

Guía práctica para la utilización del hormigón autocompactante

Mejora las condiciones medioambientales ...



Reduce el coste global de la obra ...

Ahorra el consumo de energía ...

Prof. Dr. Jaime Fernández Gómez

Catedrático de Edificación y Prefabricación de la UPM

Prof. Dr. Manuel Burón Maestro

Director de Tecnología y Normativa del Hormigón de IECA

 **IECA**
INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO
Y SUS APLICACIONES



**Guía práctica
para la utilización
del hormigón
autocompactante**



**Reduce el coste
global de la
obra**



RESUMEN

Los principales aspectos específicos, diferentes de los conocidos en el uso del hormigón convencional, para la utilización del hormigón autocompactante y las ventajas que se obtienen de la misma se resumen como sigue:

Proyecto

Se puede realizar el Proyecto como si de un hormigón normal se tratara, ya que los parámetros necesarios para el proyecto no difieren en gran parte de los correspondientes a los hormigones normales.

En el caso de estructuras especiales, como las evolutivas, en las que sea relevante el control de las deformaciones, conviene determinar el módulo de deformación mediante ensayos característicos.

Ejecución

- Gran facilidad de colocación lo que permite que el hormigón alcance lugares de difícil acceso y rellene completamente secciones con elevada densidad de armaduras.

- Conviene considerar que la presión sobre los encofrados se ajusta a una ley de tipo hidrostático con un líquido de densidad 24 kN/m^3 .

- Es adecuado para la colocación mediante bombeo.

- Elimina los medios de compactación y, por tanto, el elevado nivel de ruido que genera la vibración mejorando así las condiciones de Seguridad y Salud en la obra, que también mejoran al eliminarse la compactación mediante la ejecución de la actividad necesaria para efectuar la vibración interna del hormigón, actividad poco ergonómica.

- Mejora las condiciones medioambientales en el entorno de la obra.

- Ahorra el coste de los equipos de compactación, así como el de mantenimiento, conservación y lista de repuestos.

- Ahorra el consumo de energía, generalmente eléctrica, consumida por los equipos de compactación.

- Mejora la calidad de acabado de las superficies vistas, aumentando su uniformidad.

- Conviene prestar atención al procedimiento de curado a emplear, que es el mismo que se seguiría de utilizarse hormigón convencional.

- Acorta los plazos de ejecución.

- Aumenta la productividad.

- Aumenta las puestas de encofrado.

- Reduce el coste global de la obra.

PRÓLOGO

Dadas las ventajas de todo tipo que el Hormigón Autocompactante aporta a las ya conocidas en el caso del hormigón convencional, una definición sencilla y funcionalmente correcta del mismo es: Aquel hormigón que manteniendo todas las características resistentes y de durabilidad del hormigón convencional, añade a las mismas la característica específica de autocompactabilidad.

Habida cuenta que la autocompactabilidad ofrece ventajas en aspectos fundamentales tales como: las mejores condiciones de trabajo en términos de Seguridad y Salud en la obra, la mayor calidad final al simplificarse el proceso de puesta en obra del hormigón y la mayor productividad y competitividad, resultado de la reducción de los costes globales de ejecución y del tiempo empleado en la colocación del hormigón, el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) ha considerado de gran interés la edición de una “Guía para la utilización del Hormigón Autocompactante” que difunda los conocimientos precisos para que se puedan aprovechar estas ventajas en las obras de hormigón, especialmente en aquellas de hormigón estructural.

A tal fin esta “Guía” incluye un resumen de la situación actual del conocimiento para abordar de modo directo y eficaz, tanto en la fase de Proyecto como en la de Ejecución, la utilización del Hormigón Autocompactante.

Madrid, mayo 2005

Jaime Fernández Gómez y Manuel Burón Maestro

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	9
2.	DEFINICIÓN DE HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE	11
3.	MATERIALES COMPONENTES	13
4.	DOSIFICACIÓN	17
5.	FABRICACIÓN Y AMASADO	19
6.	TRANSPORTE, PUESTA EN OBRA, ACABADO Y CURADO ..	21
7.	ENCOFRADOS	23
8.	PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO	25
8.1.	Ensayo de extensión de flujo	26
8.2.	Determinación del tiempo de flujo. Ensayo del embudo en “V”	27
8.3.	Ensayo de la caja en “L”	28
8.4.	Ensayo del anillo japonés	30
8.5.	Ensayo del índice visual de estabilidad	31
9.	PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO	33
9.1.	Resistencias mecánicas	33
9.2.	Módulo de deformación	34
9.3.	Retracción	35
9.4.	Fluencia	35
9.5.	Durabilidad	36
9.6.	Resistencia al fuego	36
10.	CONTROL DE CALIDAD	37
11.	ESPECIFICACIONES DE PROYECTO	41
	BIBLIOGRAFÍA	45

1

INTRODUCCIÓN

Desde los años 70, y debido a la aparición de aditivos fluidificantes y superfluidificantes de altas prestaciones, se han utilizado hormigones de elevada consistencia sin necesidad de añadir una gran cantidad de agua, que ya de por sí podían colocarse en obra con mayor facilidad.

El empleo de un hormigón que pudiera ser colocado sin utilizar ningún tipo de medios de compactación, y que simplemente por gravedad llenase los moldes de las piezas sin sufrir defectos de hormigonado ni segregación, nació con los trabajos del Prof. Okamura en Japón, que a partir de 1983 desarrolló esta línea de investigación, consiguiendo en 1988 un prototipo de hormigón colocable en obra sin utilizar medidas de compactación.



Además resultaba, en cuanto a propiedades del hormigón endurecido, semejante a los hormigones habituales compactados mediante vibrado.

Las características que debe reunir este hormigón son las siguientes:

- Capacidad de llenado bajo la acción de su peso propio, llenando completamente los moldes, o encofrados.
- Facilidad de paso, para atravesar los obstáculos que se encuentra en su camino, en especial las armaduras, sin segregación (sangrado de la lechada o bloqueo del árido) ni creación de nidos de árido grueso.

- Estabilidad para mantenerse homogéneo y sin segregación durante el transporte y la colocación.

Sus ventajas son muy grandes. Elimina la necesidad de medios de compactación, lo cual se traduce en un ahorro de tiempo, medios, y en definitiva esfuerzo económico en la puesta en obra. Reduce los inconvenientes del vibrado –equipos eléctricos, ruidos, actividad poco ergonómica– aumentando la calidad y la seguridad y salud en el trabajo.



El acabado superficial que produce es muy difícil de igualar con hormigones de colocación convencional, ya que se elimina la heterogeneidad que produce el vibrado.

Es de esperar que el conjunto de estas ventajas provoque una fuerte utilización de este producto en los próximos años. Actualmente es muy utilizado en el campo de la prefabricación, pues todas las ventajas mencionadas, en comparación con su precio más elevado, son apreciadas positivamente, produciendo un balance satisfactorio, y ya empieza a utilizarse en obras “in situ” con análogos resultados.



2

DEFINICIÓN DE HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

Se define como hormigón autocompactante aquel hormigón diseñado de forma especial para que posea una consistencia muy fluida, capaz de llenar los moldes y encofrados por gravedad, sin ayuda de medios de compactación externos. Debe mantenerse homogéneo y estable tanto en el transporte como en la puesta en obra, no produciendo segregaciones y siendo capaz de atravesar los obstáculos que constituyen las armaduras. Tal consistencia presenta cierta viscosidad que diferencia este hormigón del hormigón convencional de “consistencia fluida”.

En determinados tratados, al hormigón autocompactante utilizado en elementos superficiales sin grandes problemas de hormigonado y densidad de armaduras (soleras, losas poco armadas, etc.) se le suele denominar autonivelante.





3

MATERIALES COMPONENTES

Los materiales componentes del hormigón autocompactante son los habitualmente empleados en los hormigones vibrados, pudiendo señalarse al respecto lo siguiente:

Cemento

Pueden utilizarse los mismos cementos que para los hormigones estructurales normales, siendo idénticas las prescripciones referentes a la durabilidad y a los usos adecuados.

Áridos

Las especificaciones físico-químicas de los áridos son idénticas a las de los hormigones normales. Únicamente hay que ser más estricto en las exigencias del tamaño máximo del árido, para favorecer el paso del hormigón por todas las zonas de la pieza a hormigonar. Estas exigencias mayores se traducen en la recomendación de que el tamaño máximo de la grava sea inferior a:

- $2/3$ de la separación entre barras, grupos de barras o vainas de pretensado.
- $3/4$ del recubrimiento mínimo.

En la práctica esto implica no utilizar tamaños máximos superiores a 20 mm, siendo habituales los tamaños comprendidos entre 12 y 16 mm. Las normas de ensayo para identificar este material limitan el tamaño máximo del mismo a 25 mm.

También hay que tener en cuenta que estos hormigones necesitan la adición de finos. Normalmente el árido que pasa por el tamiz 0,125 mm se considera como un aporte adicional de filler a efectos de establecer la dosificación. El módulo de finura de la arena no debe tener variaciones superiores a $\pm 0,20$ para garantizar la estabilidad de las propiedades en la producción.

Normalmente hay que considerar como filler el material que pasa por el tamiz 0,125 mm y, por lo tanto, hay que tener en cuenta los finos de la arena, siempre que sean adecuados y de buena naturaleza. En cualquier caso es conveniente que el 70 % del filler pase por el tamiz 0,063 mm.

Se obtienen buenos resultados utilizando, cuando sea necesario, filler como árido de corrección para completar la cantidad de finos necesaria para el hormigón autocompactante. La cantidad de árido que pasa por el tamiz de 0,063 mm puede alcanzar 250 kg por cada metro cúbico de este tipo de hormigón. Cuando el cemento utilizado contenga adición inerte de tipo calizo es conveniente computar la cantidad de esta adición en la cifra anterior.

Pueden utilizarse áridos ligeros, teniendo en cuenta las prescripciones generales que afectan a éstos y lo anteriormente expuesto.

Agua

No requiere comentarios adicionales y valen las prescripciones generales establecidas para hormigón estructural.

Aditivos

Es obligatorio utilizar aditivos superfluidificantes de última generación (de cadena larga) y, en general, en concentraciones superiores a las habitualmente recomendadas. Pueden incorporarse otros aditivos para modificar la viscosidad, incorporadores de aire ocluido, retardadores de fraguado, etc.

Los aditivos modificadores de la viscosidad (moduladores) son productos que añadidos al hormigón mejoran la cohesión de la masa en estado fresco, impidiendo la segregación y limitando la pérdida de agua por exudación, lo que permite disminuir los efectos negativos de falta de uniformidad en la dosificación de la cantidad de agua y de la granulometría de los áridos. Aunque su empleo en estos hormigones no es imprescindible, utilizados de forma conjunta con los superfluidificantes de última generación (englobados en la normativa actual dentro de los superplastificantes) permiten obtener hormigones autocompactantes estables y de gran fluidez.

En cualquier caso deberán hacerse los ensayos previos antes del empleo del hormigón, para verificar la compatibilidad entre aditivos y, en especial, entre éstos y el cemento.

La dosificación de aditivos se realiza probando la viscosidad de la pasta en el cono de Marsh, de acuerdo con lo que veremos más adelante.

Adiciones

En estos hormigones hay que utilizar adiciones que tengan efecto filler, en cantidades suficientes para dar cohesión a la mezcla y evitar la segregación del árido grueso.

Las adiciones a utilizar (cenizas volantes y humo de sílice) son las mismas que las empleadas en el hormigón convencional. Su utilización esta sujeta a las mismas condiciones que se establecen para el hormigón convencional, es decir: utilizarlas junto con un cemento tipo CEM I y en las cantidades reglamentadas por la Instrucción de Hormigón Estructural EHE.





4

DOSIFICACIÓN

La dosificación de los hormigones autocompactantes sigue un procedimiento diferente al de los hormigones convencionales, y requiere prestar mucha atención a las propiedades del hormigón fresco. Hay que considerar, básicamente, los aspectos siguientes:

- Elegir el tipo y cantidad de cemento en función de las condiciones de durabilidad de la obra y de la posible interacción con los aditivos y adiciones.
- Fijar una relación A/C primaria en función de las condiciones de durabilidad y de la resistencia deseada, aunque este dato es sólo orientador y deberá ser fijado experimentalmente.
- Estudiar la composición de la pasta (cemento + filler + adiciones + agua). En esta fase hay que realizar ensayos específicos para la determinación de la fluidez de la pasta, mediante el cono de Marsh u otros, y para asegurar una adecuada viscosidad. Para ello se tantean distintas relaciones agua/(cemento + filler + adiciones), variando entre 1,0 y 1,5 en volumen, hasta determinar la idónea.
- Estudiar la cantidad de superplastificante, realizando el ensayo anterior o el ensayo del cono en "V", con valores de la relación agua/(cemento + filler + adiciones) entre el 70 % y el 90 % del determinado anteriormente y variando la dosificación de superplastificante.
- Fijado el contenido de aire ocluido (alrededor del 2 % salvo exigencias de resistencia a la helada), el contenido de cemento y el de pasta, se define el volumen de árido, debiendo estar el árido grueso comprendido entre el 50 % y el 60 % del total (árido grueso + arena). La arena debe mantenerse entre el 40 % y el 50 % de dicho total, tomando como arena la fracción comprendida entre los 4 mm y los 0,125 mm.

- Definida la composición, deben hacerse pruebas finales con el hormigón, de tal forma que se obtengan las propiedades de hormigón fresco y hormigón endurecido deseadas. Puede modificarse en esta fase el contenido de aditivo superplastificante o incorporar un aditivo modulador de la viscosidad, para llegar al fin deseado.

Como orden de magnitud, en la siguiente tabla puede verse el rango típico de los constituyentes del hormigón autocompactante por metro cúbico de hormigón.

MATERIAL	PESO (kg/m ³)
POLVO (Cemento+ filler + adiciones)	380 – 600
PASTA (Cemento+ filler + adiciones + agua)	530 – 810
AGUA	150 – 210
ÁRIDO GRUESO	650 – 900
ARENA	(*)
RELACIÓN AGUA/POLVO (Volumen)	0,95 – 1,05

(*) Para ajustar la dosificación. Normalmente supone del 48 al 55 % del peso total del árido grueso más la arena.



5

FABRICACIÓN Y AMASADO

Para la fabricación y el amasado de los hormigones autocompactantes no es preciso seguir reglas especiales, siendo válidos los mismos equipos y medios que se utilizan en los hormigones normales. Únicamente hay que señalar que el hormigón autocompactante es más exigente en cuanto a la uniformidad de las materias primas y a las variaciones de dosificación, por lo cual es necesario cuidar especialmente el almacenamiento de materias primas, contenido de agua de los áridos, y mantener la planta bajo supervisión y calibración, mediante un programa de control de calidad eficaz.

El amasado puede requerir mayor tiempo del habitual, debido al alto contenido en pasta de las mezclas. Debido precisamente a la gran cohesión que experimentan estas mezclas, se pueden formar grupos o "bolas" de áridos segregados, que no es fácil dispersar en el resto de la masa. Es más conveniente amasar la mezcla menos fluidificada, y una vez esté homogéneamente mezclada añadir el resto del agua y el aditivo. En caso de utilizar aditivos incorporadores de aire ocluido deben añadirse en la primera carga y amasado.

En cualquier caso, la adición del aditivo o de los aditivos, deberá realizarse siguiendo las indicaciones del fabricante, y en función de las condiciones de transporte a obra, pudiendo ser conveniente el añadir el aditivo ya en obra.

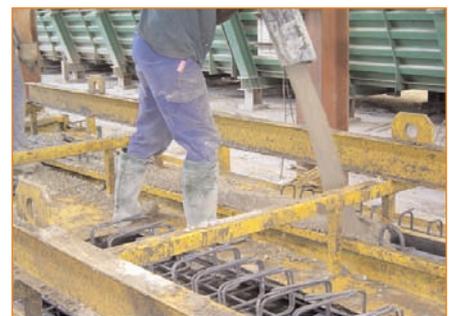
Se obtiene una mezcla mejor si se amasa el hormigón en una amasadora fija de eje forzado, y posteriormente se carga en camiones, que cuando se amasa directamente en camión.

Si se amasa en camión, es conveniente guardar algunas precauciones para obtener una mezcla más homogénea:

- Introducir dos tercios de agua, los áridos y el cemento, y mezclar completamente.
- Una vez se obtenga una mezcla uniforme, añadir el resto del agua y los aditivos, ajustando la consistencia final y amasando completamente.

- Si es necesario, realizar la carga en dos o más amasadas independientes.

Todos los días deben realizarse ensayos sobre el hormigón fresco para ajustar la cantidad de agua y los aditivos.



6

TRANSPORTE, PUESTA EN OBRA, ACABADO Y CURADO

Los medios de transporte para el hormigón autocompactante no difieren de los utilizados para los hormigones normales, siendo válidos los mismos métodos de transporte y en especial el bombeo.

La puesta en obra mediante bombeo es una técnica recomendable para este tipo de hormigones, debido a su propiedad autocompactante, que les permite fluir perfectamente por la tubería y evitar la mayor parte del problema del bombeo de los hormigones normales.

Asimismo, y dado que deben ponerse en obra de la forma más continua posible, el bombeo garantiza la colocación en el lugar correcto por gravedad sin necesidad de grandes desplazamientos.

En principio, y para los transportes por camión, los tiempos máximos de transporte recomendados por la normativa son aplicables, aunque debido al empleo de aditivos conviene recordar que las condiciones y valores de los ensayos sobre hormigón fresco se deben de cumplir en el momento de la descarga, y por lo tanto se puede contemplar la incorporación de parte del agua y los aditivos en la propia obra si ello fuera necesario, siempre bajo el control del fabricante del hormigón autocompactante.

En el caso de utilizar como medio de transporte y puesta en obra el bombeo, conviene realizar la colocación desde la parte más baja del encofrado. En el caso de hormigonados por caída libre se debe limitar la altura máxima de vertido a 5 m, descargándolo de la forma más continua posible y empezando desde el centro del molde o encofrado. Debe moverse el punto de descarga para que el hormigón no tenga que desplazarse más de 10 m en horizontal dentro del molde, dado que la capacidad autocompactante no es ilimitada y los múltiples obstáculos que va encontrándose en el camino van dificultando su puesta en obra.

Es mejor el comienzo del vertido desde el centro del molde o encofrado e ir moviéndose hacia los extremos, que el utilizar varios flujos de descarga que pue-

den crear zonas de llenado insuficiente, utilizando un único chorro de descarga.

El hormigón debe de colocarse simplemente por caída libre y gravedad, con la ayuda de tubos tremi u otros dispositivos semejantes a los del hormigón normal, y sin la utilización de vibrado para conseguir la compactación correcta, cuyo empleo puede ser incluso perjudicial en estos hormigones.

Los acabados superficiales de paramentos conseguidos con hormigones auto-compactantes son muy buenos, pero el encofrado tiene una influencia notable en ello. Desde este punto de vista, y como se comentará más adelante, es necesario cuidar las juntas del encofrado y las posibles cejas o discontinuidades de planeidad, dado que al llenar perfectamente todos los espacios, las irregularidades del encofrado se transmitirán a la superficie del paramento.

Los sistemas de acabado superficiales son iguales que en los hormigones convencionales, aunque en casi todos los casos de hormigonado de elementos horizontales es necesario utilizar fratasado o tampeado de la superficie, debido a la subida del aire ocluido que origina un burbujeo superficial que necesita repaso instantáneo. Simplemente por tampeado o fratasado se consigue una superficie adecuada.

Para elementos superficiales que requieran pulido u otros tratamientos, los tiempos de espera para la aplicación son semejantes a los de los hormigones normales.

En cuanto al curado, son aplicables también todas las reglas generales de los hormigones convencionales. Únicamente, y como precaución especial, hay que ser en principio más cuidadoso a las primeras edades, para evitar la retracción plástica y el asentamiento al que pueden tender las masas frescas de hormigones autocompactantes.

Para ello se debe empezar con el curado inicial tan pronto como sea posible, después de la colocación y terminación de la superficie, de tal forma que se eviten estos fenómenos. En cuanto a los tiempos de aplicación de los periodos de curado son válidas las reglas generales manejadas para los hormigones convencionales.

7

ENCOFRADOS

Los encofrados y moldes utilizados para el hormigón autocompactante requieren alguna particularidad especial debido a las características de éste. El hormigón autocompactante no aumenta las pérdidas de lechada en las juntas de encofrado, si bien es deseable asegurar una buena estanqueidad del mismo como en el caso de utilizar hormigón convencional.

En primer lugar, hay que señalar que debido a la fluidez y cohesión de los hormigones autocompactantes, y a su forma de colocación de abajo hacia arriba en muchos casos, los estudios que existen hasta la fecha recomiendan que se adopten para el cálculo unas presiones laterales sobre los encofrados equivalentes a las presiones hidrostáticas, las cuales son muy superiores a las utilizadas habitualmente.

Por otra parte, al no existir vibración, se reducen los efectos de este sistema de puesta en obra en la presión sobre los encofrados, aunque no se llega a compensar el efecto de la mayor presión debido a la fluidez.

Lógicamente todos los elementos de arriostramiento del encofrado deben de estar calculados para resistir estas presiones (hidrostática con $\gamma = 24 \text{ KN/m}^3$), y también debe de tenerse en cuenta la propia rigidez del encofrado o molde, que deberá de ser suficiente para no tener deformaciones que dejen a la pieza fuera de tolerancias.

Debido al mejor acabado superficial de estos hormigones, conviene que la superficie del encofrado en contacto con el hormigón, normalmente conocida como piel, tenga una planeidad y un acabado adecuado, dado que de otra forma transmitirá los defectos a la superficie del hormigón.

Normalmente la piel del encofrado utilizada con los hormigones autocompactantes suele ser de acero o de superficies plastificadas no absorbentes, con las cuales se obtienen unas texturas superficiales muy uniformes de color, y en el caso de estos hormigones con muy pocas burbujas.

Conviene cuidar la cantidad de desencofrante aplicado, pues en estos casos un exceso del mismo puede retener las burbujas de aire y crear imperfecciones en la superficie. Una aplicación normal puede implicar del orden de 10 g/m² de superficie de encofrado en el caso de superficie de acero. También debe de cuidarse el tipo de desencofrante, pues algunas ceras son demasiado viscosas para permitir la salida del aire entre el encofrado y el hormigón, y pueden crear también defectos superficiales.

Cuando se requiere cuidar especialmente la superficie del hormigón conviene tener en cuenta lo siguiente:

- En encofrados de madera sin revestir, conviene evitar la madera seca o completamente nueva, la cual tiene una gran absorción y puede crear defectos superficiales. La madera nueva debe de tratarse con agentes sellantes, y a medida que va teniendo más usos debe de limitarse la cantidad de desencofrante utilizado.
- En el caso de materiales sintéticos no absorbentes es importante elegir bien el desencofrante para evitar los efectos anteriormente señalados. En cualquier caso se recomienda realizar alguna prueba.



8

PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO

Las propiedades de los hormigones autocompactantes en estado fresco suelen medirse por una serie de ensayos que tratan de identificar la autocompactabilidad del hormigón, teniendo en cuenta tanto su capacidad para llenar los espacios del encofrado como para pasar a través de obstáculos sin perder su homogeneidad ni crear obstrucciones.

Los ensayos convencionales no sirven para determinar estas propiedades, y se han desarrollado ensayos específicos, algunos de los cuales están normalizados, y que tratan de identificar y establecer el grado de autocompactabilidad.

Básicamente estos ensayos podríamos clasificarlos del modo siguiente:

a) Ensayos para la medida de las propiedades plásticas.

MÉTODO DE ENSAYO	CARACTERÍSTICA MEDIDA
CAJA EN "L"	Capacidad para el paso y resistencia a formar obstrucciones
CAJA EN "U"	Capacidad para el paso y resistencia a formar obstrucciones
ANILLO EN "J"	Capacidad para el paso y resistencia a formar obstrucciones
ENSAYO DE FLUJO T ₅₀	Resistencia a la segregación, estabilidad y asentamiento Resistencia a la migración de aire Viscosidad
ÍNDICE VISUAL DE ESTABILIDAD IVE	Resistencia a la segregación, estabilidad y asentamiento Resistencia a la migración de aire Viscosidad
EXTENSIÓN DE FLUJO	Resistencia a la segregación, estabilidad y asentamiento Resistencia a la migración de aire Viscosidad

b) Ensayos para situaciones especiales.

MÉTODO DE ENSAYO	CARACTERÍSTICA MEDIDA
ENSAYO DE ESTABILIDAD DE PANTALLA	Segregación estática Resistencia al asentamiento
ENSAYO DE BLEEDING	Resistencia a la segregación dinámica
EMBUDO EN "V"	Capacidad de paso Resistencia a formar bloqueos
ANILLO EN "J"	Segregación dinámica Capacidad de paso

A continuación se describen los ensayos más habituales.

8.1. Ensayo de extensión de flujo



Este ensayo es el más utilizado debido a la sencillez, y a utilizar el mismo cono que se utiliza para el ensayo de asiento en cono de Abrams habitual.

Se utiliza el mismo cono que el utilizado para el asiento en cono de Abrams, según la norma UNE 83313:1990, utilizando una placa para realizar el ensayo de dimensiones suficientes (mínimo 800 x 800 mm) y 2 mm de espesor, pintando circunferencias de 200 mm y 500 mm de diámetro centradas y marcadas en la superficie. Adicionalmente se necesita un cronómetro con apreciación de segundos y una cinta métrica.



Básicamente el ensayo consiste en rellenar el cono de Abrams de una sola vez centrado en la circunferencia de 200 mm de diámetro, practicando este relleno sin compactar de ninguna forma el hormigón. Se nivela el hormigón en la superficie y antes de que pasen 2 minutos se levanta verticalmente el cono de forma cuidadosa y continua (entre 2 y 3 segundos), dejando que el hormigón se extienda. Hay que determinar el tiempo que tarda el círculo de hormigón en alcanzar el círculo marcado de 500 mm de diámetro, y posteriormente se mide el diámetro del círculo final alcanzado, midiendo en dos diámetros perpendiculares y calculando la media. Con ello se obtienen dos parámetros de este ensayo, el valor T_{50} , es decir el tiempo que se tarda en alcanzar el círculo de 500 mm,



y el diámetro final del hormigón extendido, ensayo que debe repetirse si difieren los dos diámetros medidos en más de 5 cm.

De acuerdo con los resultados los hormigones se clasifican en las siguientes categorías:

CLASE	DIÁMETRO DE EXTENSIÓN DE FLUJO (mm)
SF1	550 a 650
SF2	660 a 750
SF3	760 a 850

CLASE	T ₅₀ (segundos)
VS1	≤ 2
VS2	> 2

8.2. Determinación del tiempo de flujo. Ensayo del embudo en V

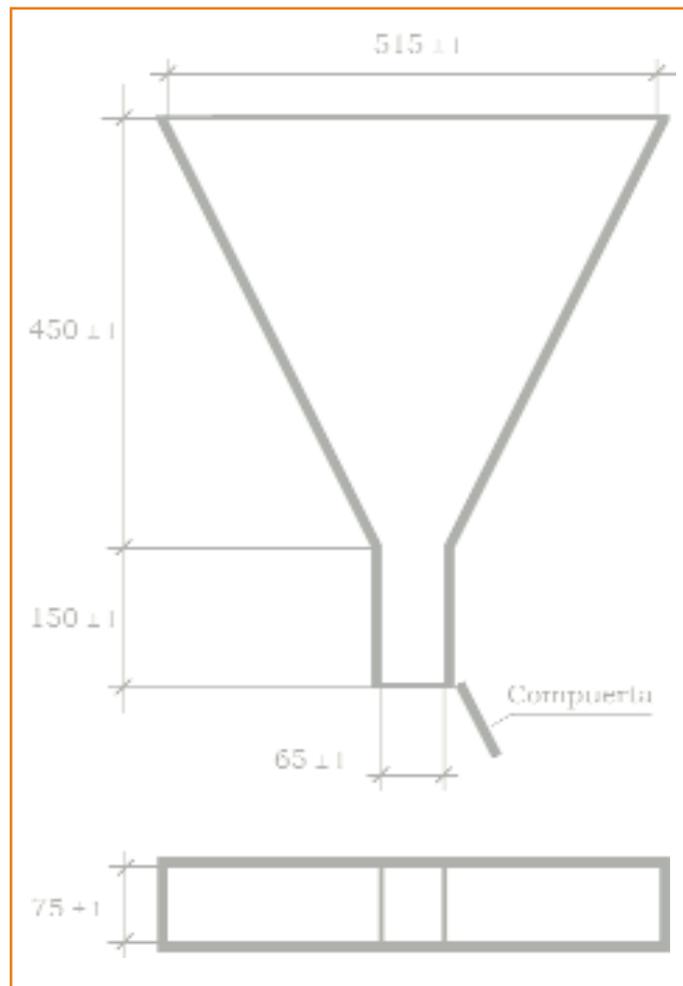
Este ensayo se realiza mediante el embudo cuyas dimensiones se recogen en el dibujo, aunque existen variantes diferentes.

Una vez cerrada la compuerta inferior, se llena de manera continua y sin ningún tipo de compactación, el embudo.

Antes de que transcurran 10 segundos se realiza la apertura de la base y se mide el tiempo que tarda el volumen total del hormigón en salir.

La toma de tiempos se realiza con un observador y un cronómetro, que observando la parte de arriba del embudo inicia la cuenta en el momento que abre la trampilla, y detiene la cuenta en el momento en que ve la luz en el fondo del cono.

Cuando sea necesario, para conocer la pérdida de autocompactabilidad en el tiempo, conviene repetir el ensayo al menos 2 veces, en intervalos de 5 minutos.





De acuerdo con este ensayo los hormigones se clasifican de la siguiente forma:

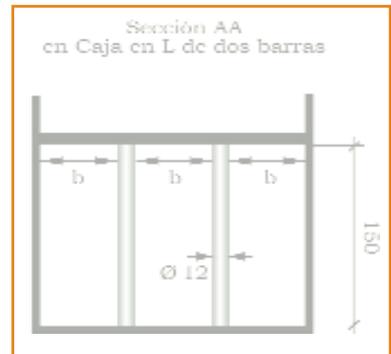
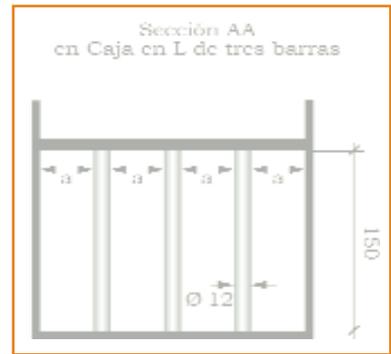
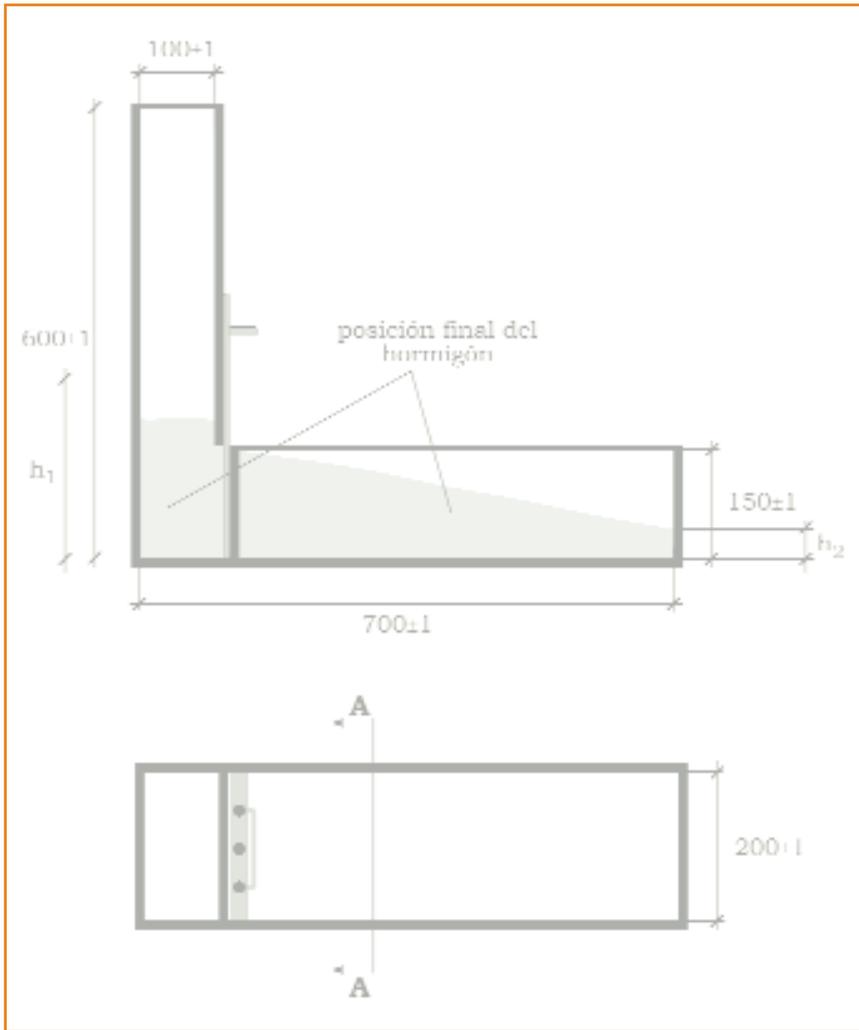
CLASE	T_{50} (segundos)
VF1	≤ 8
VF2	de 8 a 25

8.3. Ensayo de la caja en L



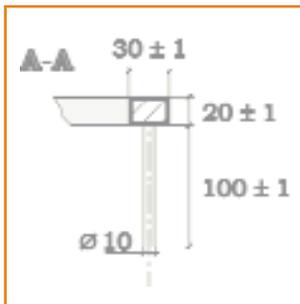
Este ensayo se realiza mediante una caja en L, tal y como se describe en las fotografías y figuras adjuntas, provista de una serie de 2 ó 3 barras y una trampilla. Hay que realizar unas marcas longitudinalmente sobre el fondo de la caja a 200 y 400 mm. El ensayo se basa en determinar el tiempo que se tarda en alcanzar estas marcas, así como las alturas h_1 y h_2 . Los tiempos t_{20} y t_{40} reflejan el grado de fluidez de la mezcla, y se recomiendan valores $t_{20} < 1,5$ segundos y $t_{40} < 2,5$ segundos. El otro parámetro determinado es el cociente h_2/h_1 , y en función de él se definen dos clases de hormigones.

CLASE	CAPACIDAD DE PASO
PA1	$\geq 0,8$ CON DOS BARRAS
PA2	$\geq 0,8$ CON TRES BARRAS



8.4. Ensayo del anillo japones

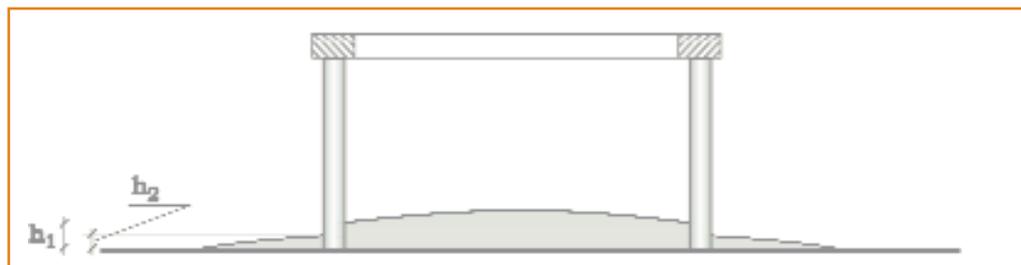
Para este ensayo se utiliza un anillo de 30 cm de diámetro y 12 cm de altura, el cual tiene unas barras perimetrales, tal y como puede verse en la figura.



Sobre la misma placa utilizada para el ensayo de extensión de flujo, en la que se ha marcado, adicionalmente, una circunferencia de 300 mm de diámetro concéntrica con las indicadas en 8.1, se coloca el cono utilizado para el asiento en cono de Abrams en el centro del anillo, en posición normal o invertida, y se rellena por simple caída. Una vez relleno se levanta y se deja salir el hormigón.



El objeto del ensayo es obtener el diámetro final de extensión, atravesando la muestra de hormigón las barras, expresado como media de dos lecturas perpendiculares. Esta medida no debe ser inferior en más de 50 mm al valor obtenido en el ensayo de extensión de flujo realizado en condiciones normales, para demostrar la capacidad para pasar entre las armaduras sin que se produzca bloqueo. Hay que medir también las alturas del hormigón en los extremos interiores y exteriores del anillo, tal y como se indica en la figura, en dos



puntos pertenecientes, cada uno de ellos, a uno de los diámetros que se miden para obtener el diámetro final de extensión. El promedio de ambas determinaciones establece el valor de h_1 y h_2 . Se obtiene un índice del ensayo en anillo igual a $(h_1 - h_2)$. Se considera que la capacidad de paso del hormigón es aceptable si $(h_1 - h_2)$ está entre 10 mm y 15 mm, pobre si es mayor que 15 mm y buena para valores inferiores a 10 mm.



8.5. Ensayo del índice visual de estabilidad

Este ensayo se realiza después de efectuado el ensayo de extensión de flujo, y es un valor cuantitativo/cualitativo de mucha utilidad y que califica el grado de retención de la mezcla a la exudación de la pasta y lechada.

Así, se clasifican los hormigones en función del índice de estabilidad visual IEV de la siguiente forma:

- Un índice menor o igual a 0 indica que no hay segregación ni lechada bordeando el hormigón en el resultado final del ensayo de extensión de flujo.
- Un índice de 0,5 indica que no hay mortero desprendido de la pasta, pero que hay una pequeña evidencia de segregación o de burbujas de aire en la superficie.
- Un índice de 1 indica que no hay segregación en la masa de hormigón, pero que existen evidencias de pequeño asentamiento o de burbujas de aire.
- Un índice de 1,5 indica que ya empieza a aparecer una pequeña banda de mortero alrededor de la masa de hormigón.



- Un índice de 2 indica que esta banda de mortero puede llegar a estar en el orden de 10 mm.
- Un índice de 3 indica una evidencia de segregación y la banda de mortero alrededor de la masa total del hormigón puede superar los 10 mm.

A pesar del aspecto cualitativo del ensayo, se suele manejar como una evidencia para definir el límite de los hormigones autocompactantes. Normalmente un hormigón que tuviese un índice superior a 3 no sería considerado autocompactante, y estando entre 2 y 3 requeriría ajustes en la dosificación. Por ello, es necesario que en este ensayo se obtengan valores del índice IEV iguales o inferiores a 1,5.



9

PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

Los hormigones habituales quedan definidos en la normativa, fundamentalmente, por su resistencia a compresión, aunque para determinar algunas de sus propiedades también se suele hacer referencia a otros parámetros, tales como la cantidad de cemento y la relación agua/cemento.

En especial, los hormigones autocompactantes pueden ser, y en el futuro lo serán, normalizados de una forma homogénea con los hormigones de compactación tradicional, de tal forma que las fórmulas que definen las correspondientes propiedades del hormigón endurecido, necesarias para proyectar, sean homogéneas y no se requieran modelos de comportamiento diferenciados.

A continuación vamos a analizar las más importantes de estas propiedades al objeto de realizar una comparación cuantitativa con las determinadas para hormigones convencionales.

9.1. Resistencias mecánicas

Las dispersiones obtenidas en la fabricación de los hormigones autocompactantes, con los datos disponibles hasta el momento, permite establecer que su producción puede ser semejante a los hormigones convencionales con fabricación cuidadosa, y por lo tanto son aplicables todas las fórmulas de paso que relacionan la resistencia característica y la resistencia media.

Tanto para ensayos en laboratorio como para planificación de ensayos característicos, pueden aplicarse las mismas fórmulas de relación entre ambos parámetros, habida cuenta de que en muchos casos, también para los hormigones convencionales, dichas fórmulas pueden ser simplemente aproximaciones relativas.

Para una resistencia a compresión dada, las resistencias a tracción son semejantes a las que se obtendrían para un hormigón convencional del mismo tamaño máximo del árido.

Los ensayos realizados hasta la fecha indican un mejor comportamiento del hormigón autocompactante, con valores medios de la adherencia entre la armadura y el hormigón superiores a los que presenta el hormigón convencional y por tanto pueden utilizarse también las mismas longitudes de anclaje, tanto de armaduras pasivas como activas o de pretensado.

No obstante los hormigones de baja calidad no son adecuados para elementos pretensados debiendo emplearse, en estos casos, hormigones de elevada resistencia a compresión al igual que si de hormigón convencional se tratara.

9.2. Módulo de deformación

El módulo de deformación del hormigón es un parámetro básico para determinar las deformaciones. Generalmente, todas las fórmulas relacionan el módulo de deformación con la resistencia a compresión, con algunas correcciones que pueden depender de la densidad del hormigón y del tipo de árido utilizado.

Todas estas fórmulas son, en principio, de aplicación para los hormigones autocompactantes, aunque es necesario conocer que la aplicación de los mismos modelos, y en especial el sistema de determinación que posee la EHE, puede conducir a sobrevalorar el módulo de deformación de los hormigones autocompactantes.

El módulo de deformación del hormigón es un intermedio entre el de la pasta de cemento, que puede variar entre los 6.000 y 25.000 MPa, y el de los áridos, que puede variar entre 60.000 y 100.000 MPa. Por tanto, la cantidad de árido es muy importante en el módulo de deformación.

En un hormigón autocompactante el volumen total de áridos puede variar entre los límites del 68 % y del 57 %. Para el caso del 68 % el módulo de deformación sería comparable al de un hormigón normal de la misma resistencia, y por lo tanto valdrían las mismas fórmulas. En el caso del límite inferior, para el 57 % del volumen de árido, podrían encontrarse diferencias con respecto a un hormigón normal entre el 15 y el 30 %, de acuerdo con las investigaciones desarrolladas.

En general, y para casos intermedios, podríamos admitir que la aplicación de las fórmulas habituales sobrevalora el módulo de deformación de los hormigones autocompactantes entre un 7 y un 15 %.

Estos valores, como puede verse, no son muy importantes (la precisión de la fórmula con hormigones normales no es superior a ese rango) y pueden tenerse en cuenta en el caso en que se requiera algún ajuste en el módulo de deformación.

En principio son válidos los mismos modelos para determinar éste, habida cuenta de lo que se ha dicho anteriormente, y si en alguna obra se requiere una determinación muy precisa del módulo de deformación, por tratarse de una

obra de construcción evolutiva, se aconseja determinarlo experimentalmente, lo cual también debe hacerse en otros casos, con independencia del tipo de hormigón.

Hay que señalar que tampoco los modelos de predicción utilizados presentan una precisión general muy superior a los valores que estamos manejando.

Para casos habituales, se puede determinar de acuerdo con los criterios EHE, realizando, si se quiere, una corrección en función del volumen de árido del hormigón en los términos expuestos.

9.3. Retracción

El hormigón posee dos tipos de acortamiento por pérdida de agua, también conocido como retracción: la retracción autógena que se produce por la pérdida de agua consumida en la hidratación del cemento, la cual tiene lugar principalmente en las primeras edades, y la retracción por secado, que ocurre con la pérdida posterior de agua por evaporación, y que tiene lugar a más largo plazo.

Debido al mayor contenido de pasta, la retracción autógena es ligeramente superior a la de los hormigones convencionales. Sin embargo, al ser la retracción a largo plazo producida en gran parte por la pérdida de agua de los áridos, ésta es inferior a la de los hormigones normales, debido al menor volumen de áridos. Ambos efectos se confunden y compensan.

Existen investigaciones que no encuentran diferencias, con respecto a los modelos de cálculo, en la retracción calculada de estos hormigones y los hormigones normales, con lo cual es aplicable el mismo procedimiento. Hay que señalar que la estimación de la retracción normalmente conlleva unas consideraciones que hace que exista un grado de dispersión muy amplio para todo tipo de hormigones y, por lo tanto, no deben atribuirse los errores del modelo al diferente comportamiento de estos hormigones.

9.4. Fluencia

La fluencia se define como el incremento de deformación que sufre el hormigón cuando está sometido a una tensión constante. Las deformaciones por fluencia pueden ser varias veces la deformación ocasionada por la carga instantánea, de ahí la importancia de determinar el coeficiente de fluencia de una forma precisa.

La fluencia, lógicamente, sólo tiene lugar en la pasta de cemento y, fundamentalmente, depende de la relación agua/cemento. Cuanto mayor es la resistencia del hormigón, menor fluencia tiene. También los cementos de endurecimiento más rápido producen hormigones de menor fluencia.

Normalmente al aumentar el volumen de áridos en el hormigón, la fluencia se reduce, debido a que son un obstáculo para ésta. Dado el menor contenido en volumen de áridos en los hormigones autocompactantes, sería de esperar un mayor coeficiente de fluencia.

Sin embargo, en las investigaciones realizadas no se aprecian diferencias significativas, y en muchos casos se recomienda seguir los modelos habituales debido a que las posibles diferencias están cubiertas por la indeterminación que presentan todos estos modelos, que requieren establecer hipótesis de comportamiento muchas veces desconocidas y con gran importancia en lo que se va a determinar, como por ejemplo el estado de humedad, etc.

No parece, a la vista de las investigaciones actuales, que el comportamiento de los hormigones autocompactantes en relación con la fluencia sea diferente al de los hormigones normales, y por lo tanto procede aplicar los modelos habituales.

9.5. Durabilidad

El hormigón autocompactante presenta un interfase árido-pasta de cemento más densa que el hormigón convencional y por tanto una estructura interna más compacta y con menor red de poros abierta, lo que determina una durabilidad igual o superior a la del hormigón convencional con los mismos parámetros de durabilidad, es decir, análoga dosificación de cemento y la misma relación agua/cemento.

Asimismo el comportamiento del hormigón autocompactante frente a los ciclos de hielo-deshielo es similar al del hormigón convencional debiéndose adoptar, para alcanzar la resistencia requerida frente a dicha acción, las mismas precauciones en ambos casos.

9.6. Resistencia al fuego

El comportamiento frente al fuego del hormigón autocompactante es similar al del hormigón convencional de la misma resistencia a compresión y la misma composición, en cuanto a las adiciones y al tipo de áridos se refiere.

Si se utiliza adición de humo de sílice el comportamiento del hormigón autocompactante será similar al del hormigón de alta resistencia correspondiente, debiendo considerarse el mayor riesgo de desconchamiento explosivo del recubrimiento que presenta este material, en función de la cantidad de sílice activa adicionada.

10

CONTROL DE CALIDAD

El planteamiento del control de calidad en los hormigones autocompactantes puede seguir las mismas pautas que en los hormigones normales, dado que, y como ya se indicó anteriormente, las dispersiones que pueden obtenerse en la producción de estos hormigones son semejantes a las obtenidas en los hormigones convencionales.

Aplicando los sistemas de estimación de resistencias actuales, que tienen en cuenta las dispersiones de las plantas de hormigón, la aplicación de los criterios de control es semejante.

En cuanto al número de muestras a tomar por lote pueden seguirse los criterios de los hormigones habituales, aunque como medida de precaución, y dada la mayor responsabilidad de estos hormigones (su formulación incluye su capacidad de puesta en obra), se recomienda realizar ensayos de control de la autocompactabilidad con mayor frecuencia.

Como precauciones especiales de control pueden tomarse las siguientes:

- Dado que la dosificación de estos hormigones es muy sensible a las variaciones de los materiales componentes, es necesario incrementar el control sobre las materias primas, teniendo un mejor almacenamiento y realizando ensayos granulométricos de los áridos para mantener el suministro con pequeñas variaciones.
- Deben realizarse en todos los casos los ensayos previos y los ensayos característicos prescritos por la EHE, contemplando además de los ensayos de resistencia a compresión, ensayos sobre el hormigón fresco para definir las propiedades reológicas del mismo, tal y como se vio en el apartado nº 8.
- Al comienzo del suministro deben realizarse ensayos al menos diarios de las propiedades del hormigón fresco, hasta tener definida la dosificación

y las posibles variaciones de aditivos a las que haya que someterla en función de las humedades de los áridos y otros factores.

- Deberá medirse la humedad de todos los áridos, tanto finos como gruesos, a nivel del 0,5 % de humedad, y de tal forma que este valor sea representativo de la humedad que tengan los áridos en el momento de su incorporación en la hormigonera.

Si los medidores de humedad no producen resultados aceptables, deberán realizarse medidas de la determinación de la humedad al menos cada 4 horas, para detectar cualquier posible cambio.

En cuanto a los ensayos de control, cabe hacer las siguientes puntualizaciones:

Determinación de la resistencia a compresión. Es aplicable la normativa actual, aunque el llenado de las probetas debe hacerse de una sola vez, sin separar tongadas y sin compactación, depositando el hormigón, sobre la tolva de llenado, desde la base superior del molde.

Ensayos sobre hormigón fresco. Los ensayos de hormigón fresco se deben realizar siguiendo procedimientos normalizados. En este sentido, en España están en preparación normas UNE para realizar estos ensayos, que, esperamos, no diferirán sustancialmente de las indicaciones descritas en el apartado nº 8 de estas recomendaciones que reflejan el estado actual de la cuestión en diferentes países

Un aspecto muy importante en el caso del hormigón autocompactante es fijar un procedimiento de aceptación que defina si el producto es correcto desde el punto de vista de su suministro, que, en cualquier caso, puede requerir un acuerdo particular entre el suministrador y el receptor. Si el hormigón cumple los valores de los ensayos prescritos, se supone que es adecuado para colocar en obra sin ningún tipo de vibración o compactación.

De los ensayos sobre hormigón fresco indicados en el apartado nº 8, los que se manejan habitualmente como criterios de aceptación o rechazo son el ensayo de extensión de flujo y el índice visual de compactación, dado que los otros ensayos son adecuados para ser realizados durante los ajustes de la dosificación, y aunque puedan realizarse en determinadas ocasiones para comprobar el mantenimiento de la misma, se supone que no son ensayos rutinarios.

Para definir la intensidad de ensayos de hormigón fresco, desde el punto de vista de la recepción, se recomienda lo siguiente:

- Si en obra se están colocando hormigones convencionales y hormigones autocompactantes, debe existir un procedimiento para distinguir perfectamente ambos, y además, en la obra, se debe seguir un sistema para poder garantizar la trazabilidad y saber en qué zona se ha colocado cada uno de ellos. En este caso, no queda más remedio que realizar los ensayos de aceptación sobre todos los camiones de hormigón autocompactante.

- Si en la obra solamente se está utilizando hormigón autocompactante, no es necesario realizar los ensayos en todos los camiones, y se recomienda realizar uno al comienzo de la jornada y algún otro aislado durante el día, pudiendo ser razonable realizar un ensayo al menos cada 5 entregas. Para realizar el ensayo, y en el caso de que el hormigón se suministre mediante camión, se recomienda amasar a alta velocidad un minuto antes de proceder a la toma de muestras.
- La toma de muestras puede obtenerse de la primera descarga del camión, dado que no deben existir diferencias apreciables en la amasada que lleven a resultados de los ensayos, calificados como de incumplimiento.





11

ESPECIFICACIONES DE PROYECTO

Desde el punto de vista del proyectista, se puede realizar el Proyecto como si de un hormigón normal se tratara, ya que los parámetros necesarios para el mismo no difieren en gran parte de los correspondientes a los hormigones normales.

Puede tenerse en cuenta lo que se ha dicho en los apartados correspondientes en relación con el del módulo de deformación o las deformaciones a largo plazo, pero salvo proyectos de especiales características no será necesario.

Las separaciones entre barras y otras disposiciones que afectan a las armaduras siguen siendo las generales para obras de hormigón, no obstante en la definición del hormigón habrá que tener en cuenta las prescripciones especiales en cuanto al tamaño máximo del árido, que se han comentado anteriormente.



Desde el punto de vista de las propiedades reológicas, en el apartado nº 8 se han comentado los ensayos más habituales y la calificación que resulta de su aplicación a los hormigones autocompactantes. En la siguiente tabla, tomada de los trabajos de Walraven citados en la Bibliografía, puede verse un criterio combinado para especificar las propiedades del hormigón fresco en proyecto, según el elemento a hormigonar.

T ₅₀ y ENSAYO DEL EMBUDO EN V (seg)	ENSAYO DE EXTENSIÓN DE FLUJO		
	SF1	SF2	SF3
VS > 2,5 10 ≤ VF ≤ 25	Rampas		Elementos altos y esbeltos
VS > 2,5 6 ≤ VF ≤ 9		Muros	
VS < 1,5 3 ≤ VF ≤ 5	Forjados, losas y pavimentos		



BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- Association Française de Génie Civil, Betons Auto-plaçants. Documents scientifiques et techniques. Juillet 2000.
- Baisoli, F.; European Guidelines for self-compacting concrete: Specifications, production and use. Proceedings 18th International Congress. Amsterdam 2005.
- Borralleras, P.; Obras y realizaciones con hormigones autocompactables.
- Burón, M.: Hormigones especiales: Prestaciones, Materiales, Normalización. I Curso sobre Tecnología del Hormigón. Universidad Politécnica de Valencia. IECA (2005).
- Domínguez, J.; Utilización de los aditivos en el hormigón autocompactable. Revista Hormigón y Acero nº 228-229.
- Esteban, M. y Navarro, F.; Empleo del hormigón autocompactable en la prefabricación. Revista Hormigón y Acero nº 228-229.
- Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1: General Rules and rules for buildings.
- Fernández Gómez, J.; Tecnología, propiedades y control de calidad del hormigón de altas prestaciones. I Curso sobre Tecnología del Hormigón. Universidad de Granada, IECA (2004).
- Fernández Gómez, J; El control de calidad en hormigones de alta resistencia. Revista Hormigón y Acero nº 228-229.
- First North American Conference on the Design and use of Self-Consolidating Concrete. Center for Advanced Cement-Based Materials (November 2002).
- Garrido, L.; Tecnología y propiedades generales del hormigón autocompactante. I Curso sobre Tecnología del Hormigón. Universidad de Granada, IECA (2004).
- Gettu, R. y Agulló, L.; Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización (Parte I y Parte II). Revista Cemento-Hormigón, (Abril y mayo 2004).
- Hurtado, J.A.; Obras y realizaciones con hormigón autocompactante. I Curso sobre Tecnología del Hormigón. Universidad de Granada, IECA (2004).

- Instrucción de Hormigón Estructural EHE.
- Norma EN-206-1:2000 "Hormigón - Parte 1: Especificaciones, Comportamiento, Producción y Conformidad"
- Pacios, A.; El hormigón autocompactable: tecnología sostenible en la industria de la construcción. Revista Hormigón y Acero n° 228-229.
- Palacios, P. y Navarrete, E.; Los hormigones especiales como producto industrial. Revista Hormigón y Acero n° 228-229.
- PCI.; Interim Guidelines for the use of Self-Consolidating Concrete in Precast TR 6-03.
- Pérez, J.I., Ordóñez, J., Menéndez, A. y Rubio, M.C.; Diseño de encofrados para hormigón autocompactante. I Curso sobre Tecnología del Hormigón. Universidad de Granada, IECA (2004).
- Revuelta, D. y Fernández Luco, L.; Hormigón autocompactable. Visión general. Revista Hormigón y Acero n° 228-229.
- Walraven, J.; Structural application of self compacting concrete. Proceedings of 3rd RILEM International Symposium on Self Compacting Concrete. Reykjavic, Iceland. RILEM Publications PRO 33, August 2003.

Editado por:

Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)
José Abascal, 53 - 2.º
28003 MADRID

Autores:

D. Jaime Fernández Gómez
D. Manuel Burón Maestro

Diseño y maquetación:

José Manuel Vaquero Juárez

Depósito legal: M-45043-2005

I.S.B.N.: 84-89702-21-7





ISBN 84-89702-21-7



9 788489 702219