOSIFICACIÓN	Kg/m3
H2O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	300
Promotor adherencia 1%	3
fibras POLIMÉRICAS M50	4
Aditivo Plastifi.	4,5
A/C	0,81
SUMATORIO	2457,05

Tabla 6.10

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,06	4,83	33,73	21,08
	2,04	4,78	35,89	22,43
28 días	0,74	1,73	39,94	24,96
			35,25	22,03

Tabla 6.10.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.10.1, podemos observar que la amasada 10, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 4,83 MPa en la primera probeta, y 4,78 MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 21,08 y 22,43 MPa.

Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 1,73 MPa y a compresión 24,96 y 22,03 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M50 y 1% de promotor de adherencia, comparando resultados con el Patrón 1 (300 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 1; se observa un ligero descenso de resistencia en ambos ensayos tanto a 7 como a 28 días.

6.1.11_DOSIFICACIÓN AMASADA 11

AMASADA 11

DOSIFICACIÓN	Kg/m ³
H2O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	350
Promotor adherencia 1%	3,5
fibras POLIMÉRICAS M50	4
Aditivo Plastifi.	5,25
A/C	0,69
SUMATORIO	2508,19

Tabla 6.11

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,66	6,23	47,22	29,51
	2,46	5,76	46,3	28,94
28 días	2,79	6,54	50,82	31,76
			53,76	33,6

Tabla 6.11.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.11.1, podemos observar que la amasada 11, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 6,23 MPa en la primera probeta, y 5,76 MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 29,51 y 28,94MPa.

Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: 6,54 MPa a flexión y a compresión 31,76 y 33,60 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M50 y 1% de promotor de adherencia, comparando resultados con el Patrón 2 (350 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 2; se observa un ligero aumento de resistencia a compresión a 7 días.

6.1.12_DOSIFICACIÓN AMASADA 12

AMASADA 12

DOSIFICACIÓN	Kg/m ³
H ₂ O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	400
Promotor adherencia 1%	4
fibras POLIMÉRICAS M50	4
Aditivo Plastifi.	6
A/C	0,61
SUMATORIO	2559,35

Tabla 6.12

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,61	6,12	54,68	34,17
	2,96	6,94	54,29	33,93
28 días	2,88	6,75	60,09	37,55
			59,31	37,07

Tabla 6.12.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.12.1, podemos observar que la amasada 12, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 6,12 MPa en la primera probeta, y 6,94 MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 34,17 y 33,93MPa.

Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 6,75 MPa y a compresión 37,55 y 33,0 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M50 y 1% de promotor de adherencia, comparando resultados con el Patrón 3 (400 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 3; se observa un descenso de resistencia en ambos ensayos.

6.1.13_DOSIFICACIÓN AMASADA 13

AMASADA 13

DOSIFICACIÓN	Kg/m ³
H ₂ O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	300
Promotor adherencia 2%	6
fibras POLIMÉRICAS M50	4
Aditivo Plastifi.	4,5
A/C	0,81
SUMATORIO	2460,05

Tabla 6.13

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	1,23	2,88	32,42	20,26
	2,44	5,72	35,27	22,04
28 días	2,18	5,12	40,1	25,06
			35,19	21,99

Tabla 6.13.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.13.1, podemos observar que la amasada 13, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 2,88 MPa en la primera probeta, y 5,72 MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 20,26 y 22,044 MPa.

Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 5,12 MPa y a compresión 25,06 y 21,99 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M50 y 2% de promotor de adherencia, comparando resultados con el Patrón 1 (300 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 1; se observa un descenso de resistencia en ambos ensayos.

En la primera probeta ensayada a flexión a los 7 días, se observa una menor resistencia (1.231 KN) debido a una rotura a cortante.

6.1.14_DOSIFICACIÓN AMASADA 14

AMASADA 14

DOSIFICACIÓN	Kg/m ³
H ₂ O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	350
Promotor adherencia 2%	7
fibras POLIMÉRICAS M50	4
Aditivo Plastifi.	5,25
A/C	0,69
SUMATORIO	2511,69

Tabla 6.14

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,29	5,37	41,43	25,89
	2,28	5,34	42,22	26,38
28 días	2,63	6,16	48,43	3,027
			49,73	31,08

Tabla 6.14.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.14.1, podemos observar que la amasada 14, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 5,37 MPa en la primera probeta, y 5,34 MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 25,89 y 26,38 MPa.

Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 6,16 MPa y a compresión 30,27 y 31,08 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M50 y 2% de promotor de adherencia, comparando resultados con el Patrón 2 (350 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 2; se observa un descenso de resistencia en ambos ensayos.

6.1.15_DOSIFICACIÓN AMASADA 15

AMASADA 15

DOSIFICACIÓN	Kg/m ³
H ₂ O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	400
Promotor adherencia 2%	8
fibras POLIMÉRICAS M50	4
Aditivo Plastifi.	6
A/C	0,61
SUMATORIO	2563,35

Tabla 6.15

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,94	6,89	52,6	32,87
	2,96	6,93	51,16	31,97
28 días	3,13	7,33	59,86	37,41
			60,9	38,06

Tabla 6.15.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.15.1, podemos observar que la amasada 15, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 6,89 MPa en la primera probeta, y 6,93 MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 32,87 y 31,97 MPa.

Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 7,33 MPa y a compresión 37,41 y 38,06 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M50 y 2% de promotor de adherencia, comparando resultados con el Patrón 3 (400 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 3; se observa un descenso de resistencia en ambos ensayos.

6.1.16_DOSIFICACIÓN AMASADA 16

AMASADA 16

DOSIFICACIÓN	Kg/m ³
H ₂ O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	300
Promotor adherencia 1%	3
fibras POLIMÉRICAS M60	4
Aditivo Plastifi.	4,5
A/C	0,81
SUMATORIO	2457,05

Tabla 6.16

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,6	6,09	36,27	22,67
	2,32	5,44	35,56	22,22
28 días	1,98	4,64	38,92	24,32
			38,46	24,04

Tabla 6.16.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.16.1, podemos observar que la amasada 16, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 6,09 MPa en la primera probeta, y 5,44 MPa

en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 22,67 y 22,22 MPa.

Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 4,64 MPa y a compresión 24,32 y 24,04 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M60 y 1% de promotor de adherencia, comparando resultados con el Patrón 1 (300 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 1; se observa un descenso de resistencia en ambos ensayos.

6.1.17_DOSIFICACIÓN AMASADA 17

AMASADA 17

DOSIFICACIÓN	Kg/m ³
H2O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	350
Promotor adherencia 1%	3,5
fibras POLIMÉRICAS M60	4
Aditivo Plastifi.	5,25
A/C	0,69
SUMATORIO	2508,19

Tabla 6.17

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,44	5,72	44,53	27,83
	1,47	3,44	44,8	28
28 días	2,96	6,94	51,61	32,25
			51,93	32,45

Tabla 6.17.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.17.1, podemos observar que la amasada 17, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 5,72 MPa en la primera probeta, y 3,44 MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 27,83 y 28 MPa.

Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 6,94 MPa y a compresión 32,25 y 32,45 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M60 y 1% de promotor de adherencia, comparando resultados con el Patrón 2 (350 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 2; se observa un descenso de resistencia en ambos ensayos.

6.1.18_DOSIFICACIÓN AMASADA 18

AMASADA 18

DOSIFICACIÓN	Kg/m ³
H ₂ O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	400
Promotor adherencia 1%	4
fibras POLIMÉRICAS M60	4
Aditivo Plastifi.	6
A/C	0,61
SUMATORIO	2559,35

Tabla 6.18

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	ROTA		50,2	31,37
	2,82	6,61	50,06	31,28
28 días	3,32	7,78	58,05	36,28
			56,72	35,45

Tabla 6.18.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.18.1, podemos observar que la amasada 18, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 6,61 MPa en la segunda probeta (la primera se rompió y no pudimos realizar el ensayo). Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 31,37 y 31,28 MPa.

Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 7,78 MPa y a compresión 36,28 y 35,45 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M60 y 1% de promotor de adherencia, comparando resultados con el Patrón 3 (400 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 3; se observa un descenso de resistencia en ambos ensayos.

6.1.19_DOSIFICACIÓN AMASADA 19

AMASADA 19

DOSIFICACIÓN	Kg/m ³
H ₂ O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	300
Promotor adherencia 2%	6
fibras POLIMÉRICAS M60	4
Aditivo Plastifi.	4,5
A/C	0,81
SUMATORIO	2460,05

Tabla 6.19

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,23	5,23	34,4	21,5
	2,07	4,85	34,51	21,57
28 días	2,19	5,13	39,44	24,65
			29,71	18,57

Tabla 6.19.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.19.1, podemos observar que la amasada 19, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 5,23 MPa en la primera probeta, y 4,85 MPa en la segunda probeta. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 21,50 y 21,57 MPa.

Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 5,13 MPa y a compresión 24,65 y 18,57 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M60 y 2% de promotor de adherencia, comparando resultados con el Patrón 1 (300 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 1; se observa un descenso de resistencia en ambos ensayos.

6.1.20_DOSIFICACIÓN AMASADA 20

AMASADA 20

DOSIFICACIÓN	Kg/m ³
H ₂ O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	350
Promotor adherencia 2%	7
fibras POLIMÉRICAS M60	4
Aditivo Plastifi.	5,25
A/C	0,69
SUMATORIO	2511,69

Tabla 6.20

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,27	5,32	42,83	26,77
	2,36	5,53	42,87	26,79
28 días	2,6	6,09	50,81	31,75
			47,33	29,58

Tabla 6.20.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.20.1, podemos observar que la amasada 20, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 5,32 MPa en la primera probeta, y 5,53 MPa en la segunda. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 26,77 y 26,79 MPa.

Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 6,09 y a compresión 31,75 y 29,58 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M60 y 2% de promotor de adherencia, comparando resultados con el Patrón 2 (350 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 2; se observa un descenso de resistencia en ambos ensayos.

6.1.21_DOSIFICACIÓN AMASADA 21

AMASADA 21

DOSIFICACIÓN	Kg/m ³
H2O	244,74
Arena 0/2	1200
Arena Sika	700
CEM	400
Promotor adherencia 2%	8
fibras POLIMÉRICAS M60	4
Aditivo Plastifi.	6
A/C	0,61
SUMATORIO	2563,35

Tabla 6.21

	Flexo-tracción		Compresión	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Fuerza (KN)	Resistencia (Mpa)
7 días	2,92	6,84	55,37	34,61
	3,11	7,29	53,39	33,37
28 días	3,71	8,69	61,9	38,69
			62,97	39,35

Tabla 6.21.1

Ensayos en estado endurecido:

El ensayo a flexo-tracción, se realizó según la normativa UNE-EN 12390-5:2001.

El ensayo a compresión se realizó (al igual que el primer ensayo a flexión) tras estar 7 días (3 de ellos en estufa a 40°) y 28 días de fraguado y endurecimiento en cámara húmeda.

Se realizó según la normativa UNE-EN 12390-3:2003.

En la tabla 6.21.1, podemos observar que la amasada 21, tras el ensayo a flexión a los 7 días, una fuerza de 6,84 MPa en la primera probeta, y 7,29 MPa en la segunda probeta. Los resultados en el ensayo a compresión, fueron: 34,61 y 33,37 MPa.

Los resultados obtenidos en los ensayos a 28 días, fueron: a flexión 8,69 MPa y a compresión 38,69 y 39,35 MPa.

En esta amasada se han introducido 4 gramos fibras M60 y 2% de promotor de adherencia, comparando resultados con el Patrón 3 (400 kg/m³ cemento) que corresponde con la amasada 3; se observa un descenso de resistencia en ambos ensayos excepto en la flexión a 28 días, que aumenta ligeramente.

6.2_ ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS A 28 DÍAS

A continuación, procedemos al análisis de los resultados obtenidos en las roturas a 28 días.

Destacamos el comportamiento de las dosificaciones sin fibras en la imagen 6.2.

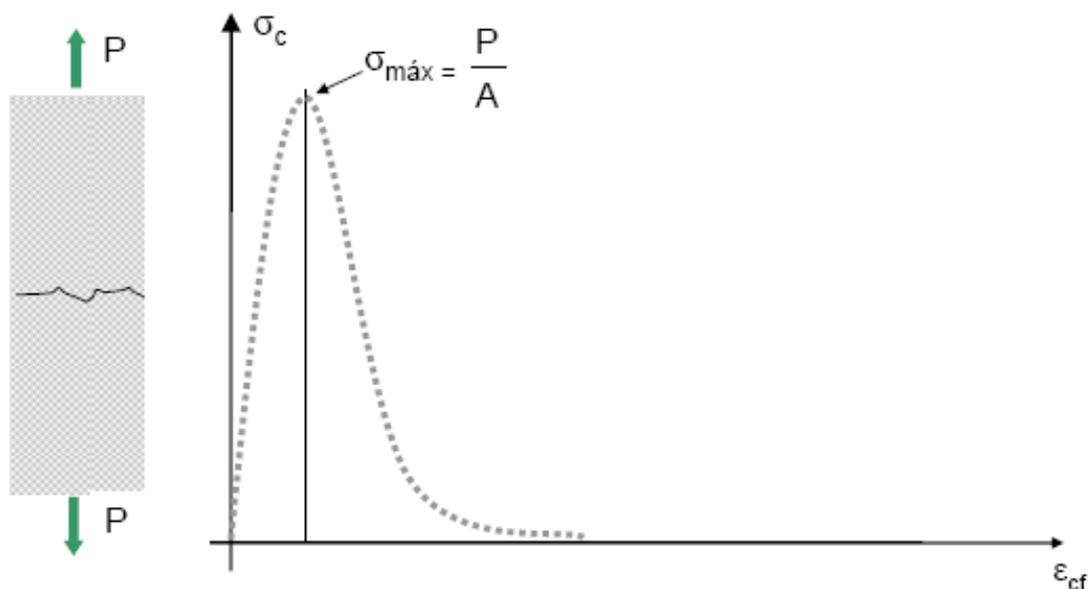


Imagen 6.2 Hormigón sin fibras

Se observa como el hormigón, cuando no posee fibras, al alcanzar el punto máximo de su tensión admisible, rompe frágilmente.

A diferencia de éste, en la imagen 6.3, se puede observar cómo un hormigón con fibras, al alcanzar su tensión máxima admisible, en vez de romper frágilmente, deforma previamente.

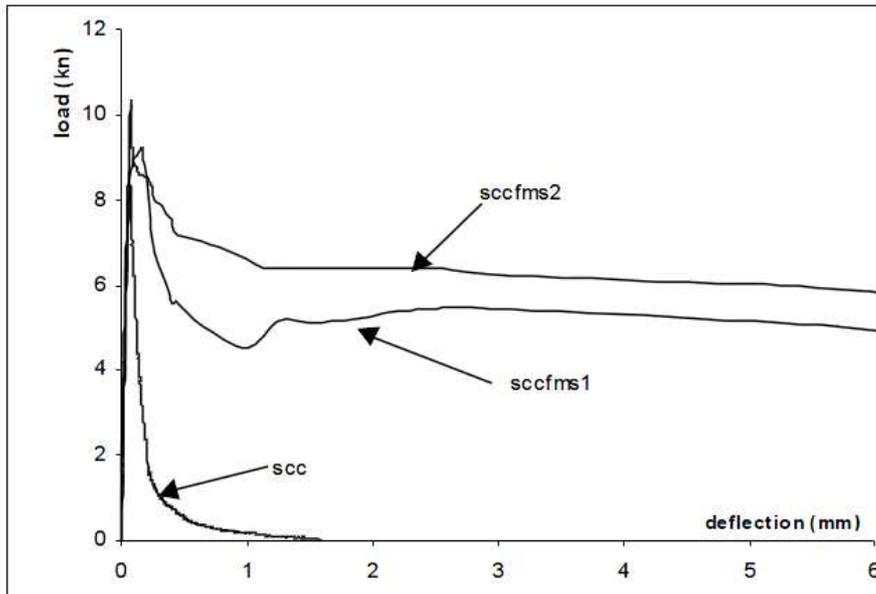
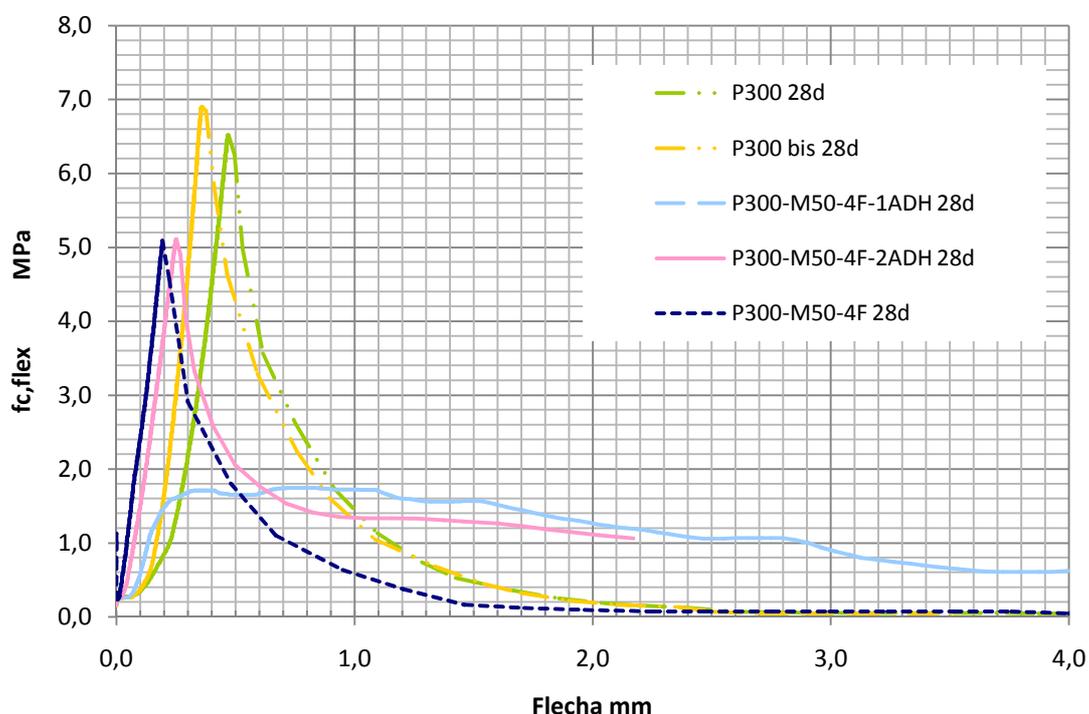


Imagen 6.3 Comportamiento hormigón con/sin fibras

Tomaremos estas dos últimas imágenes (6.2, 6.3) como referencia para poder analizar los datos obtenidos.

6.2.1_ PATRÓN 1. 300.

FIBRAS M50



Gráfica 6.1 P300-M50

En esta gráfica podemos analizar el comportamiento a 28 días de nuestra dosificación estudiada en diferentes condiciones.

Se observa como el punto máximo de su tensión admisible, cuando no tiene fibras ni promotor de adherencia, rompe frágilmente.

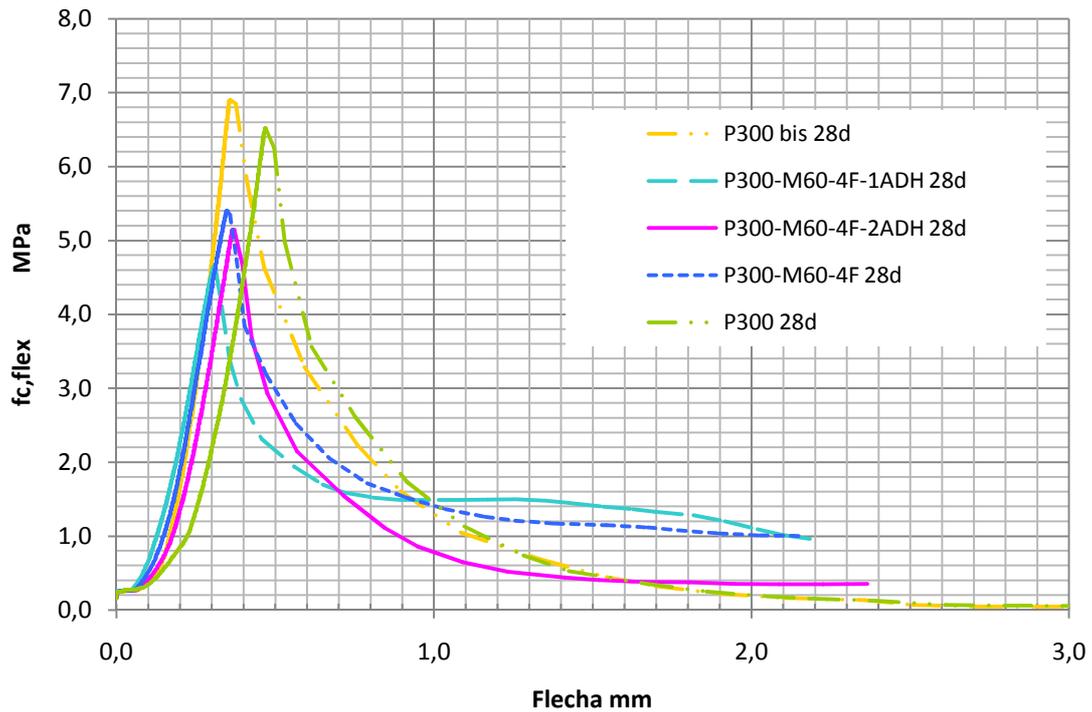
Sin embargo, en las otras tres muestras (todas ellas con fibras tipo M50), se aprecia como el micro hormigón rompe y se observa una caída importante de la resistencia alrededor de 1/5, 1/3 de la capacidad mecánica, momento en el que empieza a actuar la fibra generando una tensión residual en la probeta.

En este caso, observamos que las muestras que contienen promotor de adherencia, poseen una caída de resistencia menor.

Destacamos el micro hormigón P300-M50-4F+2%ADH; éste, con una cantidad de cemento de 300 kg/m³, 4 gramos de fibras M50 Y un 2% de promotor de adherencia, es el que mejor se comporta.

Aunque no se aprecia el indicio que buscamos en este estudio.

FIBRAS M60



Gráfica 6.2 P300-M60

En este caso, volvemos a no encontrar el indicio de nuestro estudio.

La recuperación que se aprecia es leve, prácticamente inexistente.

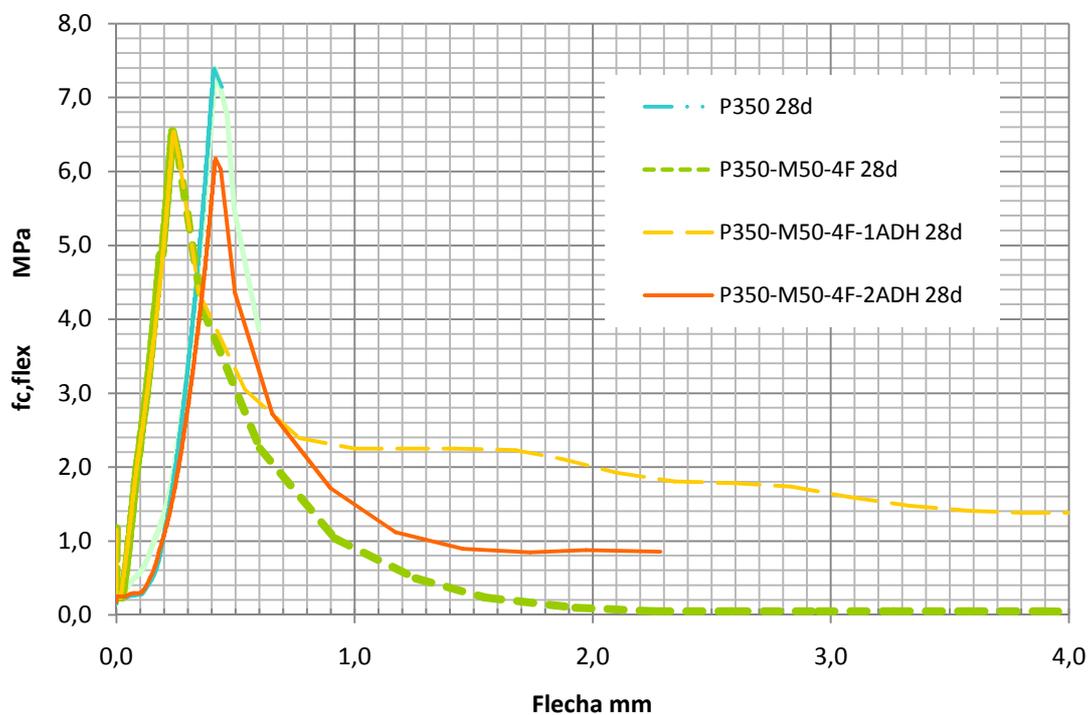
Se observa como el hormigón sin fibras rompe frágilmente tras superar su carga admisible, mientras que en el momento en el que se le añaden fibras y promotor de adherencia, el hormigón se vuelve menos frágil deformando previamente a la rotura.

La presencia de fibras y promotor de adherencia se intuyen en dos de las muestras: P300-M60-4F-1ADH y P300-M60-4F; en ambas se produce una caída de resistencia menor que en el resto.

Destacamos el micro hormigón P300-M60-4F+1%ADH; éste, con una cantidad de cemento de 300 kg/m³, 4 gramos de fibras M60 y un 1% de promotor de adherencia, es el que mejor se comporta.

6.2.2_ PATRÓN 2. 350.

FIBRAS M50



Gráfica 6.3 P350-M50

En el siguiente patrón, "Patrón 2", con 350 kg/m^3 de cemento, el promotor de adherencia, se vuelve a intuir, pero, una vez más, ligeramente. Ya que también en este caso las muestras aditivadas en las que está presente, tienen mejor comportamiento.

Comparando las muestras, observamos como la caída de resistencia es menor en ellas.

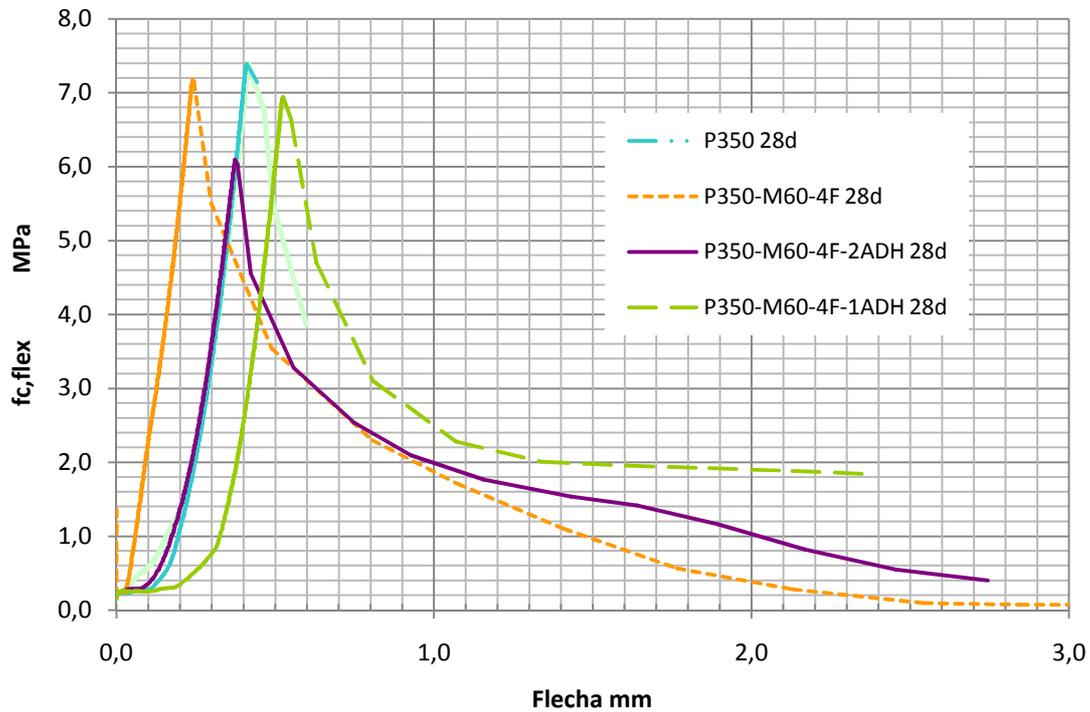
Destacamos la similitud de comportamiento entre P350-M50-4F y P350-M50-4F-1ADH.

Tanto la rama elástica, como el punto de rotura, como la rama de ablandamiento, son muy similares. Aquí se observa la presencia del promotor de adherencia; mientras que P350-M50-4F tiene una caída de resistencia mayor, en P350-M50-4F-1ADH se produce en menor medida.

Siendo la única diferencia entre ambas muestras la presencia de dicho promotor, podemos deducir que esa mejora de comportamiento es debida a su presencia.

Destacamos el micro hormigón P350-M50-4F+1%ADH; éste, con una cantidad de cemento de 350 kg/m^3 , 4 gramos de fibras M50 y un 1% de promotor de adherencia, es el que mejor se comporta.

FIBRAS M60



Gráfica 6.4 P350-M60

En este caso, la diferencia entre muestras es menor, pero aun así, queda reflejada una leve mejoría en cuanto al comportamiento de la dosificación con la existencia de fibras y promotor de adherencia. Pero sigue sin llegar a nuestras expectativas.

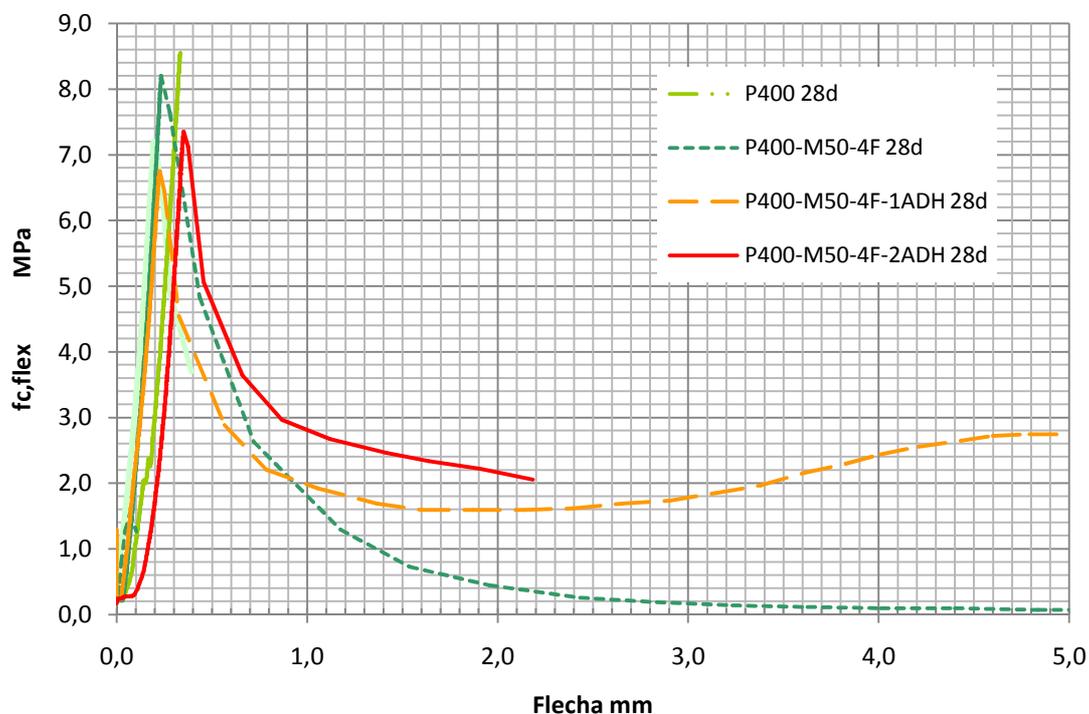
Se observa como el punto máximo de la tensión admisible, cuando no tiene fibras ni promotor de adherencia, es más elevado, pero rompe frágilmente.

Basándonos en las dos muestras aditivadas con promotor de adherencia, observamos como la que posee menor cantidad del mismo (1%), trabaja mejor. Su punto máximo de tensión admisible es mayor y su caída de resistencia menor.

En esta gráfica destacamos el micro hormigón P350-M60-4F+2%ADH; éste, con una cantidad de cemento de 350 kg/m³, 4 gramos de fibras M60 y un 2% de promotor de adherencia, es el que mejor se comporta.

6.2.3_ PATRÓN 2. 400.

FIBRAS M50



Gráfica 6.5 P400-M50

En esta gráfica podemos analizar el comportamiento a 28 días del "Patrón 3" estudiado en diferentes condiciones.

Volvemos a no encontrar el indicio que buscamos en este estudio.

Se observa como el punto máximo de su tensión admisible (punto más alto de la gráfica), cuando no tiene fibras ni promotor de adherencia, es más elevado pero rompe inmediatamente al alcanzarla, ya que no tiene capacidad residual. Rompe frágilmente.

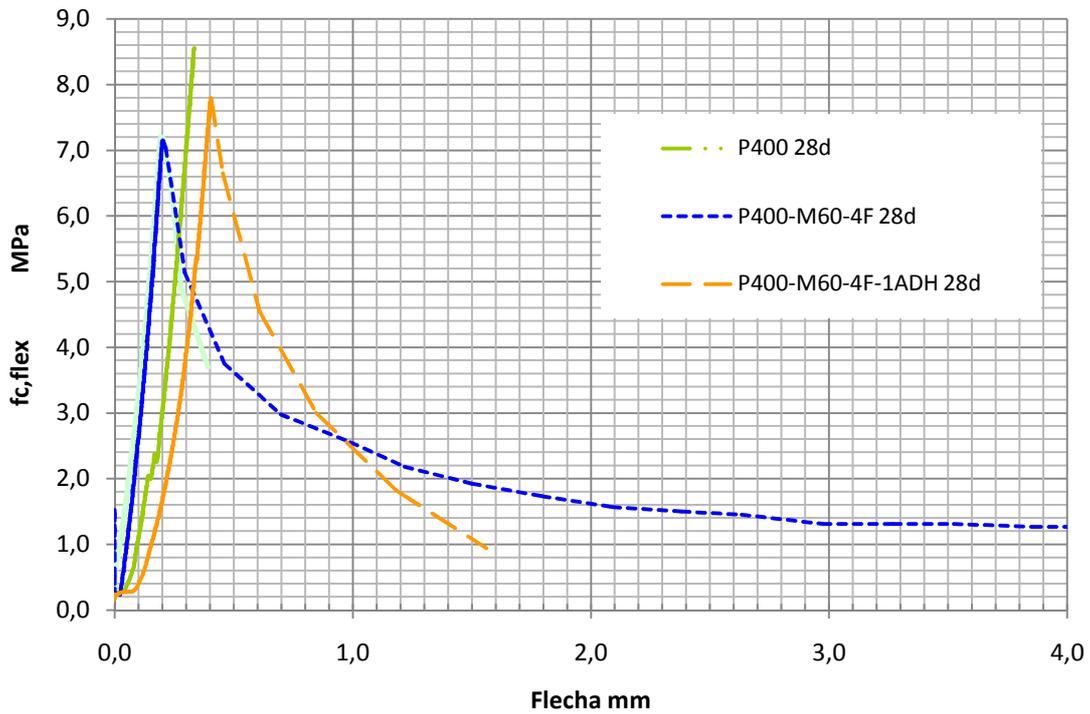
Observamos que las muestras que contienen promotor de adherencia tienen mejor comportamiento, pero de manera muy leve. Poseen una caída de resistencia menor.

En esta ocasión, podemos destacar la similitud de comportamiento entre P400-M50-4F-1ADH y P400-M50-4F-2ADH; la muestra aditivada con 2% de promotor de adherencia posee un punto máximo de tensión admisible mayor y una caída de resistencia menor que la muestra aditivada con el 1%, pero en ésta última, se intuye el enganche a las fibras del hormigón.

Destacamos el micro hormigón P400-M50-4F+1%ADH; éste, con una cantidad de cemento de 400 kg/m³, 4 gramos de fibras M50 Y un 1% de promotor de adherencia, es el que mejor se comporta.

Tras la caída de resistencia, se aprecia una rama de endurecimiento que no se presenta en el resto de muestras.

FIBRAS M60



Gráfica 6.6 P400-M60

Por último, nos encontramos con las fibras del tipo M60.

En este caso, la caída de resistencia menor se produce en P400-M60-4F, coincidiendo con ser la muestra con mejor comportamiento, aun sin llegar a comportarse como se esperaba, con una cantidad de cemento de 400 kg/m^3 , 4 gramos de fibras M60 y sin promotor de adherencia.

Destacamos que el punto de máxima tensión admisible, es mayor en P400-M60-4F-1ADH, pero la caída de resistencia es mayor aun contando con la presencia del promotor.

6.3_ ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS

A continuación, observamos en las siguientes tablas los resultados de los ensayos realizados en estado endurecido de cada una de las amasadas, tanto a Flexión (tabla 6.1) como a Compresión (tabla 6.2)

FLEXIÓN							
7 DÍAS				28 DÍAS			
PATRÓN	P300	P350	P400	PATRÓN	P300	P350	P400
	5,35	7,38	7,19		6,51	7,38	8,53
	5,97	7,05	7,59				
P+M50/4	5,04	5,64	7,61	P+M50/4	5,08	6,54	8,21
	4,85	5,57	6,65				
P+M60/4	5,18	6,57	6,73	P+M60/4	5,41	7,17	7,15
	4,52	6,58	7,33				
P+M50/4+1%	4,83	6,23	6,12	P+M50/4+1%	1,73	6,54	6,75
	4,78	5,76	6,94				
P+M50/4+2%	2,88	5,37	6,89	P+M50/4+2%	5,12	6,16	7,33
	5,72	5,34	6,93				
P+M60/4+1%	6,09	5,72	ROTA	P+M60/4+1%	4,64	6,94	7,78
	5,44	3,44	6,61				
P+M60/4+2%	5,23	5,32	6,84	P+M60/4+2%	5,13	6,09	8,69
	4,85	5,53	7,29				

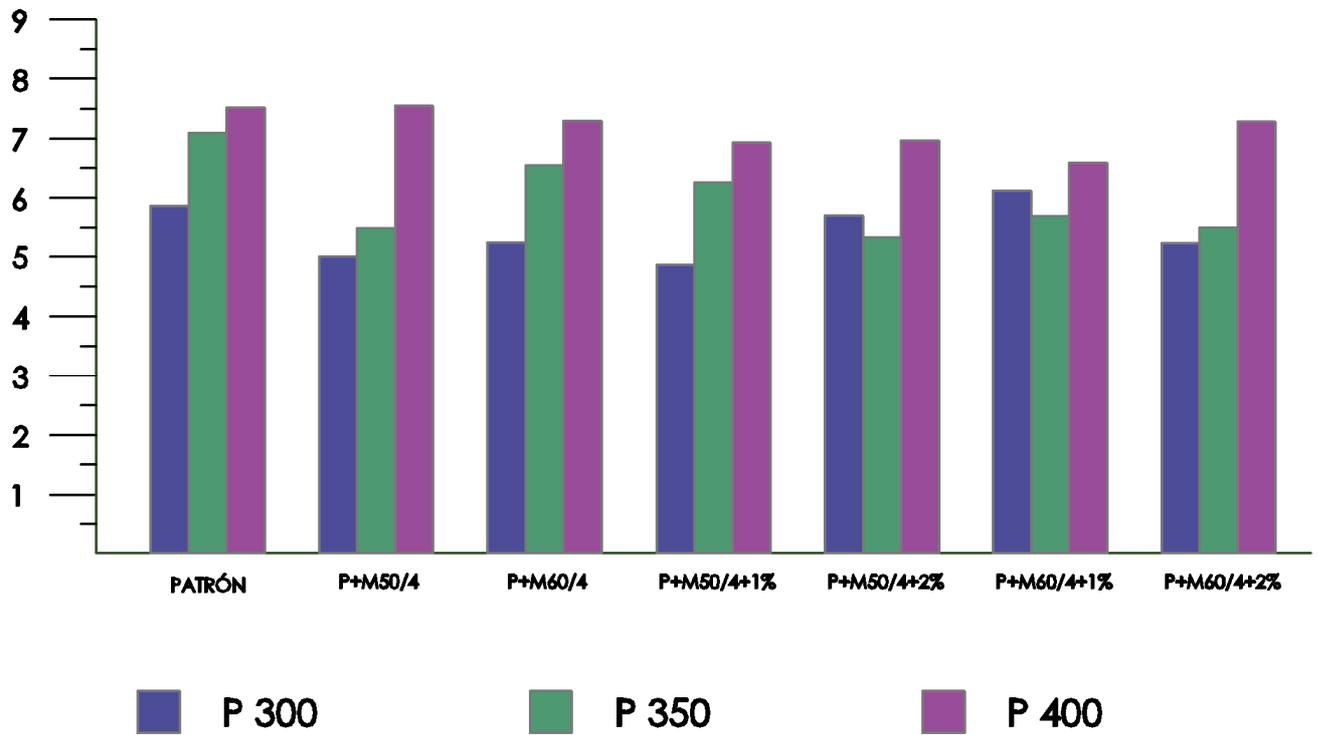
Tabla 6.1 Resistencia a flexión (MPa)

COMPRESIÓN							
7 DÍAS				28 DÍAS			
PATRÓN	P300	P350	P400	PATRÓN	P300	P350	P400
	25,13	27,61	36,26		26,67	34,33	41,83
	24,55	27,33	39,21		28,8	34,1	42,19
P+M50/4	22,95	30,21	37,31	P+M50/4	26,17	31,81	42,48
	22,92	29,64	36,74		26,35	34,53	40,52
P+M60/4	20,36	31,16	34,45	P+M60/4	25,4	34,35	38,8
	19,82	29,76	35,99			34,02	32,21
P+M50/4+1%	21,08	29,51	34,17	P+M50/4+1%	24,96	31,76	37,55
	22,43	28,94	33,93		22,03	33,6	37,07
P+M50/4+2%	20,26	25,89	32,87	P+M50/4+2%	25,06	3,027	37,41
	22,04	26,38	31,97		21,99	31,08	38,06
P+M60/4+1%	22,67	27,83	31,37	P+M60/4+1%	24,32	32,25	36,28
	22,22	28	31,28		24,04	32,45	35,45
P+M60/4+2%	21,5	26,77	34,61	P+M60/4+2%	24,65	31,75	38,69
	21,57	26,79	33,37		18,57	29,58	39,35

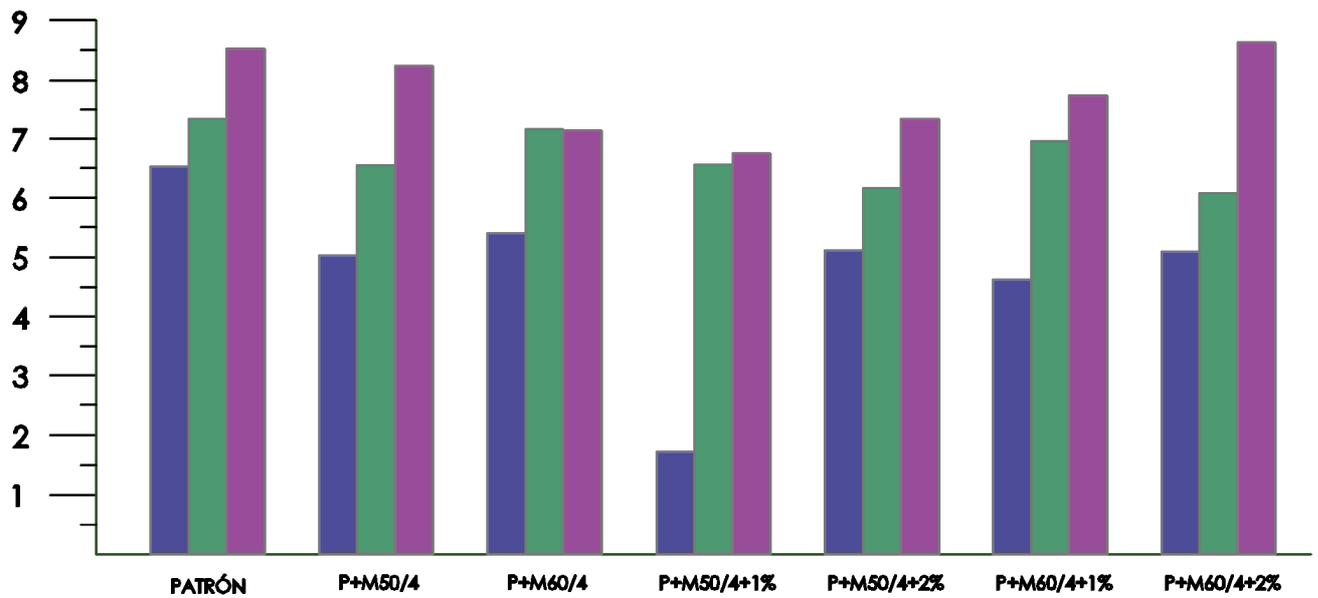
Tabla 6.2 Resistencia a compresión (MPa)

FLEXIÓN

7 DÍAS

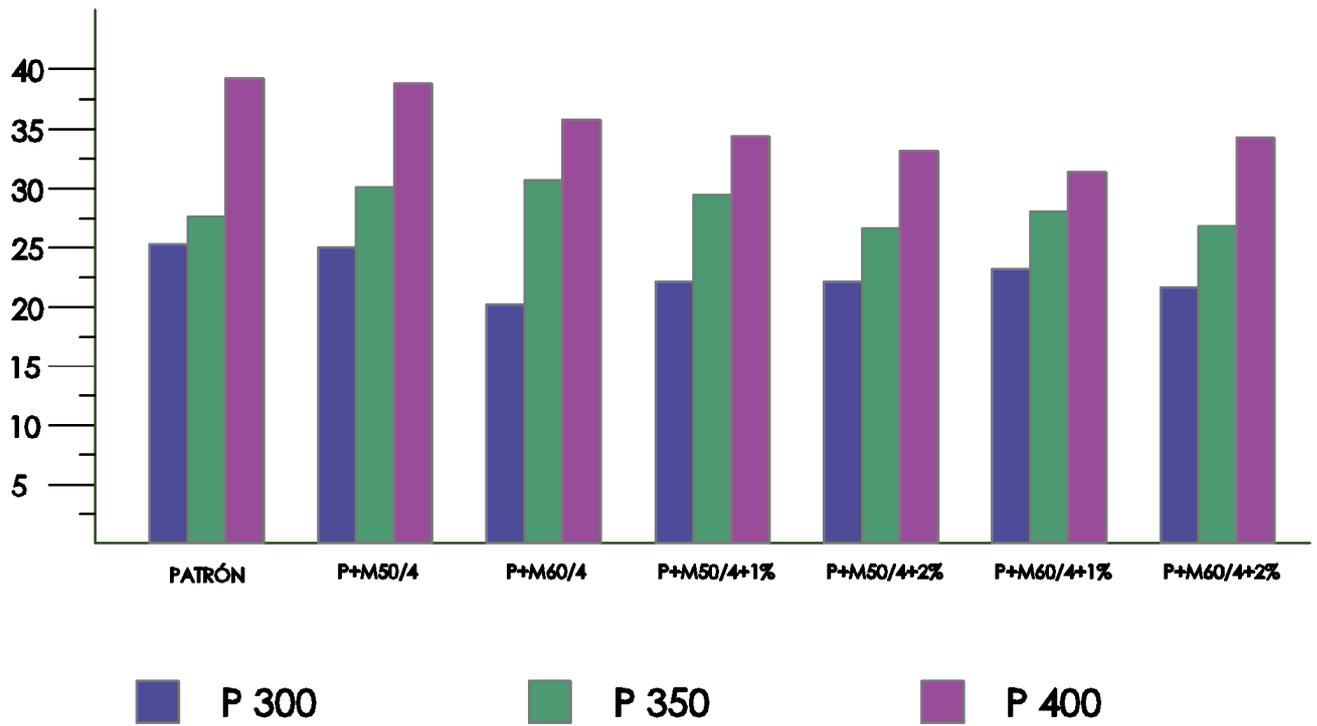


28 DÍAS

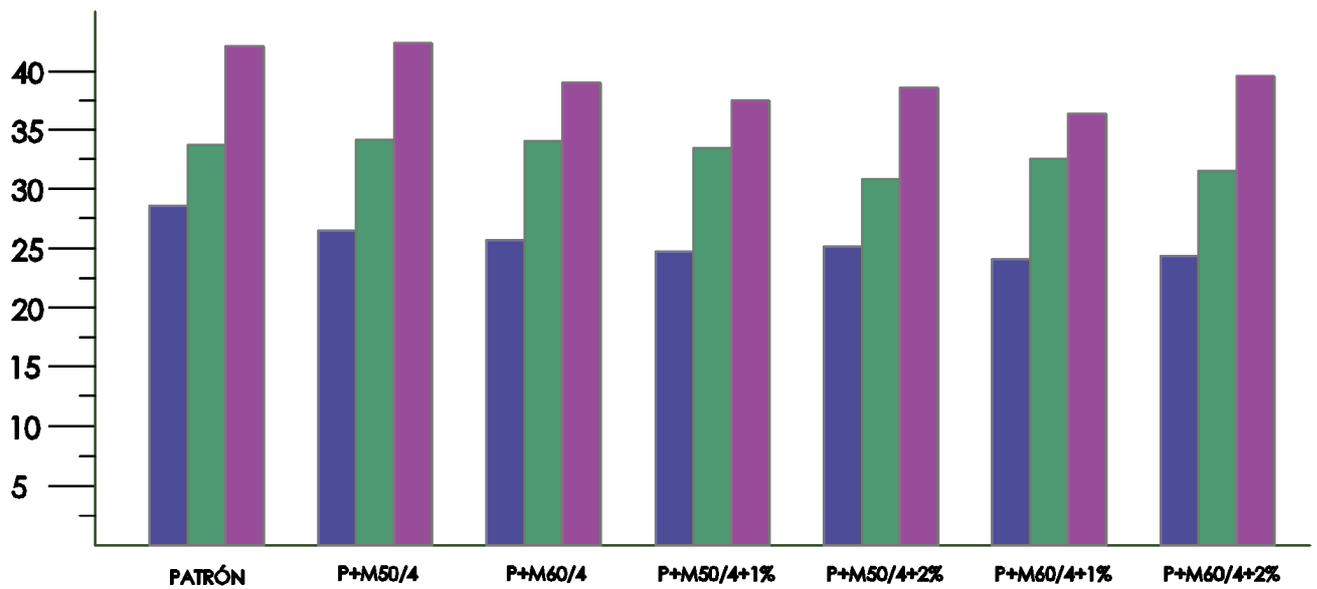


COMPRESIÓN

7 DÍAS



28 DÍAS



7_ CONCLUSIONES

Tras haber analizado la reacción mecánica del micro hormigón autocompactante una vez introducido promotor de adherencia y diferentes tipos de fibras, comprobando el aumento de resistencia y comparándolo con el mismo hormigón de idéntica dosificación pero sin la incorporación de dichos materiales, llegamos a la conclusión de que no hemos alcanzado los resultados previstos.

Al analizar los resultados de los patrones utilizados, observamos que a mayor cantidad de cemento, la tensión admisible es mayor; pero al comparar dichos patrones tras la introducción de los dos diferentes tipos de fibras utilizados (sin promotor de adherencia), observamos que no se encuentran diferencias destacables.

El promotor de adherencia se ha intuido en nuestros resultados, de manera leve, llegando a obtener caídas de tensión inferiores en algunas de las dosificaciones en las que estaba presente.

Así mismo, observando los resultados obtenidos en cada una de las amasadas, llegamos a la conclusión de que dicho promotor, no es efectivo con estas cantidades de fibras; puesto que llegamos a encontrar mayores tensiones admisibles en las amasadas patrón que en las amasadas aditivadas.

Las fibras deben otorgar al hormigón cierta ductilidad, evitando así la rotura frágil del mismo.

Hemos observado como un hormigón sin fibras, cuando alcanza el punto máximo de su tensión admisible, rompe frágilmente. A diferencia de éste, el hormigón con fibras, al alcanzar su tensión máxima admisible, no rompe frágilmente.

En algunas de las dosificaciones, es levemente más visible que en otras, pero en ninguno de los casos se alcanza la "curva modelo" de comportamiento teórico nombrada anteriormente.

Analizado lo anteriormente dicho, finalizamos afirmando que no se han conseguido los resultados esperados.

8_ BIBLIOGRAFÍA

8.1_ REFERENCIAS

- "Hormigón de Alta Resistencia y Hormigón Autocompactante". (L. AguilóFité. 2009) **[1]**
- "Self-Compacting Concrete". (A. Skarendahl y O. Petersson. 2000) **[2]**
- "Hormigón Autocompactante." (BASF) **[3]**
- "Piel de hormigón. Aspectos técnicos y estéticos del Hormigón Autocompactante". (S. García-GascoLominchar, V. Mas Llorens, E. Sáez-Bravo Picón. 2009) **[4]**
- "Nuevos hormigones en la EHE-07" (ItalcementGroup, FYM) **[5]**
- "Hormigones reforzados con fibras". (E. Torroja. 2007) **[6]**
- "La inclusi3 de fibrescomreforç del formig3." (A. Aguado. 2010) **[7]**
- "Hormigones Reforzados con Fibras". (Departamento de Construcciones Arquitect3nicas ETS de arquitectura de Sevilla) **[8]**
- "High- Performance Hybrid- Fibre Concrete". (I. Markovic. 2006) **[9]**
- "Hormig3n estructural. Hormig3n con fibras". (A. Aguado. 2009) **[10]**
- "Dosificaci3n, propiedades y durabilidad en Hormigones Autocompactantes para edificaci3n". (E. Bermejo Nuñez. 2009) **[11]**
- "Estudio de la sensibilidad e influencia de la composici3n en las propiedades reol3gicas y mecánicas de los Hormigones Autocompactantes". (V. JonhsonWilkerRigueira. 2007) **[12]**
- "Monografía nº 13. Hormig3n autocompactante: Diseño y aplicaci3n." (ACHE. 2008) **[13]**
- "Specification and guidelines for self-compacting concrete" (EFNARC. 2002) **[14]**
- "Hormig3n Autocompactante. Criterio para su utilizaci3n". (M. Bur3n Maestro, J. Fernánde3 Gómez, L. Garrido Romero. 2006) **[15]**
- "Hormig3n con la incorporaci3n de fibras." (F. Rodriguez L3pez, D. Prado P3rez. 1984)
- "Criterios de diseño para hormigones autocompactantes." (A. C. P de los Santos, A. Aguado, L. Aguil3, T. Garc3a)

- "Hormigón con fibras de polipropileno". (Grupo de hormigón G.Palma.R)
- "Construcciones con Hormigón Autocompactante y Hormigón de Alta Resistencia". (G. Sánchez Álvarez, BASF. 2009)
- "Visión y experiencias desde el sector de los fabricantes de aditivos". (C. Jofré, IECA. 2006).
- "Propiedades del hormigón". (J. R. Albiol Ibáñez)
- "Análisis de la evolución de las propiedades del Hormigón Autocompactante con la temperatura". (A. Santamaría Gomes. 2003)
- "Uso del Hormigón Autocompactante en el proyecto Ralco". (L. Uribe .C)

8.2_ NORMATIVA

- Instrucción EHE 08 **[16]**
- Anejo 14. EHE 08. Hormigón con fibras.
- Anejo 17. EHE 08. Hormigón Autocompactante. **[17]**
- UNE_ 83361. HAC. Caracterización de la fluidez. Ensayo del Ecurrimiento. 2007
- UNE_ 83362. HAC. Caracterización de la fluidez y presencia de barras. Ensayo del Ecurrimiento con el Anillo Japonés. 2007
- UNE_ 83363. HAC. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Método Caja L. 2007
- UNE_ 83364. HAC. Determinación del tiempo de flujo. Ensayo Embudo V. 2007
- UNE_ EN 14889-1. Fibras para hormigón. Parte 1. Fibras de acero. 2008
- UNE_ EN 14889-2. Fibras para el hormigón. Parte 2. Fibras poliméricas. 2008
- UNE_ EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a compresión de la probeta. 2003
- UNE_ EN 12390-5. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5. Resistencia a flexión de las probetas. 2001 **[18]**

