



**Directrices Europeas  
para  
el Hormigón Autocompactante  
Especificaciones, Producción y Uso**



**Febrero 2006**



# The European Guidelines for Self-Compacting Concrete

## Specification, Production and Use



Mayo 2005

La traducción al castellano ha sido promovida por las cuatro siguientes asociaciones españolas:

**ANDECE** Asociación Nacional de Derivados del Cemento

**ANEFHOP** Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado

**ANFAH** Asociación Nacional de Fabricantes de Aditivos para Hormigón y Mortero

**IECA** Instituto Español del Cemento Aplicado

Cualquier comentario sobre esta traducción remitirlo a:  
[info@anfah.org](mailto:info@anfah.org)

## PREFACIO

Estas directrices y especificaciones han sido preparadas por un grupo de proyecto formado por 5 federaciones europeas dedicadas a la promoción de nuevos materiales, y sistemas para el aprovisionamiento y empleo del hormigón. El Grupo de Proyecto Europeo (GPE) del Hormigón Autocompactante se fundó en enero de 2004 con representaciones de:

**BIBM** The European Precast Concrete Organisation.

**CEMBUREAU** The European Cement Association.

**ERMCO** The European Ready-mix Concrete Organisation.

**EFCA** The European Federation of Concrete Admixture Associations.

**EFNARC** The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.

Cualquier comentario sobre la versión original en inglés de “Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante” deberá remitirse a la secretaria del GPE a:

**[www.efca.info](http://www.efca.info) o [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org)**

*[n.t. contacto en inglés]*

## AGRADECIMIENTOS

El Grupo de Proyecto Europeo agradece la colaboración durante la redacción del borrador de un amplio número de expertos de la industria del hormigón y de la construcción. Los cinco grupos de trabajo del GPE han sacado provecho de la experiencia de HAC con más de 50 personas de 12 países europeos, y en colaboración con el proyecto 2001-2004 de la Asociación de Hormigón del Reino Unido y de “TESTING – SCC”.

Los diagramas y fotografías han sido proporcionadas por:

Betonson BV, NL

Degussa

Doka Schalungstechnik GmbH

Hanson

Holcim

Price and Myers Consulting Engineers

Lafarge

Sika

The “TESTING-SCC” project

W. Bennenk

Aunque se ha tenido especial cuidado para asegurar, a partir de nuestros mejores conocimientos, que todos los datos e información contenidos en este documento están probados por la experiencia o son aceptados en la práctica o son cuestiones de opinión en el momento de la publicación, el grupo asociado de proyecto del SCC no asume responsabilidad alguna por los posibles errores o malas interpretaciones derivados de algunos de los datos o información o cualquier pérdida o daño surgido o relacionado con el uso de estas directrices.

Todos los derechos reservados. Se prohíbe la reproducción, el almacenaje en sistemas de recuperación o transmisión total o parcial, en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, gravable u otros, sin consentimiento previo del Grupo de Proyecto Europeo SCC.

## INDICE

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Alcance</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Normativa de referencia</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Términos y definiciones</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Propiedades estructurales</b>	<b>6</b>
5.1	Introducción	
5.2	Resistencia a compresión	
5.3	Resistencia a tracción	
5.4	Módulo de elasticidad	
5.5	Fluencia	
5.6	Retracción	
5.7	Coefficiente de dilatación térmica	
5.8	Adherencia en las armaduras, el pretensado y los cables	
5.9	Capacidad de esfuerzo cortante entre capas de hormigonado	
5.10	Resistencia al fuego	
5.11	Durabilidad	
5.12	Referencias	
<b>6</b>	<b>Especificaciones del HAC preparado y del elaborado en obra</b>	<b>12</b>
6.1	Introducción	
6.2	Especificación	
6.3	Requisitos en estado fresco	
6.4	Clases de consistencia	
6.5	Ejemplos de especificación	
<b>7</b>	<b>Componentes</b>	<b>18</b>
7.1	Generalidades	
7.2	Cemento	
7.3	Adiciones	
7.4	Áridos	
7.5	Aditivos	
7.6	Pigmentos	
7.7	Fibras	
7.8	Agua de mezcla	
<b>8</b>	<b>Dosificación de la mezcla</b>	<b>22</b>
8.1	Generalidades	
8.2	Principios de diseño de la mezcla	
8.3	Métodos de ensayo	
8.4	Diseño básico de mezcla	
8.5	Enfoque del diseño de mezcla	
8.6	Estabilidad en estado fresco	
<b>9</b>	<b>Producción de hormigón HAC preparado y elaborado en obra o en planta</b>	<b>27</b>
9.1	Introducción	
9.2	Almacenaje de los componentes	
9.3	Equipos de mezclado y ensayos de mezcla	

9.4	Procesos de mezclado en planta	
9.5	Control de producción	
9.6	Transporte y entrega	
9.7	Recepción en obra	
<b>10</b>	<b>Preparación y requisitos en obra</b>	<b>32</b>
10.1	Introducción	
10.2	Control en obra	
10.3	Ajuste de mezcla	
10.4	Supervisión y cualificación	
10.5	Presión al encofrado	
10.6	Diseño de encofrado	
10.7	Preparación del encofrado	
10.8	Encofrado para hormigonado de abajo a arriba	
<b>11</b>	<b>Aplicación y acabado en obra</b>	<b>36</b>
11.1	Introducción	
11.2	Descarga	
11.3	Proceso y velocidad de colocación	
11.4	Colocación por bombeo	
11.5	Colocación con tolva o cubilote	
11.6	Vibrado	
11.7	Acabado de losas	
11.8	Curado	
<b>12</b>	<b>Elementos de hormigón prefabricado</b>	<b>41</b>
12.1	Introducción	
12.2	Especificación de elementos de hormigón prefabricado con HAC	
12.3	Diseño de la mezcla de HAC para elementos de hormigón prefabricado	
12.4	Moldes	
12.5	Producción en fábrica	
12.6	Colocación	
12.7	Acabado, curado y desencofrado	
<b>13</b>	<b>Aspecto y acabado superficial</b>	<b>44</b>
13.1	Introducción	
13.2	Oclusiones de aire	
13.3	Coqueras	
13.4	Uniformidad del color y defectos superficiales	
13.5	Minimización de las fisuras superficiales	

## ANEXOS

<b>A</b>	<b>Requisitos del hormigón autocompactante</b>	<b>47</b>
A.1	Alcance	
A.2	Referencias normativas	
A.3	Definiciones, símbolos y abreviaturas	
A.4	Clasificación	
A.5	Requisitos para el hormigón y métodos de verificación	
A.6	Entrega del hormigón fresco	
A.7	Control y criterios de conformidad	
A.8	Control de producción	
<b>B</b>	<b>Métodos de Ensayo para el HAC</b>	<b>51</b>
B1:	Caracterización de la fluidez, ensayo del escurrimiento	
B2:	Ensayo del embudo en V	
B3:	Ensayo de la caja en L	
B4:	Ensayo de la resistencia a la segregación en tamiz	
<b>C</b>	<b>Mejoramiento del acabado del HAC</b>	<b>64</b>

## 1 Introducción

El hormigón Autocompactante (HAC) es un tipo innovador de hormigón que no requiere vibración alguna para su colocación y compactación. El HAC fluye por su propio peso, ocupando completamente la forma del encofrado y alcanza una plena compactación, aún en presencia de una alta densidad de armaduras. Este hormigón endurecido es denso, homogéneo y tiene las mismas propiedades estructurales y una vida útil igual a la del hormigón convencional compactado por vibración.

El hormigón que requiere de pequeñas vibraciones o compactaciones se ha venido usando en Europa desde inicio de los setenta pero el hormigón autocompactante no se desarrolló hasta finales de los ochenta en Japón. Se cree que en Europa se usó inicialmente en obra civil para redes viarias en Suecia, a mediados de los noventa. La UE fundó el primer proyecto industrial multinacional “HAC” 1997-2000 y desde entonces éste ha ido aumentando su actividad en todos los países europeos.

El hormigón autocompactante ofrece una rápida adaptación al encofrado, por lo que disminuye el plazo de construcción y disminuye los problemas de colocación por alta densidad de armado. La fluidez y la resistencia a la segregación del HAC aseguran un buen nivel de homogeneidad, una mínima porosidad en el hormigón y una resistencia constante, proporcionando unos mejores niveles de acabado y una mayor durabilidad de la estructura. El HAC se elabora normalmente con una relación agua-cemento bastante baja por lo que se obtiene una mayor resistencia, un desencofrado más rápido y una entrada en servicio de las estructuras en menor tiempo.

La eliminación de los elementos de vibrado disminuye notablemente el impacto ambiental, en la obra y en sus proximidades, así como en las plantas de prefabricación, reduciendo el tiempo y la intensidad de exposición de los trabajadores al ruido y a las vibraciones.

La mayor facilidad de uso en la construcción, combinados con los beneficios para la salud y ambientales, hacen del HAC una solución atractiva tanto para el hormigón prefabricado como para el hormigón de obra civil y edificación.

En el 2002 EFNARC publicó “Especificaciones y Directrices para el Hormigón Autocompactante” que, por el momento, provee de un estado del arte de información para productores y usuarios. Desde entonces, se ha venido publicando mucha más información técnica sobre HAC pero la normativa europea de diseño, producción y construcción no se refieren específicamente al HAC, por lo que en los pliegos de condiciones de obras tiene poca aceptación, especialmente entre especificadores y constructores.

En 1994 cinco organizaciones europeas BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA y EFNARC, todas ellas dedicadas a la promoción de nuevos materiales y sistemas de sustitución del hormigón, crearon el “Grupo de Proyecto Europeo” para revisar las mejores prácticas actuales y redactar un nuevo documento que cubra todos los aspectos del HAC. Este documento **“Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante”** sirve para, y está especialmente pensado, esas cuestiones que no aparecen en las especificaciones y normativas europeas, o métodos de ensayo aceptados.

## 2 Alcance

**“Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante”** representa el documento de estado del arte dirigido a especificadores, diseñadores, constructores, productores y usuarios que deseen aumentar sus conocimientos y usos del HAC. Las directrices han sido preparadas usando la amplia experiencia y conocimiento disponible del Grupo de Proyecto Europeo. Las especificaciones propuestas y los métodos de ensayo relacionados para el hormigón preparado y el elaborado en obra se presentan en un formato pre-normativo, siendo un intento de facilitar la estandarización a nivel europeo. Esta propuesta debe propiciar una mayor aceptación y utilización del HAC.

“**Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante**” define al HAC y muchos de los términos técnicos usados para describir sus propiedades y empleo. Proveen también información sobre normativas relacionadas con los ensayos y con los materiales constituyentes relacionados en el empleo y la producción del HAC.

Se abarcan la durabilidad y otras propiedades estructurales del hormigón endurecido para proporcionar ayuda a los proyectistas sobre el HAC con la PNE-EN 1992 Proyecto de estructuras de hormigón (Eurocódigo 2)

Las Directrices cubren esa información común en el HAC tanto para la industria del hormigón preparado, la del elaborado en obra y la del prefabricado. El capítulo 12 contiene los requisitos específicos para productos de hormigón prefabricado.

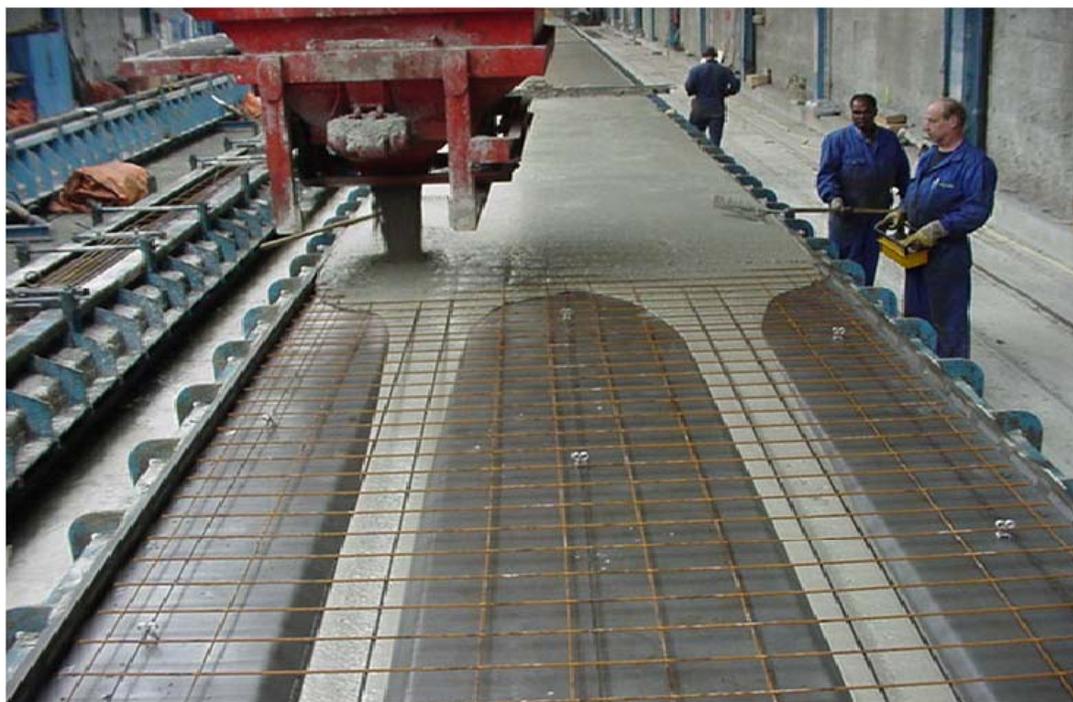
Las Directrices se han redactado poniendo especial énfasis en los hormigones preparados y elaborados en obra para los que hay requisitos entre el constructor y el suministrador en relación a las especificaciones del hormigón, tanto en estado fresco como endurecido. Además, las Directrices cubren requisitos específicos e importantes para el comprador de HAC con respecto a la preparación in situ y los métodos de aplicación, los cuales son distintos a las del hormigón vibrado convencional.

Las especificaciones del hormigón prefabricado se basan normalmente en la calidad final del producto de hormigón en su estado sólido de acuerdo con los requisitos pertinentes según la normativa de producto definida en la PNE-EN 13369: *Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón*. La PNE-EN 13369 se refiere únicamente a las partes de la UNE 83900 que conciernen a los requisitos del hormigón en estado sólido. Por lo que al hormigón en estado fresco se refiere, los requisitos los definen las especificaciones internas de los prefabricadores.

El documento describe las propiedades del HAC tanto en estado fresco como en estado endurecido, y da consejos al comprador de hormigón preparado y al que lo elabora de cómo se debe especificar el HAC según las normativas europeas vigentes para hormigón estructural, UNE 83900. También describe los métodos de ensayo usados para comprobar dichas especificaciones. Las especificaciones adicionales se presentan en formato prenormativo de acuerdo a las normativas EN del hormigón.

Se aconseja al productor de los materiales constituyentes, su control e interacción. Puesto que hay distintos enfoques para el desarrollo de dosificaciones de HAC, no se recomienda ningún método concreto, pero se facilita una extensa lista de artículos que describen distintos métodos de dosificación.

Se aconseja al productor de hormigón preparado y al constructor que lo elabora en obra en la puesta en obra y colocación. Dando por hecho que el HAC es un producto que se usa tanto en industrias de prefabricación como en la construcción in situ, las directrices pretenden dar consejos específicos relacionados con los distintos requisitos de los dos sectores. Por ejemplo, mayor velocidad de fluidez y resistencia más rápida son importantes en prefabricación, mientras que la disminución de recursos o tiempo de colocación serán más importantes para aplicaciones in situ.



### 3 Normativa de referencia

UNE-EN 197-1	Cemento – Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes
UNE 83900	Hormigón. Prestaciones, fabricación, puesta en obra y criterios de aceptación
UNE-EN 450	Cenizas volantes como adición al hormigón. Definiciones, especificaciones y control de calidad
UNE-EN 934-2	Aditivos para hormigones, morteros y pastas – Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado
PNE-EN 1008	Agua de amasado para hormigón. Especificaciones para la toma de muestras, los ensayos de evaluación y aptitud al uso incluyendo las aguas de lavado de las instalaciones de reciclado de la industria del hormigón, así como el agua de amasado para hormigón.
PNE-EN 1992	Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1 – Reglas generales y reglas para edificación Parte 1-2 – Reglas generales – Proyecto de estructuras sometidas al fuego
PNE-EN 12350-1	Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Muestreo
PNE-EN 12350-2	Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayos de asentamiento
UNE-EN 12620	Áridos para hormigón
UNE-EN 12878	Pigmentos para la coloración de materiales de construcción fabricados a partir de cemento y/o de cal – Especificaciones y métodos de ensayo
UNE-EN 13055-1	Áridos ligeros – Parte 1: Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado
PNE-prEN 13263	Humo de sílice para hormigón. Definiciones, requisitos y control de la conformidad
PNE-prEN 13263-2	Humo de sílice para hormigón. Parte 2: Evaluación de la conformidad
PNE-EN 13369	Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón
PNE-ENV 13670-1	Ejecución de estructuras de hormigón. Parte 1: Generalidades
PNE-prEN 14889-1	Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad.
PNE-prEN 14889-2	Fibras para hormigón. Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad.
PNE-prEN 15167-1	Escorias granuladas molidas de alto horno para su uso en hormigón, mortero y lechadas. Parte 1: Definiciones.
PNE-prEN 15167-2	Escorias granuladas molidas de alto horno para su uso en hormigón, mortero y lechadas. Parte 2: Evaluación de conformidad.

UNE 82009 Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición.  
UNE-EN ISO 9001 Sistemas de gestión de la calidad – Requisitos

**Nota:** Algunas de estas normativas (PNE) están aún en fase de redacción. Para aquellas que están sin fecha nos referimos a su última versión.

## 4 Términos y definiciones

A efectos de esta publicación, se aplican las siguientes definiciones:

### Adiciones

Materiales inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente que, finamente divididos, pueden ser añadidos al hormigón con el fin de mejorar alguna de sus propiedades o conferirle características especiales. Ésta publicación se refiere a los dos tipos de adiciones definidas en la UNE 83900: adiciones casi inertes (Tipo I) y adiciones puzolánicas o hidráulicamente activas (Tipo II)

### Aditivo

Producto incorporado en el momento de amasado del hormigón en una proporción no mayor al 5% en masa con relación al contenido de cemento en el hormigón, con objeto de modificar las propiedades de la mezcla en estado fresco y/o endurecido.

### Cemento

Combinación de cemento y adiciones Tipo II

### Capacidad de relleno

Capacidad para rellenar completamente todas las zonas del encofrado así como recubrir y fluir a través de las armaduras, sin formación de vacíos (perfecta compactación) y sin la necesidad de vibrado ni otros métodos de compactación externos.

### Finos

Material de partículas de tamaño menor de 0,125 mm.

NOTA: Dicha fracción corresponde al cemento, adiciones y áridos.

### Caracterización de la fluidez

Capacidad de fluir del hormigón fresco no confinado en el encofrado ni en el armado

### Fluidez

La capacidad de fluir del hormigón fresco

### Mortero

La fracción del hormigón compuesta por la pasta y los áridos menores de 5 mm.

### Pasta

La fracción del hormigón compuesta por los finos, el agua, el aire y los aditivos, en su caso

### Capacidad de paso

Capacidad para fluir libremente a través del armado, ofreciendo un perfecto relleno, sin indicios de bloqueo del árido grueso ni otros fenómenos relacionados con la pérdida de homogeneidad (segregación y exudación).

### Hormigón especificado por propiedades

Hormigón en el que el suministrador asegura la mezcla sujeta a una buena práctica en la aplicación, compactación y curado, y del cual el suministrador no está obligado a declarar la composición.

### Estabilidad

Capacidad del hormigón de conservar sus propiedades en estado fresco, aún con pequeñas variaciones de las propiedades o cantidades de los materiales constituyentes.

**Hormigón autocompactante (HAC)**

Hormigón capaz de fluir y recubrir cualquier parte y rincón del encofrado y a través del armado simplemente por la acción de su propio peso y sin la necesidad de ningún otro tipo de método de compactación sin segregación ni indicios de bloqueo.

**Resistencia a la segregación**

Capacidad del hormigón de mantener la homogeneidad de la composición en estado fresco

**Ensayo del escurrimiento**

Diámetro medio de la extensión de hormigón fresco usando un cono de Abraham convencional

**Tixotropía**

Tendencia del material (p.e. HAC) a perder progresivamente la fluidez cuando permanece sin alteración externa y a recobrarla cuando se le aplica energía.

**Viscosidad**

Resistencia del material a fluir (p.e. HAC) una vez éste entra en movimiento.

NOTA: En el HAC se relaciona con la velocidad de fluidez  $T_{500}$  del ensayo de asentamiento o con el tiempo de flujo en el ensayo del embudo en V.

**Aditivos Moduladores de Viscosidad (VEA)**

Aditivo añadido al hormigón fresco para incrementar su cohesión y su resistencia a la segregación.

## **5 Propiedades estructurales**

### **5.1 Introducción**

El hormigón autocompactante y el hormigón vibrado convencional, tienen propiedades comparables con fuerzas similares de compresión y si hay diferencias, quedan cubiertas por las normas de seguridad en las que se basan los códigos de diseño. No obstante, la composición del HAC no difiere mucho del hormigón convencional y las pocas diferencias existentes se presentan en los apartados siguientes. Cuando es posible, se hace referencia a la PNE-EN 1992-1 y la UNE 83900 [1] [2].

La durabilidad, es decir, la capacidad de la estructura de hormigón para resistir las agresiones medio ambientales durante su vida de diseño sin perder las propiedades de los requisitos de trabajo, normalmente se considera mediante la especificación de los tipos de ambiente. Esto condiciona los valores límites de la composición del hormigón y el recubrimiento mínimo del armado.

En el diseño de estructuras de hormigón, los técnicos precisan unas propiedades del hormigón, que no siempre están en sus especificaciones. Las más relevantes son:

- Resistencia a compresión
- Resistencia a tracción
- Módulo de elasticidad
- Fluencia
- Retracción
- Coefficiente de dilatación térmica
- Adherencia a las armaduras
- Resistencia al cortante en juntas frías
- Resistencia al fuego

Donde el valor y/o el desarrollo de una propiedad concreta del hormigón es un factor crítico en su vida útil, se deben de realizar ensayos considerando las condiciones de exposición y las dimensiones del elemento estructural.

### **5.2 Resistencia a compresión**

El hormigón autocompactante con una relación agua / cemento similar a la de un hormigón vibrado convencional tendrá normalmente un valor de resistencia a la compresión ligeramente superior, debido a que la falta de vibrado da una mayor interfase entre el árido y la pasta endurecida. El desarrollo de las resistencias será similar, por lo que un ensayo de evolución de resistencias será una forma efectiva de controlar este parámetro, independientemente de que se usen sistemas de curado acelerado.

Algunas de las propiedades del hormigón están relacionadas con la resistencia a la compresión del hormigón, que es la única propiedad estructural que se especifica y se ensaya de forma sistemática.

### **5.3 Resistencia a tracción**

El hormigón autocompactante debe ser suministrado con una resistencia a la compresión especificada. Para una clase y un curado del hormigón dados, puede asumirse con seguridad una resistencia a tracción con el mismo valor que la de un hormigón convencional, puesto que el volumen de la pasta (cemento + finos + agua) no tienen un efecto significativo en el valor de la resistencia de tracción.

En el diseño de las secciones de hormigón armado, el diagrama de resistencia a tracción del hormigón se usa para la evaluación del momento de fisuración en elementos pretensados, para el diseño de la armadura de control del estado límite de fisuración y de la separación resultante de fisuraciones térmicas por retracción a edades tempranas, para representar los diagramas momentos - deformaciones, para el diseño de pavimentos de hormigón en masa y para hormigón armado con fibras.

#### 5.4 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad ( $E$ , relación entre tensión y deformación), se usa en el cálculo de la deformación elástica, y es a menudo un parámetro de control en el diseño de elementos de hormigón armado, y de elementos pretensados y postensados.

En la medida en que la mayor parte del volumen en el hormigón son los áridos, el tipo y la cantidad de áridos empleados, así como el valor de su módulo elástico, tienen una gran influencia. La selección de un árido con un valor  $E$  elevado incrementará el módulo de elasticidad  $E$  del hormigón. Sin embargo, el incremento del volumen de pasta podría disminuir el valor de  $E$ . Puesto que a menudo el HAC tiene un mayor contenido de pasta que el hormigón vibrado convencional, cabe esperar ciertas diferencias y el valor  $E$  será menor, pero esto se puede cubrir adecuadamente mediante los coeficientes de seguridad en los que se basa la fórmula descrita en la PNE-EN 1992-1-1.

Si el HAC tiene un módulo  $E$  menor que el hormigón vibrado convencional, esto afectará la relación entre la resistencia a compresión y la flecha debida al pretensado o post-tensado. Por esta razón, debe haber un control meticuloso del valor de la tensión en el momento que se tesan o destesan los cables o las barras de pretensión y postensión.

#### 5.5 Fluencia

Se define la fluencia como el incremento gradual de deformación en función del tiempo para una tensión constante aplicada, considerando otras deformaciones dependientes del tiempo no asociadas a las cargas aplicadas, p.e. retracción, expansión y deformaciones térmicas.

La fluencia en secciones a compresión reduce las fuerzas de tensión en elementos de hormigón pretensado y causa una lenta transferencia de carga desde el hormigón hasta la armadura. La fluencia en tracción puede ser beneficiosa puesto que esta en parte disminuye las tensiones inducidas por otros movimientos de retracción, p.e. la fisuración por secado y los movimientos de origen térmico.

La fluencia tiene lugar en la pasta de cemento y está influenciada por la porosidad, la cual está directamente vinculada con la relación agua-cemento. Durante la hidratación, la porosidad de la pasta de cemento se reduce, por lo que, para un hormigón dado, la fluencia se reduce cuando la tensión aumenta. El tipo de cemento es importante si la edad de entrada en carga está determinada. Cementos que hidraten más rápidamente tendrán mayor resistencia a la edad de entrada en carga, una menor relación tensión – deformación y una menor fluencia. Como los áridos restringen la deformación del cemento, a mayor volumen de áridos y mayor módulo  $E$  del árido, menor será la fluencia.

Debido a un mayor volumen de pasta de cemento, el coeficiente de deformación esperado para el HAC será mayor que el de un hormigón convencional de igual resistencia, pero estas diferencias son pequeñas y quedan cubiertas por los factores de seguridad de las tablas y formularios proporcionadas en la Euronorma.

#### 5.6 Retracción

La retracción es la suma de la retracción autógena y de la retracción por evaporación de agua. La retracción autógena tiene lugar durante el fraguado y es originada por el consumo interno de agua durante la hidratación. El volumen de los productos resultantes de la hidratación es menor que el volumen original del cemento deshidratado y del agua y esta reducción de volumen causa esfuerzos de tracción que originan la retracción autógena.

La retracción por evaporación de agua está causada por la pérdida de agua del hormigón a la atmósfera. Generalmente esta pérdida de agua procede de la pasta de cemento, pero en algunos pocos tipos de áridos la mayor pérdida de agua procede de los áridos. La retracción por evaporación de agua es relativamente baja y las tensiones que induce en parte se equilibran por la aportación de las tensiones de fluencia.

Los áridos reducen la retracción de la pasta de cemento, por lo que para un mayor volumen de áridos con mayor módulo  $E$  de los mismos, menor será la retracción por evaporación de agua. Una disminución del

tamaño máximo de los áridos, que implica un mayor volumen de pasta, incrementa la retracción por evaporación de agua.

Los valores y fórmulas dadas en la Euronorma para un hormigón convencional siguen siendo válidos para el caso del HAC.

Como la resistencia de compresión del hormigón depende de la relación agua-cemento, en el HAC con una menor relación agua-cemento, se reduce la retracción por evaporación de agua y la retracción autógena puede ser mayor que ésta.

Ensayos realizados en fluencia y retracción de diferentes tipos de HAC y un hormigón de referencia [7] demuestran que:

- La deformación causada por retracción puede ser mayor
- La deformación causada por fluencia puede ser menor
- El valor de la suma de deformaciones (retracción y fluencia) son prácticamente similares.

Debido al obstáculo que representan las armaduras en la sección transversal la tensión de retracción causará tracción en el hormigón y compresión en el armado.

### **5.7 Coeficiente de dilatación térmica**

El coeficiente de dilatación térmica del hormigón es la deformación producida en éste después del cambio de una unidad de temperatura cuando el hormigón no tiene impedimentos ni internos (por las armaduras) ni externos.

El coeficiente de dilatación térmica del hormigón varía con la composición, la edad y el contenido de humedad. Como la masa de hormigón comprende los áridos, usando áridos con un menor coeficiente de dilatación térmica se reducirá el coeficiente de dilatación térmica del hormigón resultante. Reduciendo el coeficiente de dilatación térmica se obtiene una reducción proporcional en el control de fisuración producido por las armaduras.

Mientras que el rango del coeficiente de dilatación térmica es de 8 a 13 microcontracciones/K, en la PNE-EN 1992 se establece que, a falta de información más precisa, deberá de tomarse de 10 a 13 microcontracciones/K. Estos mismos valores se asumirán para el HAC.

### **5.8 Adherencia en las armaduras, el pretensado y los cables**

El hormigón armado se basa en una unión efectiva entre el armado y el hormigón. La adherencia del hormigón debe ser suficiente para prevenir el fallo de la unión. La efectividad de la adherencia está afectada por la forma de las barras embebidas y la calidad del hormigón como recubridor. Se necesita un recubrimiento adecuado del hormigón para facilitar una buena transferencia de las tensiones de enlace entre el acero y el hormigón.

Una deficiente adherencia está originada a menudo por un recubrimiento bajo de las barras durante la colocación o por exudación y segregación del hormigón antes de su endurecimiento, lo que reduce la calidad del contacto en la parte inferior de la superficie de las armaduras. La fluidez y cohesión del HAC minimiza estos efectos negativos, especialmente para la parte superior de las barras en grandes secciones de hormigón armado [5].

En el caso de cables trenzados la transferencia y la longitud de los anclajes se han comparado para distintos tipos de HAC con el comportamiento en hormigón convencional vibrado de la misma resistencia característica a compresión. La longitud de transferencia para cables trenzados embebidos en HAC demuestra estar en la zona de seguridad comparado con los valores calculados en la PNE-EN 1992-1 y la UNE 83900, ver también [7] [8].

Aunque las propiedades de unión o solapes generalmente aumentan cuando se usa HAC, para una misma resistencia característica a compresión dada se usará la formulación del Código.

## 5.9 Capacidad de esfuerzo cortante entre capas de hormigonado

La superficie del HAC endurecido después del vertido y fraguado será más bien lisa e impermeable. Sin tratamiento alguno de la superficie después de la primera capa, la capacidad de esfuerzo cortante entre la primera y la segunda capa puede ser menor que la de un hormigón convencional vibrado y puede, por lo tanto, ser insuficiente para soportar alguna fuerza a cortante. Un tratamiento de superficie, como retardantes superficiales, cepillados o rugosidades de superficie, será suficiente [7] [9].

## 5.10 Resistencia al fuego

El hormigón es incombustible y no propaga las llamas. No produce humo, gases tóxicos o emisiones cuando está expuesto al fuego y no contribuye a la carga de fuego, el hormigón tiene una relación baja de transferencia de calor, por lo que se convierte en un buen corta fuegos para compartimientos adyacentes y bajo unas condiciones normales de incendio, el hormigón mantendrá prácticamente su resistencia. La Comisión Europea ha dado al hormigón la máxima designación posible de fuego, A1.

La resistencia al fuego del HAC es similar a la de un hormigón convencional [7]. En general un hormigón con una menor permeabilidad será más resistente al escamado pero los daños dependerán del tipo de árido, de la calidad del hormigón y del contenido de humedad [6]. El HAC puede alcanzar con facilidad los requisitos de alta resistencia y baja permeabilidad y se comportará de modo parecido a cualquier hormigón habitual de alta resistencia bajo condiciones de fuego [7].

El uso de fibras de polipropileno en el hormigón ha demostrado cierta efectividad en cuanto a mejora de la resistencia al escamado. Se cree que esto sucede debido a que las fibras se funden y son absorbidas por la matriz de cemento. Los vacíos de las fibras sirven de cámara de expansión para el vapor, reduciendo entonces el riesgo de escamado. Las fibras de polipropileno se han usado satisfactoriamente en HAC.

## 5.11 Durabilidad

La durabilidad de una estructura de hormigón está íntimamente ligada a la permeabilidad de la capa superficial, la que limita la entrada de sustancias que pueden iniciar o propagar posibles acciones degradantes (CO<sub>2</sub>, cloruro, sulfato, agua, oxígeno, alcalinos, ácidos, etc.). En la práctica, la durabilidad dependerá del material seleccionado, la composición del hormigón, así como del grado de supervisión durante la colocación, compactación, acabado y curado.

Una falta de compactación de la capa superficial, debido a las dificultades de vibración en zonas estrechas entre el encofrado y las barras de armado o otros intersticios (p.e. conductos de post-tensión) han sido reconocidos como un factor determinante de la baja durabilidad de las estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes agresivos. El desarrollo inicial del HAC en Japón surgió básicamente para resolver estas situaciones.

La compactación del hormigón convencional se realiza por la vibración (o apisonado), que es un proceso discontinuo. En el caso de vibraciones internas, aún cuando se ejecuten correctamente, el volumen de hormigón respecto al área de influencia del vibrador no recibe la misma energía de compactación.

De forma similar, en el caso de vibraciones externas, el resultado de compactación es esencialmente heterogéneo, dependiendo de la distancia de la fuente de vibrado.

El resultado de la vibración es, por tanto, un hormigón con una estructura de compactación irregular y, por lo tanto, con distintas permeabilidades, lo que aumenta la entrada selectiva de sustancias agresivas. Naturalmente, las consecuencias de un vibrado incorrecto (coqueras, segregación, exudación, etc.) tiene un efecto mucho más negativo en la permeabilidad, y por tanto, en la durabilidad.

El HAC con las propiedades adecuadas estará libre de estos defectos y resulta un material de permeabilidad baja y uniforme, ofreciendo menos puntos débiles para acciones de deterioro ambiental y, por lo tanto, mejor durabilidad. La comparación de la permeabilidad entre el HAC y un hormigón vibrado

### **“Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante”**

convencional dependerá de los materiales seleccionados y de la relación efectiva de agua-cemento o agua-cementante.

Hay métodos de ensayo, normalizados a nivel nacional o recomendados por RILEM para medir la permeabilidad del hormigón, en el laboratorio e in situ, como indicador de su durabilidad. La PNE-EN 1992-2 y la UNE 83900 consideran la durabilidad para especificar las clases de ambientes, llegando a limitar valores en la composición del hormigón (relación agua-cemento, contenido mínimo de cemento, etc.) y los recubrimientos mínimos de las armaduras del hormigón [1] [2].

## 5.12 Referencias

- [1] PNE-EN 1992-1 – Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1 – Reglas generales y reglas para edificación - Parte 1-2 – Reglas generales – Proyecto de estructuras sometidas al fuego
- [2] UNE 83900 – Hormigón. Prestaciones, fabricación, puesta en obra y criterios de aceptación
- [3] BROOKS, J *Elasticity, shrinkage, creep and thermal movement*. Advanced Concrete Technology – Concrete properties, Edited by John Newman and Ban Seng Choo, ISBN 0 7506 5104 0, 2003.
- [4] HARRISON, T A *Early-age thermal crack control in concrete*. CIRIA Report 91, Revised edition 1992 ISBN 0 86017 329 1
- [5] SONEBI, M, WENZHONG,Z and GIBBS, J *Bond of reinforcement in self-compacting concrete* – CONCRETE July-August 2001
- [6] CATHER, R *Concrete and fire exposure*. Advanced Concrete Technology – Concrete properties, Edited by John Newman and Ban Seng Choo, ISBN 0 7506 5104 0, 2003.
- [7] DEN UIJL, J.A., *Zelfverdichtend Beton, CUR Rapport 2002-4* -Onderzoek in opdracht van CUR Commissie B79 Zelfverdichtend Beton, Stichting CUR, ISBN 90 3760 242 8.
- [8] VAN KEULEN, D, C, *Onderzoek naar eigenschappen van Zelfverdichtend Beton*, Rapport TUE/BCO/00.07, April 2000.
- [9] JANMAAT, D, WELZEN.M.J.P, *Schuifkrachtoverdracht in schuifvlakken van zelfverdichtend beton bij prefab elementen*, Master Thesis, Rapport TUE/CCO/A-2004-6.



Figura 5.1: Acabado superficial de un elemento prefabricado con HAC con llenado completo del molde.

## 6 Especificaciones del HAC preparado y del elaborado en obra

### 6.1 Introducción

Las especificaciones, la preparación y los requisitos de conformidad para el hormigón estructural se establecen en la UNE 83900. Sin embargo, en el caso del HAC algunas propiedades del hormigón fresco exceden los límites y tipos establecidos en dicha normativa. Ninguno de los métodos de ensayo de la actual serie PNE-EN 12350 “Ensayos de hormigón fresco” son adecuados para la evaluación de las propiedades clave del HAC fresco. Los métodos de ensayo adecuados para el HAC se definen en el Anexo B de las presentes Directrices, y se prevé que la serie PNE-EN 12350 se ampliará para incluir dichos ensayos.

La capacidad de relleno y la estabilidad del hormigón fresco autocompactante se definen por cuatro características principales. Cada una determinable por uno o varios métodos de ensayo:

Característica	Métodos de ensayo idóneos
Flujo	Ensayo de asentamiento
Viscosidad (calculada según la relación de flujo)	$T_{500}$ , ensayo de asentamiento o ensayo del embudo en V
Capacidad de paso	Ensayo de la caja en L
Segregación	Ensayo de resistencia a la segregación

Estos métodos de ensayo para el HAC están descritos en el Anexo B.

Los detalles para la especificación, preparación, producción y conformidad del HAC, que complementan a la normativa UNE 83900, se encuentran descritos en el Anexo A.

En los apartados 6.3 y 6.4 se detallan otros consejos acerca de las especificaciones para el HAC fresco.

### 6.2 Especificación

El HAC será de forma general especificado por el prescriptor o por el propietario de la obra.

El método de prescripción del hormigón es más conveniente para los casos en que el proyectista y el constructor/usuario son el mismo (p.e. hormigón elaborado en obra).

Por razones comerciales el productor de hormigón preparado probablemente preferirá el método de especificación por propiedades (véase Anexo A), siguiendo las consultas entre el comprador y el constructor. El método de especificación por propiedades se centra en la preparación del hormigón, haciendo recaer la responsabilidad en el constructor. Normalmente no es muy práctico para el constructor desarrollar su propio HAC y precisar las proporciones de la mezcla al productor, y de ser así difícilmente podrá especificar el tipo de resistencia.

Las especificaciones para el HAC usadas por el método de hormigón especificado por propiedades pueden contener:

- a) requisitos básicos dados en el subapartado 6.2.1 de estas Directrices
- b) requisitos adicionales dados en el subapartado 6.2.2 de estas Directrices cuando sean requeridos

#### 6.2.1 Requisitos básicos

Las especificaciones para el hormigón autocompactante deben contener:

- a) Requisitos en conformidad con “Directrices europeas para el hormigón autocompactante, Mayo de 2005, Anexo A’ ;

### “Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante”

- b) Tipo de resistencia a la compresión (véase Nota 1 y UNE 83900, **4.3.1**);
- c) Tipo de ambiente o exposición y/o valores límite de composición, p.e. máxima relación a/c, contenido mínimo de cemento (ver tablas válidas para el lugar de la obra);
- d) Tamaño máximo de áridos;
- e) Clasificación por exposición a cloruros (véase UNE 83900, 5.2.7);
- f) Clasificación según el ensayo de asentamiento o, en casos especiales, el diámetro nominal a alcanzar (véase Anexo A, Tabla A.6).

NOTA 1: En algunos Estados miembros de la UE sólo se aplican tipos específicos de resistencia conforme a los Documentos Nacionales de Aplicación (DNA)

NOTA 2: Es necesario tomar en cuenta algunas consideraciones cuando se especifiquen requisitos para un productor que opere según un sistema de gestión de la calidad acreditado, considerando requisitos de la UNE-EN ISO 9001.

#### **6.2.2 Requisitos adicionales**

Además de los requisitos básicos (subapartado 6.2.1), las especificaciones para el HAC pueden contener algunos de los requisitos y provisiones adicionales siguientes que pueden ser necesarios, indicando los requisitos de elaboración y métodos de ensayo apropiados:

- a) Valor de la  $T_{500}$  del ensayo de asentamiento (véase Anexo A, tabla A.2) o el tiempo del ensayo del embudo en V (véase Anexo A, Tabla A.3);
- b) Tipo de capacidad de paso o, en casos especiales, un valor nominal a alcanzar (véase Anexo A, Tabla A.4);
- c) Tipo de resistencia a la segregación o, en casos especiales, un valor nominal a alcanzar (véase Anexo A, Tabla A.5);
- d) Requisitos de temperatura para el hormigón fresco, cuando sean diferentes de los contenidos en la UNE 83900, 5.2.8;
- e) Otros requisitos técnicos.

NOTA 1. En el caso que deban efectuarse los ensayos de forma secuencial, hay que especificar la cadencia de muestreo.

#### **6.3 Requisitos en estado fresco**

Los requisitos específicos para el HAC en estado fresco dependerán del tipo de aplicación, y especialmente de:

- Condiciones de confinamiento relacionadas con la geometría del elemento a hormigonar, y de la cantidad, tipo y localización de las armaduras, embebidos, recubrimientos y huecos, etc.
- Ubicación de los equipos (p.e. bomba, vertido directo desde el camión hormigonera, cubilote, tolva)
- Métodos de colocación en obra (p.e. posición y cantidad de puntos de vertido)
- Métodos de acabado

Se detalla el sistema de clasificación en el Anexo A para una especificación apropiada del HAC para cubrir estos requisitos, los cuales se caracterizan por:

### “Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante”

• Clases de flujo	Ensayo de asentamiento SF	3 clases
• Viscosidad (medida de la velocidad de flujo)	Viscosidad VS o VF	2 clases
• Habilidad de paso (fluir sin bloqueo)	Capacidad de paso CP	2 clases
• Resistencia a la segregación	Resistencia a la segregación RS	2 clases

Los detalles de estos métodos de ensayo para estas características se encuentran en el Anexo B.

La información sobre la selección de parámetros y clases se da en el Apartado 6.4.

Los requerimientos del HAC fresco que son apropiados para una aplicación dada se pueden seleccionar de una o más de estas cuatro características clave y luego especificar por clase o valor objetivo de acuerdo con el Anexo A.

Para el hormigón elaborado o el preparado en obra, las características o clases deben ser seleccionadas cuidadosamente, controladas y justificadas en base a la experiencia del contratista o del productor o bien por ensayos específicos. Es pues importante que el suministrador y el comprador del hormigón analicen y definan claramente estas características antes de iniciar las obras.

El comprador del hormigón deberá seleccionar únicamente las características del hormigón fresco que sean necesarias para la aplicación particular del HAC y eludir la sobre-especificación tanto de las características del hormigón como de las clases. El ensayo de asentamiento se especificará normalmente para todos los HAC.

La capacidad de paso, la viscosidad y la resistencia a la segregación afectarán a las propiedades in situ del hormigón endurecido pero únicamente se especificarán si es especialmente necesario.

- Si hay poca o ninguna armadura, no se requerirá la especificación de la capacidad de paso.
- La viscosidad será importante cuando se requiera un buen acabado superficial o bien haya alta densidad de armadura, pero no se especificará en otros casos.
- La resistencia a la segregación es crecientemente importante con la fluidez y menor con la viscosidad del HAC, pero si necesita ser especificada, la clase 1 se ha visto que es la adecuada para la mayor parte de aplicaciones.

Véase el Apartado 6.4 para mayores indicaciones en especificación.

El tiempo de mantenimiento de la consistencia requerido dependerá del tiempo de transporte y de su colocación en obra. Éste debe de estar determinado y especificado, y es responsabilidad del productor asegurar que el HAC mantiene las mismas propiedades de estado fresco durante todo este periodo.

El hormigón autocompactante debe, si es posible, aplicarse en un solo vertido, y por tanto las condiciones de entrega y de puesta en obra deben ser las mismas y también es preciso acordarlas con el suministrador para evitar paradas en la aplicación por falta de hormigón o largas esperas en su colocación después de la llegada del hormigón.

## **6.4 Clases de consistencia**

### **6.4.1 Ensayo del escurrimiento**

El valor del ensayo de asentamiento describe el flujo de una mezcla fresca y no confinada. Es un ensayo delicado que normalmente será especificado para todos los HAC, como ensayo inicial de que la consistencia del hormigón fresco cumple con las especificaciones. Las observaciones visuales durante el ensayo y/o durante la medida del tiempo  $T_{500}$  pueden dar información adicional sobre la segregación y la uniformidad de cada entrega.

Los valores normales para los distintos tipos de asentamiento y su campo de aplicaciones se describen a continuación:

SF1 (550 – 650 mm) es apropiado para:

## “Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante”

- estructuras en masa o poca densidad de armaduras que sean llenadas desde la parte superior con desplazamiento libre desde el punto de entrega (p.e. losas de cimentación o pavimentos)
- hormigones de relleno por bombeo (p.e. encofrados de túneles)
- elementos suficientemente pequeños que no precisen largos flujos horizontales (p.e. pilares y algunas cimentaciones profundas)

SF2 (660 – 750 mm) es adecuado para muchas aplicaciones normales (p.e. muros, pilares)

SF3 (760 – 850 mm) se elabora normalmente con una limitación del tamaño máximo de los áridos (menor de 16 mm) y se usa para aplicaciones verticales en estructuras muy armadas, estructuras de formas complejas, o rellenos bajo los encofrados. El SF3 da normalmente un mejor acabado superficial que el SF2 para aplicaciones verticales pero la segregación es más difícil de controlar.

Valores mayores de 850 mm pueden especificarse en algunos casos especiales, pero deberán extremarse las precauciones, considerando la segregación y el tamaño máximo de los áridos será normalmente menor de 12 mm.

### 6.4.2 Viscosidad

La viscosidad puede ser estimada a partir del tiempo  $T_{500}$  durante el ensayo de asentamiento o calculada mediante el tiempo de flujo del embudo en V. El tiempo obtenido no mide la viscosidad del HAC pero está relacionado con éste describiendo el índice de flujo. El hormigón con una baja viscosidad tendrá un flujo inicial muy rápido y luego se detendrá. Un hormigón de alta viscosidad continuará fluyendo más tiempo.

La viscosidad (alta o baja) se especificará únicamente en casos especiales como los que se indican más adelante. Será útil durante el desarrollo del proceso de mezcla y puede ser de ayuda medir y registrar el tiempo  $T_{500}$  mientras se hace el ensayo de asentamiento como método de confirmación de la uniformidad del HAC por amasadas.

VS1/VF1 tiene una buena capacidad de llenado aún con alta densidad de armaduras. Es capaz de autonivelarse y generalmente tiene mejor acabado superficial. Aún así, es más propenso a presentar exudación y segregación.

VS2/VF2 no hay una clase superior pero con el aumento del tiempo de flujo es más probable que presente efectos de tixotropía, que pueden ayudar en la limitación de la presión a los encofrados (ver apartado 10.5) o mejorar la resistencia a la segregación. Por lo contrario, podemos experimentar efectos negativos en el acabado superficial (coqueras) o los efectos por paradas o retrasos entre tongadas sucesivas (juntas frías).

### 6.4.3 Capacidad de paso

La capacidad de paso describe la capacidad de la mezcla fresca de fluir a través de espacios confinados y aperturas estrechas así como zonas densamente armadas sin segregación, pérdida de uniformidad o bloqueo. En la definición de la capacidad de paso, es necesario considerar la geometría y la densidad de las armaduras, el flujo/capacidad de relleno y el tamaño máximo de los áridos.

La dimensión definitiva es la del hueco más pequeño (hueco de confinamiento) a través del cual el HAC debe fluir continuamente para llenar el encofrado. Este hueco está normalmente, aunque no siempre, relacionado con la separación de las armaduras. A menos que el armado sea denso, el espacio entre barras del armado y la superficie del encofrado (recubrimiento) no se considera habitualmente, puesto que el HAC puede bordear las barras y no necesita fluir de forma continua a través de estos espacios de recubrimiento.

A continuación se dan algunos ejemplos de especificación de la capacidad de paso:

PA1 estructuras con huecos de 80 mm a 100 mm (p.e. edificación, estructuras verticales)

PA2 estructuras con huecos de 60 mm a 80 mm (p.e. estructuras de obra civil)

Para losas delgadas donde la separación sea mayor de 80 mm y otras estructuras donde la separación sea mayor de 100 mm no se requiere especificación alguna de la capacidad de paso.

Para estructuras complejas, con separaciones menores de 60 mm, se precisarán ensayos previos específicos con maquetas.

#### **6.4.4 Resistencia a la segregación**

La resistencia a la segregación es fundamental para la homogeneidad y calidad in situ del HAC. Éste puede sufrir segregación durante la colocación y también después de la aplicación y antes del fraguado. La segregación que se produzca después de la colocación será más perjudicial en elementos altos y en pavimentos, ya que ello puede producir defectos superficiales como fisuración o debilitar la superficie.

En los casos de ausencia de experiencias previas, se dan las siguientes directrices generales en cuanto a clases de resistencia a la segregación:

La resistencia a la segregación es un parámetro importante para mayores clases de asentamiento y/o menores clases de viscosidad, o si las condiciones de aplicación promueven la segregación. Si no es de aplicación ninguno de estos casos, no es preciso especificar la clase de resistencia a la segregación.

SR1 es aplicable generalmente a losas esbeltas y para aplicaciones verticales con un recorrido de flujo menor de 5 metros y una separación de las armaduras mayor de 80 mm.

SR2 es la recomendada para aplicaciones verticales si el recorrido de flujo es mayor de 5 metros y la separación de armado mayor de 80 mm en orden de prevenir la segregación durante el recorrido del flujo.

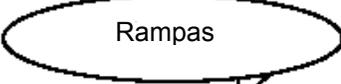
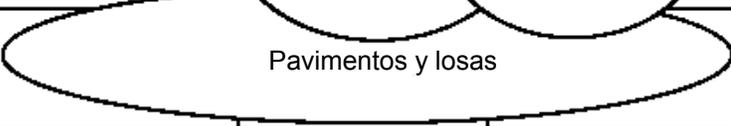
SR2 podrá usarse también en aplicaciones muy altas con una separación de armadura menor de 80 mm si la distancia de recorrido de flujo es menor de 5 metros, pero si la distancia de flujo es mayor de 5 metros se recomienda especificar un valor de SR menor en un 10%.

Puede especificarse SR2 o un valor determinado si la resistencia y la calidad del acabado superficial son particularmente importantes.

#### **6.5 Ejemplos de especificación**

La siguiente tabla resalta los parámetros iniciales y las clases a considerar para la especificación del HAC en distintas aplicaciones. Ésta no considera condiciones especiales de confinamiento, la geometría de los elementos, el método de llenado o las características de los materiales usados en la mezcla del hormigón. Será preciso analizar con el suministrador del hormigón las especificaciones finales antes de tomar una decisión.

**“Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante”**

Viscosidad				Resistencia a la segregación/ habilidad de paso
VS 2 VF 2				Especificar SR para SF 3
VS 1 o 2 VF 1 o 2 o valor específico				Especificar capacidad de paso para SF1 y 2
VS 1 VF 1				Especificar SR para SF2 y 3
	SF 1	SF 2	SF 3	
	Slump-flow			

**Propiedades del HAC para distintos tipos de aplicaciones basado en Walraven, 2003**

Walraven J (2003) Structural applications of self compacting concrete *Proceedings of 3rd RILEM International Symposium on Self Compacting Concrete*, Reykjavik, Iceland, ed. Wallevik O and Nielsson I, RILEM Publications PRO 33, Bagnaux, France, August 2003 pp 15-22

## 7 Componentes

### 7.1 Generalidades

Los componentes del HAC son los mismos que los que se usan para el hormigón vibrado convencional conforme la UNE 83900. En muchos casos los requisitos para los componentes están definidos individualmente en la normativa europea específica. Sin embargo, para asegurar una realización uniforme y consistente del HAC deberá tenerse un cuidado especial en la selección inicial, así como en el control continuo de la uniformidad de los distintos lotes de suministro.

Para alcanzar estos requisitos, hay que incrementar el control de los componentes y reducir las tolerancias en los parámetros de recepción, así la producción diaria del HAC estará dentro de los criterios de conformidad sin la necesidad de ensayar y/o ajustar cada amasada.

### 7.2 Cemento

Se pueden usar todos los cementos que cumplan con la UNE-EN 197-1 para la producción del HAC. La elección correcta del tipo de cemento está sujeta muchas veces a requisitos específicos para cada aplicación o el tipo usado por el productor, más que por requisitos específicos del HAC.

### 7.3 Adiciones

Debido a las propiedades requeridas para el HAC en estado fresco, las adiciones hidráulicamente inertes o activas o puzolanas se usan a menudo para incrementar y mantener la cohesión y la resistencia a la segregación. Las adiciones regulan también el contenido de cemento para reducir el calor de hidratación y la retracción térmica.

Las adiciones se clasifican de acuerdo a su hidráulicidad:

TIPO 1	Inertes o seminertes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filler mineral (piedra caliza, dolomía etc.)</li> <li>• Pigmentos</li> </ul>
TIPO 2	Puzolanas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cenizas volantes conforme la EN 450</li> <li>• Humo de sílice conforme la PNE-prEN 13263</li> </ul>
	Hidráulicamente activas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escoria granulada de alto horno (Si no se emplea un cemento compuesto acorde a la norma UNE-EN 197-1, se aplicará la normativa nacional hasta que no se publique la nueva norma PNE-prEN 15167)</li> </ul>

En caso de usarse otras adiciones, que no sean las definidas para cementos compuestos en la norma para cementos UNE-EN 197-1, no podrá controlarse fácilmente la distribución de su tamaño de partícula y la composición de otros constituyentes del hormigón, por lo que será preciso aumentar los controles en las entregas.

El HAC se selecciona a menudo por su alta calidad de acabado y el buen aspecto superficial pero esto puede verse comprometido si la fuente de las adiciones no presentan una buena uniformidad en su color.

#### 7.3.1 Finos (fillers)

La distribución del tamaño de partícula, la forma y la absorción de agua de los finos puede afectar a la demanda de agua y, por tanto, la trabajabilidad en la elaboración del HAC. Los finos con base de carbonato cálcico (fillers calizos) son ampliamente usados y pueden dar excelentes propiedades reológicas y un buen acabado. Lo ideal es que el tamaño sea menor de 0.125 mm y en general es deseable que >70% pase por el tamiz de 0.063 mm. Finos especialmente molidos para esta aplicación ofrecen la ventaja de mejorar la uniformidad de la distribución del tamaño de partícula entre amasadas, dando un mayor control a la demanda de agua y siendo especialmente adecuados para el HAC comparado con otros materiales disponibles.

### 7.3.2 Cenizas volantes

Las cenizas volantes son una buena adición, puesto que se ha visto que aumentan la cohesión y reducen las variaciones de demanda de agua. Sin embargo, altos contenidos de cenizas volantes pueden provocar una fracción de pasta con tal cohesión que comporte una disminución de la fluidez.

### 7.3.3 Humo de sílice

El elevado nivel de finura y la forma prácticamente esférica del humo de sílice da una buena cohesión y aumenta la resistencia a la segregación. No obstante, aunque el humo de sílice es muy efectivo en la reducción o eliminación de exudación, puede aumentar los problemas de endurecimiento rápido superficial. Esto puede crear juntas frías o defectos de superficie si hay interrupciones en el suministro de hormigón y también disminuir la calidad del acabado superficial.

### 7.3.4 Escoria granulada de alto horno

La escoria granulada de alto horno es un elemento hidráulicamente activo, muy fino, con bajo calor de hidratación. Algunos cementos CEM II y CEM III contienen escoria granulada de alto horno pero también está disponible como adición en algunos países por lo que puede ser añadida a la mezcla. Elevadas proporciones de escoria granulada de alto horno afectan al HAC, con bajos niveles de estabilidad, con problemas de control de la consistencia, mientras que su lento fraguado puede incrementar el riesgo de segregación. Las escorias granuladas de alto horno están disponibles en algunos países como adiciones tipo I.

### 7.3.5 Otras adiciones

Metacaolín, puzolana natural, vidrio granulado, escoria refrigerada por aire y otros finos pueden ser usados o considerados como adiciones para el HAC pero deberán ensayarse minuciosamente y de forma individual los efectos en el hormigón a corto y largo plazo.

## 7.4 Áridos

La densidad de los áridos deberá ser conforme con la UNE-EN 12620 y cumplir los requisitos de durabilidad de la UNE 83900. Los áridos ligeros serán conformes a la UNE-EN 13055-1.

NOTA: Se estima que las partículas de áridos menores de 0.125 mm contribuyen al contenido de finos del HAC.

Es preciso controlar los áridos de forma minuciosa y continuada y tener en cuenta su contenido de humedad, su absorción de agua, su curva granulométrica y su variación en contenido de finos para producir un HAC de calidad constante. Normalmente el uso de áridos lavados dará un producto más uniforme. Cambiar la fuente de suministro de áridos provocará cambios en las propiedades del HAC, por lo que será precisa una reevaluación exhaustiva y minuciosa.

La forma y la distribución del tamaño de los áridos (coeficiente de forma) son muy importantes y afectan a la compacidad y al índice de huecos. Algunos métodos de formulación usan la porosidad de los áridos para determinar los volúmenes de pasta y mortero necesarios. En algunos diseños de mezcla se usan áridos de tamaño único o con discontinuidades en la granulometría entre áridos gruesos y finos.

### 7.4.1 Áridos gruesos

Son adecuados para la producción de HAC los áridos gruesos conforme a la UNE-EN 12620. Los áridos ligeros se han usado con resultados satisfactorios para el HAC aunque hay que considerar que los áridos ligeros flotarán si la viscosidad es baja y esto no se detectará mediante el ensayo de resistencia a la segregación en tamiz.

El separación de las armaduras es el factor principal en la determinación del tamaño máximo del árido. El bloqueo de áridos se evita mientras que el HAC fluya a través de la armadura y el ensayo de la caja en L indica la capacidad de paso de una determinada dosificación del HAC. El tamaño máximo del árido se limita generalmente a 12-20 mm, aunque en ocasiones se han usado tamaños máximos mayores.

La granulometría y la forma de los áridos gruesos influyen directamente en la fluidez y la capacidad de paso del HAC y en la demanda de pasta. Cuanto más esféricos sean los áridos (áridos rodados) menores serán los bloqueos y mayor la fluidez puesto que se reduce el rozamiento interno.

#### **7.4.2 Áridos finos / Arenas**

La influencia de los áridos finos en las propiedades del HAC fresco son mayores que las de los áridos gruesos. Las fracciones de partículas de menos de 0.125 mm se incluyen en el contenido de finos de la pasta y deberán también considerarse en el cálculo de la relación agua / finos.

Un alto contenido de pasta en mezclas de HAC ayuda a reducir las fricciones internas entre las partículas de arena aunque una buena distribución del tamaño de partículas es muy importante. Muchos de los métodos de diseño de mezcla de HAC usan mezclas de arenas para alcanzar una curva de áridos óptima y esto ayuda a reducir el contenido de pasta. Algunos productores prefieren arenas con curva granulométrica discontinua.

### **7.5 Aditivos**

Un componente esencial del HAC son los aditivos superplastificantes o reductores de agua de alta actividad conforme la UNE-EN 934-2 Tablas 3.1 y 3.2. Los aditivos moduladores de viscosidad (Viscosity Enhancer Admixture, VEA) se usan para ayudar a reducir la segregación y la exudación y la sensibilidad a la variación de otros constituyentes de la mezcla, especialmente para el contenido de humedad. Otros aditivos, incluidos los aireantes, acelerantes o retardantes se pueden usar del mismo modo que en el hormigón vibrado convencional, aunque al fabricante del aditivo debe advertir del uso e indicar el momento óptimo para la adición y deben ser conformes a la UNE-EN 934-2.

La elección del aditivo para una realización ideal estará influenciada por las propiedades físicas y químicas de las adiciones. Éstas pueden tener efectos en factores como la finura, el contenido en carbono, los álcalis y el  $C_3A$ . Se recomienda pues comprobar minuciosamente su compatibilidad si se quiere hacer algún cambio en estos constituyentes.

Los aditivos son normalmente regulares entre distintos lotes de entrega, pero si se cambia de proveedor o de tipo de aditivo del mismo fabricante esto tendrá un efecto significativo en la confección del HAC, por lo que deberá comprobarse escrupulosamente antes de cualquier cambio.

#### **7.5.1 Aditivos superplastificantes / reductores de agua de alta actividad**

Muchos de los fabricantes de aditivos disponen de un rango de aditivos superplastificantes adaptados a los requisitos específicos del usuario y los efectos de otros constituyentes de mezcla.

El aditivo debe dar aproximadamente la reducción de agua y la fluidez requeridas pero debe mantener el efecto de dispersión durante el tiempo necesario para el transporte y la aplicación. El mantenimiento de la consistencia requerida dependerá de la aplicación. El hormigón prefabricado requiere de un tiempo de mantenimiento de consistencia menor que el hormigón que deba ser transportado y aplicado en obra.

#### **7.5.2 Aditivos moduladores de viscosidad**

Los aditivos que modifican la cohesión del HAC sin alterar significativamente su fluidez son los llamados moduladores de viscosidad (VEA). Estos aditivos se usan para minimizar el efecto de la variación del contenido de humedad, finos en la arena o la distribución del tamaño de partículas del HAC, haciéndolo mucho más resistente a estos cambios y menos sensible a las pequeñas variaciones en las proporciones y

condiciones de otros constituyentes. Sin embargo, no se deben considerar como una forma de evitar una buena formulación de la mezcla y una selección minuciosa de otros constituyentes del HAC.

Por el momento la UNE-EN 934-2 no cubre los VEA aunque deben ser conformes a los requisitos generales de la Tabla 1 del UNE-EN 934-2. Además, el suministrador debe aportar certificados de lote de fabricación. EFCA da un borrador de ensayo para establecer la adecuación de los VEA (basada en la UNE-EN 934-2) en su web [www.efca.info](http://www.efca.info).

### **7.5.3 Aditivos aireantes**

Los aditivos aireantes se usan en la producción de HAC para aumentar la resistencia a los ciclos hielo - deshielo. También se usan para mejorar el acabado de bloques planos y son particularmente útiles para corregir un bajo contenido en finos en los HAC de baja resistencia.

### **7.6 Pigmentos**

Se pueden usar satisfactoriamente en el HAC los pigmentos conforme la UNE-EN 12878, poniendo atención y considerando las mismas limitaciones que en el hormigón vibrado convencional. Sin embargo, pueden afectar las propiedades en estado fresco por lo que no se añadirán a una mezcla existente de HAC sin ensayos previos.

En general, debido a la alta fluidez del HAC, la dispersión de los pigmentos es más eficiente y usualmente se alcanzan colores más uniformes por lote de fabricación o entre distintas amasadas. No obstante, el mayor contenido en pasta del HAC implica mayores dosis de pigmento para alcanzar una misma intensidad de color deseada.

### **7.7 Fibras**

Se pueden usar tanto las fibras metálicas como las poliméricas para la fabricación del HAC, pero reducen la caracterización de la fluidez y la capacidad de paso. Para establecer el tipo de fibra, la longitud y la cantidad óptimas, se precisa de ensayos previos para darle las propiedades requeridas tanto en estado fresco como endurecido.

Las fibras poliméricas se pueden usar para aumentar la estabilidad del HAC, puesto que ayudan a prevenir la decantación y fisuras debido a la retracción plástica del hormigón.

Las fibras de acero o las poliméricas largas se usan para modificar la ductilidad del hormigón endurecido. La longitud y cantidad se selecciona en función del tamaño máximo de árido y de los requisitos estructurales. Si se usan como sustitutos de la armadura habitual, no existe el riesgo de bloqueo pero hay que resaltar que el uso de HAC con fibras en estructuras con armadura convencional incrementa notablemente el riesgo de bloqueo.

### **7.8 Agua de mezcla**

Para las mezclas de HAC hay que usar agua conforme la PNE-EN 1008. Dónde se disponga de agua reciclada, recuperada de los procesos de la industria del hormigón, se toma el contenido característico y tendrá que considerarse en particular cualquier variación en el contenido de partículas en suspensión puesto que afectará a la uniformidad de la mezcla entre distintos lotes de fabricación.

## 8 Dosificación de la mezcla

### 8.1 Generalidades

La dosificación de la mezcla se elige para satisfacer todos los criterios de realización del hormigón, tanto en estado fresco como endurecido. En el caso del hormigón preparado, estos criterios se sustituirán por las especificaciones del comprador (contratista), encontrándose los requisitos en el Capítulo 6 de este documento.

### 8.2 Principios de diseño de la mezcla

Los principios que deberán seguirse para alcanzar las propiedades requeridas en una mezcla de HAC fresco son:

- Ajustar y hacer el balance de la fluidez y la viscosidad de la pasta mediante una selección y proporción estricta del cemento y las adiciones, limitando la relación agua / finos. A continuación añadir un superplastificante y (opcionalmente) un aditivo modulador de viscosidad. La clave para conseguir una buena capacidad de llenado, capacidad de paso y resistencia a la segregación es controlar correctamente estos componentes del HAC, su compatibilidad e interacciones.
- Para poder controlar el aumento de temperatura y las fisuras por retracción térmica al igual que la resistencia, los finos deberán contener una proporción significativa de adiciones Tipo I o II para mantener el contenido de cemento a unos niveles aceptables, o usar cementos con adiciones.
- La pasta es el vehículo para el transporte de los áridos; por tanto el volumen de la pasta deberá ser mayor que el volumen de huecos en los áridos puesto que así todas las partículas individuales de los áridos están totalmente recubiertas y lubricadas por una capa de pasta. Esto incrementa la fluidez y reduce la fricción de los áridos.
- La relación de gruesos y finos de los áridos en la mezcla se reduce para que cada partícula gruesa de los áridos esté plenamente recubierta por una capa de mortero. Esto reduce la posibilidad de bloqueo y segregación de los áridos cuando el hormigón pasa a través de aberturas estrechas o huecos entre la armadura e incrementa la capacidad de paso del HAC.

Con estos principios de diseño de mezcla se obtiene un hormigón que, comparado con un hormigón vibrado convencional, normalmente presenta:

- Menor contenido de áridos gruesos
- Mayor contenido de pasta
- Menor relación agua / finos
- Aumento de superplastificante
- Opcionalmente aditivos moduladores de viscosidad

### 8.3 Métodos de ensayo

Se ha desarrollado una amplia gama de métodos de ensayo para medir y caracterizar las propiedades del HAC en estado fresco. En la figura 8.1 se muestran los ensayos más comunes agrupados por la propiedad a la que valoran. En el Anejo B se encuentran los detalles de cinco de estos métodos. Estos son los métodos más aceptados en Europa y por los que las clases de especificaciones obtenidas se pueden asignar con confianza tal y como se detalla en el Anejo A. Las directrices de HAC de EFNARC detallan algunos de los otros ensayos de la Tabla 8.1, disponibles en la página web [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org) o bien en el informe patrocinado por la UE “Testing-SCC project”, dirigido por la Paisley University. La página web del proyecto es <http://www.civeng.ucl.ac.uk/research/concrete/Testing-SCC/>.

Ningún ensayo por si solo puede medir todos los parámetros clave, por lo que se requiere una combinación de los mismos para caracterizar plenamente una mezcla de HAC. El Grupo de Proyecto Europeo que ha redactado estas Directrices ha concluido que debería haber sólo unos pocos ensayos usados con finalidad de su normalización, por lo que se proponen los cinco métodos de ensayo detallados en el Anejo B ya que estos pueden relacionarse a los tipos especificados, como se detalla en el Anexo A.

Existen otros métodos de ensayo apropiados para el desarrollo de la mezcla de HAC, para la evaluación de características en relación a usos específicos y para ensayos de identificación in situ que pueden ser acordados entre el productor y el comprador.

El anillo japonés es un importante aspirante para la determinación de la capacidad de paso in situ, pero en el momento de redacción de estas Directrices, se creyó que era preciso su desarrollo antes de que sus tipos pudieran emplearse en especificación.

<b>Característica</b>	<b>Método de ensayo</b>	<b>Valor medido</b>
Caracterización de la fluidez / capacidad de llenado	Ensayo del escurrimiento	Extensión
	Caja de Kajima	Llenado visual
Viscosidad / Caracterización de la fluidez	T <sub>500</sub>	Tiempo de flujo
	Ensayo del embudo en V	Tiempo de flujo
	Ensayo del embudo en O	Tiempo de flujo
	Orimet	Tiempo de flujo
Capacidad de paso	Método de la caja en L	Relación de paso
	Método de la caja en U	Diferencia de altura
	Ensayo del escurrimiento con el anillo japonés	Altura de paso, flujo total
	Caja de Kajima	Capacidad de paso visual
Resistencia a la segregación	Penetración	Profundidad
	Segregación en tamiz	Porcentaje de retención
	Columna de decantación	Relación de segregación

**Tabla 8.1: propiedades de ensayo y métodos de evaluación del HAC**

Además de los métodos detallados en la Tabla 8.1, en el desarrollo de mezclas basado en laboratorios para calcular el flujo de los componentes de la pasta y del mortero del HAC se han usado un cono pequeño y ensayos de embudo. El pequeño cono truncado tiene 60 mm de altura con diámetros de 100 mm en la base y 70 mm en la parte superior. El embudo en V pequeño normalizado tiene una altura de 240 mm, un ancho de 270 mm y una profundidad de 30 mm estrechándose a 30 x 30 x 60 mm de sección mayor en la boquilla. El cono Marsh se usa para calcular la caracterización de la fluidez de los componentes de la pasta y del mortero.

#### **8.4 Diseño básico de mezcla**

Como no hay ningún método normalizado para el diseño de mezcla del HAC muchas instituciones académicas, fabricantes de aditivos, fabricantes de hormigón preparado, prefabricadores y contratistas han desarrollado sus propios métodos de diseño de mezcla.

Los diseños de mezcla a menudo usan el volumen como factor clave por la importancia de la necesidad de rellenar los huecos entre los granos de árido. Algunos métodos tratan de definir curvas granulométricas óptimas para el relleno de huecos existentes. Otro método es evaluar y optimizar la fluidez y la estabilidad de la pasta primero y luego la de las fracciones de mortero, antes de introducir las partículas gruesas de los áridos y entonces se prueba la mezcla completa del HAC.

Se puede encontrar más información sobre el desarrollo de mezclas y métodos de evaluación de las propiedades del HAC en las Directrices para HAC de EFNARC (disponibles y de descarga gratuita en [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org)).

Algunos métodos de diseño de mezcla desarrollados por investigadores u otras instituciones se han publicado en:

- Okamura H and Ozawa K. *Self-compactable high performance concrete*. International Workshop on High Performance Concrete. American Concrete Institute; Detroit. 1994, pp31-44.

**“Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante”**

- Ouchi M, Hibino M, Ozawa K, and Okamura H. *A rational mix-design method for mortar in selfcompacting concrete*. Proceedings of Sixth South-East Asia Pacific Conference of Structural Engineering and Construction. Taipei, Taiwan, 1998, pp1307-1312.
- Nawa T, Izumi T, and Edamatsu Y. *State-of -the-art report on materials and design of selfcompacting concrete*. Proceedings of International Workshop on Self-compacting Concrete. August 1998; Kochi University of Technology, Japan. pp160-190.
- Domone P, Chai H and Jin J. *Optimum mix proportioning of self-compacting concrete*. Proceedings of International Conference on Innovation in Concrete Structures: Design and Construction, Dundee, September 1999. Thomas Telford; London. pp277-285.
- Billberg, P. *Self-compacting concrete for civil engineering structures - the Swedish Experience*. Report no 2:99. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, 1999
- Su N, Hsu K-C and Chai H-W *A simple mix design method for self-compacting concrete* Cement and Concrete Research, 31, (2001) pp 1799-1807
- Gomes P.C.C, Gettu R, Agullo L, Bernard C, *Mixture proportioning of high strength, Self-Compacting Concrete: Performance and Quality of concrete structures*. Third CANMET/ACI Intl Conf. (Recefi, Brazil) Supplementary CD, 2002, 12p.
- Bennenk, H. W. & J.Van Schiindel: *The mix design of SCC, suitable for the precast concrete industry*. Proceedings of the BIBM Congress, 2002 Istanbul, Turkey.
- Billberg, P. *Mix design model for SCC (the blocking criteria)*. Proceedings of the first North American conference on the design and use of SCC, Chicago 2002.

No es objeto de estas Directrices dar consejos específicos en diseño de mezcla aunque en la Tabla 8.2 se da una indicación de los rangos típicos de los componentes del HAC por peso y volumen. Estas proporciones no son en ningún caso restrictivas y muchas mezclas de HAC pueden encontrarse fuera de rango en uno o más componentes.

<b>Componente</b>	<b>Rango típico por masa (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Rango típico por volumen (litros/m<sup>3</sup>)</b>
Finos	380 – 600	
Pasta		300 – 380
Agua	150 – 210	150 – 210
Áridos gruesos	750 – 1000	270 – 360
Áridos finos (arenas)	El volumen de otros constituyentes es usualmente un 45 – 55% del peso total de los áridos en dosificaciones equilibradas.	
Relación agua / finos por volumen		0.85 – 1.10

**Tabla 8.2 Rangos típicos de la composición de mezcla del HAC**

### **8.5 Enfoque del diseño de mezcla**

Para verificar las propiedades de una composición de mezcla inicial respecto a las características y clases especificadas hay que hacer ensayos previos de laboratorio. Si es preciso se harán entonces ajustes en la mezcla. Una vez que se cumplan todos los requisitos, la mezcla debe ensayarse a nivel industrial en la planta de hormigón y en obra si se precisara de una verificación de las propiedades en estado fresco y endurecido.

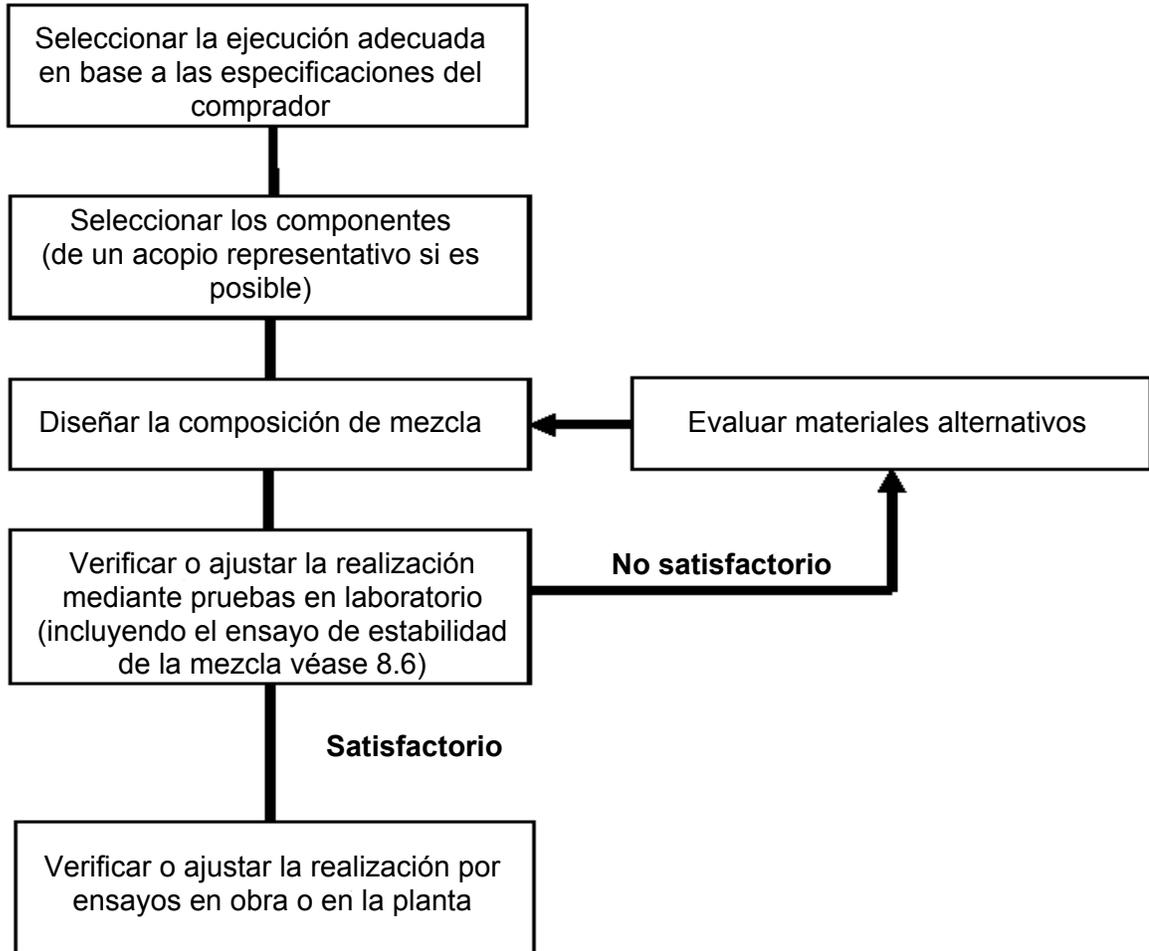
El diseño de mezcla se basa en los siguientes aspectos:

- Evaluar la demanda de agua y optimizar el flujo y la estabilidad de la pasta

**“Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante”**

- Determinar la proporción de arena y la dosis de aditivos para tener una consistencia estable
- Ensayar la estabilidad a pequeñas variaciones de proporciones
- Añadir una cantidad adecuada de áridos gruesos
- Producir el HAC en estado fresco en la amasadora de laboratorio, realizando los ensayos necesarios
- Hacer ensayos de las propiedades del HAC endurecido
- Hacer pruebas industriales en planta

El proceso de diseño se representa gráficamente en la Figura 8.3



**Figura 8.3 Procedimiento de diseño de mezcla**

En el caso de no obtener un resultado satisfactorio, se deberá considerar el rediseño de la mezcla base. En función del problema aparente, se seguirán los siguientes pasos:

- Ajustar la relación cemento / finos y agua / finos y ensayar el flujo y otras propiedades de la pasta
- Probar distintos tipos de adiciones (si es posible)
- Ajustar las proporciones de los áridos finos y la dosificación del superplastificante
- Considerar el uso de un agente modulador de viscosidad para reducir la sensibilidad de la mezcla
- Ajustar la proporción o granulometría de los áridos gruesos

Se pueden encontrar otras directrices para el caso de rendimientos insatisfactorios en el Anejo C **Mejora del acabado del HAC**.

## 8.6 Estabilidad en estado fresco

El objetivo del diseño de mezcla del HAC es alcanzar un equilibrio aceptable entre las características en estado fresco (fluidez y segregación). Cualquier variación en la uniformidad de los constituyentes puede afectar este equilibrio, resultando con ello a veces una falta de capacidad de llenado / paso o una segregación excesiva. Muchas de las variaciones en los constituyentes pueden neutralizarse con un cambio en la demanda de agua, ya que ésta varía debido tanto a cambios en el contenido de humedad de los materiales constituyentes como a su granulometría / superficie específica.

Un HAC bien diseñado puede dar una buena tolerancia a las fluctuaciones diarias de estos parámetros, disminuyendo con ello la presión a los controles de producción / ensayos y reduciendo la posibilidad de problemas en obra. Esta tolerancia se llama “estabilidad” y se controla con medidas de precaución constantes en la producción, almacenaje y manipulación de los componentes y mediante un contenido apropiado de los finos y/o mediante el uso de VEA.

Todos los HAC bien diseñados y estables pueden aceptar habitualmente cambios de 5 a 10 litros / m<sup>3</sup> en el contenido de agua sin salir de los tipos especificados en estado fresco. Cuando se diseña una mezcla de HAC, puede ser de ayuda ensayar a  $\pm 5$  y 10 litros del contenido nominal de agua y medir los cambios en las propiedades en estado fresco. Esto confirmará la estabilidad de la mezcla o indicará qué otros ajustes hay que realizar en el diseño.



Figura 8.4 Ensayo de resistencia a la segregación en tamiz

## 9 Producción de hormigón HAC preparado y elaborado en obra o en planta

### 9.1 Introducción

El HAC es menos tolerante a los cambios en las características de los componentes y a las variaciones entre cargas, que los hormigones de menor trabajabilidad. Por consiguiente, es importante que todos los procesos de producción y aplicación estén debidamente supervisados.

La producción del hormigón autocompactante debe llevarse a cabo en plantas en las que los equipos, operadores y materiales estén controlados y entrenados bajo un escenario de calidad adecuado. Es recomendable (de hecho indispensable en algunos países miembros de la Unión Europea) que los productores estén certificados con la UNE-EN ISO 9001 o equivalente.

Es importante que todo el personal involucrado en la producción y distribución del HAC reciba una formación adecuada y entrenamiento específico, antes de la producción industrial, de la mano de una persona con experiencia en el HAC. Dicha formación deberá incluir la observación y realización de ensayos de distintas amasadas.

### 9.2 Almacenaje de los componentes

Las condiciones de almacenaje de los componentes del HAC son las mismas que para el hormigón convencional. Sin embargo, debido a que la mezcla es más sensible a variaciones, deberán tenerse en especial consideración los siguientes puntos:

**Áridos:** deben ser debidamente almacenados con el fin de evitar mezclas por contaminación entre diferentes tamaños y tipos, protegiéndolos a la vez del ambiente para minimizar la fluctuación del contenido de humedad y el movimiento superficial de finos. Los aprovisionamientos de áridos lavados deberán almacenarse en paneles con tabiques que permitan el libre drenaje del exceso de humedad de los áridos y del agua de lluvia.

La capacidad de almacenaje de áridos tendrá que ser suficiente, puesto que cualquier interrupción significativa del suministro que provocara paros en la colocación podría causar serios problemas. Se recomienda cargar todos los acopios de materiales antes de la fabricación de un HAC.

**Cementos, adiciones y aditivos:** No existen requisitos especiales para su almacenaje a parte de los aplicados para el hormigón convencional. Será preciso seguir siempre las recomendaciones del fabricante. Es recomendable que todos los acopios de materiales sean llenados antes de la fabricación del HAC para evitar las variaciones potenciales en su elaboración.

### 9.3 Equipos de mezclado y ensayos de mezcla

El HAC puede ser producido en cualquier amasadora eficaz bien sea de palas (eje vertical), de gravedad (eje horizontal) o con camiones hormigoneras, aunque generalmente se prefieren las amasadoras de amasado forzado. Sin embargo, para el HAC es particularmente importante que la hormigonera esté en buenas condiciones mecánicas y que se asegure una carga completa y una mezcla uniforme de los materiales gruesos, con suficiente acción de corte para activar y dispersar el superplastificante.

La experiencia ha demostrado que el tiempo necesario para lograr una mezcla completa del HAC puede ser mayor que el de un hormigón convencional, debido a la reducción de las fuerzas de fricción y a la plena activación del superplastificante. Es importante llevar a cabo suficientes ensayos preliminares para establecer la eficiencia de las hormigoneras a nivel individual y la secuencia óptima de adición de los componentes. El volumen de hormigón para los ensayos preliminares a escala real no debe ser menor a la mitad de la capacidad del mezclador.

Antes del comienzo del suministro es recomendable que se realicen pruebas en la planta para asegurarse que, a plena producción, la mezcla cumple con los requisitos de especificación para las propiedades tanto del hormigón fresco como las del endurecido.

## 9.4 Procesos de mezclado en planta

El alto contenido de pasta y la fluidez de un HAC pueden hacer más difícil alcanzar una mezcla uniforme que para un hormigón de menor consistencia. La dificultad principal es la formación de “bolas” no mezcladas de material que una vez formadas son muy difíciles de deshacer. Dichas “bolas” tienden a formarse más cuando se trata de hormigoneras de gravedad (particularmente en camiones hormigonera) más que en amasadoras de amasado forzado. Este problema se puede evitar dosificando primero el hormigón a menor consistencia que el nivel del autocompactante hasta alcanzar una mezcla pastosa uniforme. La adición posterior de más agua y del superplastificante incrementará la consistencia al nivel requerido evitando ya la formación de “bolas”.

El momento de adición de un aditivo durante el amasado es importante, puesto que puede alterar su eficiencia. Cuando usamos VEA se prefiere una adición en la parte final del amasado. Hay que adoptar un procedimiento estándar en cada caso, siguiendo los ensayos de planta, y seguirlo estrictamente para reducir la variación entre amasados.

No hay que añadir directamente los aditivos a los componentes secos y hay que administrarlos junto o con el agua de amasado. No hay que mezclar nunca dos aditivos diferentes antes de introducirlos en la amasadora, a menos que esté específicamente aprobado por el fabricante de los dos aditivos. Esto afecta al potencial de mezcla de los distintos aditivos en la alimentación o las líneas de dosificación. Si se usan aditivos aireantes, es mejor añadirlos antes del superplastificante y mientras el hormigón tiene una consistencia baja.

Debido al fuerte efecto de los superplastificantes modernos, es importante la calibración regular de los equipos dosificadores y si se lleva a cabo la dosificación de los aditivos de forma manual, deberá emplearse un recipiente calibrado o un dosificador preciso. Cuando se requiera de más de una adición para completar una carga hay que tener medios automáticos para contabilizar las cantidades añadidas individualmente.

Durante la producción, hay varios factores que contribuyen de forma individual o colectiva a variaciones de la uniformidad. Los factores principales son cambios en la humedad de los áridos, la granulometría de los mismos y variaciones en la secuencia de dosificación. Cuando se introduzcan nuevas dosificaciones de otros componentes habrá que observar el cambio en las propiedades. Puesto que no es habitual identificar inmediatamente la causa específica, se recomienda que los ajustes de la fluidez se realicen mediante la variación del superplastificante.

Hay distintos modos de cargar la hormigonera, por lo que se presentan los siguientes ejemplos para obtener buenos resultados:

### 9.4.1 Amasadoras de gravedad y camiones hormigonera

Se añaden aproximadamente dos tercios del agua de la mezcla a la hormigonera. A continuación los áridos y el cemento. Cuando se tiene una mezcla uniforme, se añaden el agua de mezcla restante y el superplastificante. Cuando se use un VEA, hay que añadirlo después del superplastificante y antes del ajuste final de la fluidez con agua.

Los camiones hormigonera requieren un mayor tiempo de mezcla para el HAC puesto que son menos eficientes que las amasadoras de planta. Si se divide la carga en dos o más dosis puede aumentar la eficiencia de mezcla. Unas buenas condiciones del tambor del camión hormigonera y de sus palas son muy importantes para la elaboración de HAC, por lo que habrá que inspeccionarlas regularmente. La velocidad de rotación del tambor durante el ciclo de mezcla cumplirá con las especificaciones del fabricante, estando normalmente entre 10 – 15 rpm para el HAC.

### 9.4.2 Amasadoras de amasado forzado

Generalmente se añaden primero los áridos, junto con el cemento. Inmediatamente se introduce una gran parte del agua de mezcla y la dosificación completa del superplastificante. Si se usa un VEA éste se añade

con el resto del agua. La mayor capacidad de corte de la amasadora de amasado forzado aumenta la fluidez y es posible que se reduzca la dosificación del superplastificante respecto a la amasadora de gravedad.

Debido a la amplia gama de hormigoneras disponible, la metodología exacta para la alimentación tendrá que determinarse por ensayos industriales antes de empezar la producción.

## **9.5 Control de producción**

### **9.5.1 Componentes**

El HAC es más sensible a las variaciones físicas de sus componentes que el hormigón convencional y especialmente a los cambios en el contenido de humedad, granulometría y forma de los áridos, por lo que se llevarán a cabo mayores controles en la producción.

Se recomienda ensayar los áridos cada día de producción, previo inicio de la dosificación. A partir de entonces, se harán controles visuales en cada carga de áridos; cualquier cambio notable hay que evaluarlo antes de la aceptación del material o rechazar la entrega. Hay que controlar de forma continua el contenido de humedad de los áridos (son especialmente indicadas las sondas electrónicas) y ajustar la dosificación en función de las variaciones que se observen.

Cuando haya entregas de nuevos lotes de cemento, adiciones o aditivos, es necesario realizar controles adicionales para detectar cualquier cambio significativo o interacciones entre componentes.

### **9.5.2 Producción**

La producción y suministro del HAC estará sujeta a los controles de producción normales bajo la responsabilidad del productor, y en el caso del hormigón preparado, éste debe estar conforme a los acuerdos de contrato entre el comprador y el productor y los requisitos de la UNE 83900, apartado 9.

El tipo de aplicación determinará las características específicas y las clases que el comprador debe especificar al productor. El control de producción tiene que asegurar el cumplimiento durante la producción y hay que comunicar cualquier valor fuera de los parámetros especificados al operador de la planta o Director Técnico.

Si no existe experiencia previa con el diseño particular de una mezcla, se dispondrán recursos adicionales para la supervisión y control de todos los aspectos de la producción y los ensayos iniciales del HAC.

Para asegurar unas propiedades autocompactantes estables, se recomienda que el productor ensaye cada carga mediante el asentamiento mientras no se obtengan resultados estables. Habrá que realizar los demás ensayos para confirmar el cumplimiento de todas las especificaciones de contrato. Posteriormente, hay que hacer una inspección visual de cada carga antes del transporte al lugar de colocación en obra, y los ensayos usuales con la frecuencia especificada en el Anexo A. Hay que tener especial cuidado con la recepción de cada entrega de componentes, especialmente con los áridos. Por ejemplo, habrá que ajustar el contenido de agua para compensar la variación de humedad de los áridos.

## **9.6 Transporte y entrega**

Una de las principales ventajas del HAC es que aumenta la velocidad de colocación. Por ello, es esencial hacer un análisis de la capacidad de producción de la planta, la jornada laboral y la capacidad de colocación en obra para asegurarse que el personal podrá aplicar el hormigón sin interrupciones de suministro y dentro de su tiempo de consistencia garantizada. Un paro en la producción puede provocar tixotropía o formación de un velo superficial en el hormigón ya colocado y ello puede afectar notablemente a la capacidad de llenado cuando se reinicie el vertido y / o provocar juntas frías en la superficie.

## 9.7 Recepción en obra

En el caso del hormigón preparado, es importante que haya un procedimiento estandarizado, aceptado y documentado, para la recepción y aceptación del HAC en obra. El productor y el especificador deben estar de acuerdo con el procedimiento al inicio del contrato de suministro. Éste incluirá la inspección visual de cada lote de hormigón y cualquier ensayo específico y parámetros de conformidad que se determinen.

La UNE 83900 requiere que el productor ensaye el hormigón como mínimo con la frecuencia definida en la UNE 83900 para la fluidez, resistencia y otras propiedades. Esto se define como “Ensayo de conformidad”.

Para hacer los ensayos, el productor puede agrupar los hormigones por familias, pero mientras no haya más experiencia con el HAC, no es recomendable combinarlo con familias de hormigones convencionales.

En el Anexo A se dan las relaciones mínimas de ensayo de las propiedades del HAC fresco y define la frecuencia habitual de ensayo dada en la UNE 83900 para las propiedades del hormigón endurecido. Si se requieren ensayos adicionales para probar cada carga para una mayor seguridad (véase 9.5.2) mientras no se alcanza la uniformidad requerida, deberá incluirse en el contrato de suministro.

Como alternativa, el especificador puede realizar ensayos adicionales, normalmente llamados “ensayos de contraste”. En el Anexo A se da el criterio de aceptación/rechazo.

El procedimiento documental debe incluir detalles de responsabilidad de los ensayos al igual que un procedimiento de actuación en caso de no-conformidad:

- El especificador debe asegurarse de que todos los ensayos de contraste se llevan a cabo por personal competente y entrenado, en una zona libre de vibraciones y protegida de las inclemencias del tiempo. Los equipos deben presentar un mantenimiento correcto y estar calibrados, y la zona de realización de ensayos dispondrá de un área suficiente para una correcta realización.
- El hormigón debe ser reamasado en el camión hormigonera como mínimo un minuto (alta velocidad) antes de tomar una muestra representativa.
- El muestreo será en todo momento conforme con lo indicado en la EN-12350-1. El primer HAC de un camión hormigonera no es representativo. (NOTA: Cuando no se pueda obtener una muestra representativa, hay que incrementar las tolerancias definidas en el Anexo A).
- Cuando se tomen muestras de HAC para un ensayo de compresión u otros, el molde de la probeta debe ser rellenado en una sola fase y sin compactación.

El ensayo recomendado para caracterizar el HAC en obra es el ensayo de asentamiento. Da una muy buena indicación de la uniformidad del hormigón entregado. El ensayo de asentamiento mide la fluidez y por tanto la habilidad de llenado del hormigón. Una inspección visual sirve para detectar cualquier indicio de separación del mortero/pasta en la zona perimetral y cualquier separación de áridos en el área central da indicaciones de la resistencia a la segregación.

Tendrá que hacerse una observación continua del hormigón colocado para controlar la efectividad de llenado y cualquier indicio de atasco, segregación o decantación.



Figura 9.1. Ensayo de escurrimiento

## **10 Preparación y requisitos en obra**

### **10.1 Introducción**

Antes de la entrega del hormigón, el contratista / usuario debe asegurarse que se han llevado a cabo las preparaciones apropiadas en obra. Estas pueden incluir:

- Confirmación que el HAC es adecuado para el trabajo (véase Capítulo 6)
- Que se puede colocar el hormigón en su lugar a la velocidad de suministro acordada
- Que los procedimientos de recepción para el HAC están aceptados y documentados
- Que el personal está entrenado con los requisitos específicos de aplicación del HAC
- Que el encofrado está debidamente preparado

### **10.2 Control en obra**

Hay que generar y seguir un procedimiento de control de calidad en el lugar de trabajo para la aceptación del HAC (véase Cláusula 9.7).

Se recomienda comprobar cada entrega de HAC mediante el ensayo de asentamiento antes de confirmar la uniformidad de la mezcla. Normalmente es suficiente una valoración visual por una persona experta a menos que una entrega sea puntual. Como se requiere que el productor lleve a cabo ensayos de conformidad, generalmente serán innecesarios ensayos de recepción adicionales, por lo que se restringirán a aplicaciones críticas.

### **10.3 Ajuste de mezcla**

En general, no es deseable modificar el HAC en obra puesto que el productor tiene que ser capaz de suministrar la mezcla especificada con las propiedades requeridas. Sin embargo si se dan circunstancias especiales o se esperan / planifican ensayos para optimizar la mezcla en configuraciones del encofrado específicas y en los acabados superficiales, será prudente establecer un procedimiento ampliamente documentado para minimizar los ajustes del hormigón, bajo supervisión en la obra.

Los técnicos de hormigón del suministrador deberán controlar y evaluar el ajuste bajo su responsabilidad. Se registrarán todas las modificaciones.

- Se pueden readicionar aditivos en obra antes de la colocación del HAC, siempre que los efectos hayan sido plenamente probados.
- Los hormigones que se ensayen con el ensayo de asentamiento fuera del criterio de conformidad (véase Anejo A, tabla A.6) se corregirán sólo si hay un comportamiento aceptado y documentado. Cualquier adición de componentes en el camión hormigonera requiere de un tiempo mínimo de mezcla probado para el hormigón (p.e. 1 minuto para cada metro cúbico con un mínimo de 4 minutos).

### **10.4 Supervisión y cualificación**

Es esencial que el personal de obra que intervenga en el hormigonado con HAC haya sido entrenado e instruido para los requisitos específicos de aplicación de este tipo de hormigón.

El personal de obra deberá conocer las advertencias dadas en el Capítulo 10 y 11 de estas Directrices con particular énfasis en los siguientes puntos:

- Efecto de las vibraciones en la estabilidad de la mezcla
- Velocidad de aplicación
- Efecto de la interrupción / parada durante la colocación
- Acciones a llevar a cabo si ocurre interrupción / parada
- Observación de atascos, segregación o liberaciones de aire
- Requisitos para colocar por bombeo, cubilote o canaleta (vertido directo), incluyendo la posición de inducción del flujo

- Acabado de superficies y curado

## 10.5 Presión al encofrado

La presión al encofrado depende de la característica de la fluidez y la cohesión del HAC, y aumenta verticalmente de abajo a arriba. El diseño de encofrado, incluyendo soporte y sistemas de fijación, se asume que soporta toda la presión hidrostática del hormigón. Si se bombea el HAC desde abajo entonces localmente, la presión puede estar por encima de la hidrostática cerca del punto de entrada de la bomba, especialmente durante los reinicios si hay una interrupción durante el bombeo.

Las pruebas han demostrado que, con un nivel adecuado de tixotropía se puede alcanzar una presión en el encofrado inferior a la hidrostática cuando se vierte desde arriba, pero hay que basarse en pruebas de verificación y acuerdos entre el contratista, el productor del HAC y el suministrador del encofrado.

Referencias:

- Andreas Leeman, Cathleen Hoffman. *Pressure of self-compacting concrete on the formwork*. EMPA, Swiss Federal Laboratories of Materials Testing and Research, Switzerland.
- Peter Billberg. *Formwork pressure generated by self-compacting concrete*. Swedish CementResearch Institute, CBI.
- Wolfgang Brameshuber, Stephan Uebachs. *Investigations on the formwork pressure using selfcompacting concrete*. Institute of Building Materials Research (ibac) Aachen University.

## 10.6 Diseño de encofrado

La ausencia de vibraciones permite algunos detalles de encofrados novedosos como los desarrollados por componentes metálicos del encofrado unidos magnéticamente. Esto puede ser particularmente interesante para elementos prefabricados donde existan diseños complejos con detalles de superficie intrincados. Se pueden fabricar formas inusuales o complejas que no serían posibles con hormigón vibrado convencional.

La alta característica de la fluidez del HAC puede provocar la flotación de alguna unidad del encofrado, cierres o embebidos que no han sido debidamente fijados. Hay que prestar especial atención en la fijación y el sellado del encofrado en la base donde el apoyo pueda ser un problema. Pueden producirse fugas en las juntas y reducir por otro lado la alta calidad de acabado, sin embargo siempre habrá menos fugas que en el hormigón vibrado convencional.

Puesto que hay que asumir la plena presión hidrostática con el HAC, hay que tener especial atención en los soportes externos y el sistema de fijación y espaciado para asegurar que no pueden deformar el encofrado durante la colocación.

## 10.7 Preparación del encofrado

El HAC produce normalmente un acabado de alta calidad siendo una fiel reproducción del encofrado. Esto da la oportunidad de mejorar el diseño pero si no se tiene cuidado, el HAC ha demostrado deficiencias en los materiales de encofrado, acabados o el desencofrante y esto en detrimento del acabado final. Con el HAC será más notable el movimiento de juntas o la curvatura del encofrado por la presión del hormigón.

La buena preparación de encofrado así como los extremos que se detallan a continuación son importantes para todos los tipos de hormigón pero son esenciales si se realizan los acabados superficiales del HAC.

### 10.7.1 Agentes desencofrantes

La aplicación del HAC requiere explícitamente de un tipo de producto y de una aplicación esmerada del desencofrante en la superficie del molde, debido a su habilidad de alcanzar una alta calidad de acabados superficiales. Muchos de los encofrados usados con HAC serán de acero o madera fenólica laminada. Ambos tipos de superficies no son absorbentes. Un exceso de desencofrante en la superficie del encofrado o en la interfase con el hormigón puede provocar manchas, retención de burbujas de aire u otras imperfecciones superficiales.

Los desencofrantes de moldes de base vegetal, mineral o acuosa deben aplicarse con una capa uniforme muy fina, y se recomienda la retirada con un trapo del producto depositado en exceso. Los desencofrantes que se empleen no pueden ser diluidos o adulterados bajo ningún concepto.

El HAC permite que el aire atrapado salga entre el hormigón y el encofrado. Consecuentemente, el encofrado será de tal forma que permitirá la salida del aire ocluido en el hormigón de una forma controlada.

Alguno desencofrantes, aplicados en un encofrado no absorbente, son demasiado viscosos para permitir una salida del aire ocluido y esto puede provocar pequeñas coqueas superficiales en el hormigón. Sin la ejecución de ensayos preliminares, los desencofrantes se usarán sólo en encofrados absorbentes o semiabsorbentes para asegurar la calidad del acabado superficial.

El tipo de encofrado puede condicionar la aplicación, el tipo de desencofrante y el modo de empleo.

### **10.7.2 Encofrado de madera natural**

Si se requiere un buen acabado, hay que evitar el empleo de madera seca o completamente nueva ya que esta es muy absorbente y puede crear reacciones químicas, dar lugar a manchas o provocar retardos de fraguado en la superficie de hormigón. Cualquier defecto superficial de la madera y los efectos de vetas se reflejarán en la superficie del hormigón y cualquier rotura que se produzca en la madera quedará reflejada en la superficie del hormigón.

Los encofrados de madera nuevos deberán estar bien acabados, sellados y con un desencofrante altamente activo. La madera sin tratar deberá humedecerse previamente y será preferible tratarla con lechada de cemento diluido que la sellará y reducirá el riesgo de manchas o de retardos de fraguado debido a los azúcares existentes en la madera.

Con un encofrado de madera que ya tenga varias puestas, la cantidad de desencofrante a aplicar deberá reducirse para evitar manchas en la superficie.

### **10.7.3 Encofrados de madera fenólica y metálicos**

Estos materiales no son absorbentes o tienen una capacidad de absorción muy baja. Es importante aplicar cuidadosamente una capa de desencofrante fina y continua de un producto de buena calidad. En encofrados extremadamente lisos, como los de grandes muros, el desencofrante tiende tendencia a reagruparse formando gotas. Para un acabado óptimo, hay que seguir estrictamente las indicaciones del fabricante.

## **10.8 Encofrado para hormigonado de abajo a arriba**

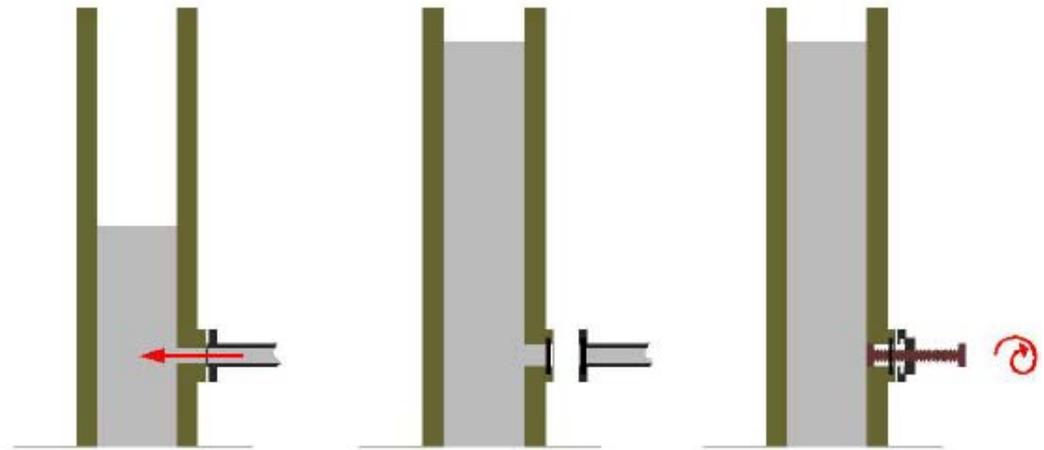
El HAC permite métodos nuevos de colocación del hormigón, incluyendo su inyección de abajo hacia arriba. En este caso la bomba se conecta, mediante una pieza especial unida al encofrado y provista de válvula de cierre. En este caso el encofrado estará calculado para aguantar como mínimo la plena presión hidrostática de toda la columna del HAC.

Si es posible, el punto de inyección del bombeo debe estar situado en el centro del muro a hormigonar, para minimizar la distancia horizontal a recorrer. La distancia horizontal a recorrer desde el punto de bombeo dependerá del armado y de la capacidad de flujo del HAC y tendrá que estar aprobado por el suministrador del HAC.

La altura máxima de los elementos a hormigonar depende de la máxima presión que el encofrado pueda soportar y tiene que ser acordada con el suministrador del sistema de encofrado.

Al finalizar el bombeo desde abajo, la válvula de compuerta se cierra y se bloquea. En este momento, el hormigón sobrante puede ser empujado por la parte interior del encofrado mediante una válvula especial.

Véase la Figura 10.1. Como alternativa, el hormigón sobrante se puede eliminar y hacer un buen acabado superficial después de retirar el encofrado.



**Figura 10.1:** Al finalizar el bombeo desde abajo, el hormigón sobrante puede ser retirado por la parte interior del encofrado mediante una válvula especial o la superficie se podrá acabar después de retirar el encofrado.

## **11 Aplicación y acabado en obra**

### **11.1 Introducción**

El HAC se diseña para tener una alta fluidez, combinada con unas características de cohesión que aseguren una suspensión uniforme de los áridos y que no se produce segregación. El empleo de vibraciones afectará este equilibrio y producirá una segregación importante. Por esta razón, los equipos de vibrado no se usarán en el HAC excepto en los casos especiales descritos en el Apartado 11.6. Hay que poner especial atención a las fuentes externas de vibraciones que puedan existir, como por ejemplo equipos próximos.

Durante la colocación, hay que comprobar regularmente el HAC para asegurar que los áridos gruesos permanecen o están muy cerca de la superficie y que no se observan indicios de segregación. El HAC forma un frente de avance regular con un ángulo superficial determinado y se puede observar el flujo completo y próximo a las barras de las armaduras sin formar pequeños vacíos. No debe producirse un burbujeo excesivo con grandes burbujas de aire que indiquen que el aire está quedando atrapado en el proceso de colocación. Hay que vigilar la fuga de lechada en las juntas del encofrado.

Después de completar la primera fase de un trabajo hay que comprobar y evaluar la calidad del hormigón endurecido, tanto por parte del productor como del especificador. Hay que comprobar las lechadas superficiales, el color no uniforme de las superficies, áreas concretas donde el aire quede atrapado y otros aspectos no deseables que sean visibles.

Una característica del HAC es la alta calidad del acabado superficial, pero una superficie sin burbujas, manchas o descolorido requiere de más elementos que únicamente el buen diseño de mezcla y calidad del HAC. No hay directrices por el momento de cómo obtener de forma fiable y uniforme un excelente acabado superficial usando HAC. Sin embargo, la superficie del encofrado no deberá presentar deformaciones y la ejecución de los trabajos y el tratamiento de acabado serán de la mejor calidad posible. Los colocadores del HAC, igual que los directores de obra / encargados, etc. deben entender y tener en cuenta la importancia de cada elemento por separado de la ejecución, y llevarla a cabo con eficiencia.

Es esencial que el personal de obra que intervenga en el hormigonado con HAC haya sido entrenado e instruido en los requisitos específicos para la aplicación de este tipo de hormigón.

### **11.2 Descarga**

No hay que iniciar los trabajos de descarga en la obra si antes no se han realizado los ensayos de comprobación (véase capítulo 9.7).

El HAC puede ser colocado directamente desde la descarga del camión hormigonera mediante una canaleta. Como alternativa también se puede descargar en un embudo con una tubería o por bombeo. Hay que disponer de un tanque de recepción con agitador si se desea almacenar el HAC por algún tiempo.

### **11.3 Proceso y velocidad de colocación**

Antes de colocar el HAC, hay que verificar que la armadura y el encofrado han sido colocados según los planos y que el encofrado está limpio y libre de suciedades.

La velocidad de descarga del hormigón en el encofrado estará relacionada con la densidad de armado, las características de fluidez del hormigón y el posible efecto de oclusión de aire en el vertido.

Un recorrido razonable del flujo ayuda a prevenir excesos de aire atrapado. Sin embargo un recorrido del flujo mayor de 10 metros tiene un alto riesgo de segregación dinámica o formación de huecos y coqueas.

Un elevado ritmo de colocación en vertical no dará tiempo suficiente al aire para subir a la superficie y poder salir, originando un aumento del número de huecos y coqueas de aire atrapado en el hormigón y burbujas superficiales.

El proceso de llenado será continuo y sin interrupción puesto que ayuda a mantener el flujo y reduce las juntas frías en la superficie y variaciones de color.

Algunos HAC, especialmente los de bajo flujo (mayor  $T_{500}$  o tiempo del embudo en V), tienen tendencia a gelificar por tixotropía, causando tensiones superficiales en reposo, pero manteniendo la característica de la fluidez si hay suficiente energía de corte o se produce amasado. Se puede evitar la gelificación por tixotropía manteniendo el hormigón en proceso de amasado durante el transporte a obra y antes de su vertido. Se colocará en obra sin interrupciones y el punto de hormigonado estará situado de forma que mantenga el frente de llenado en movimiento constante. Una vez acabada la colocación, la gelificación por tixotropía puede ser ventajosa puesto que reduce las fugas en las juntas y la presión del encofrado una vez finalizado el movimiento de flujo del HAC.

El HAC tiene una mayor cohesión y menor tendencia a la segregación que un hormigón convencional, pero la caída libre del hormigón en la colocación puede causar segregación y aumentar el contenido de aire ocluido por lo que se evitará en la medida de lo posible. Si es del todo inevitable, se limitará la altura de caída libre y se efectuarán ensayos previos para determinar el efecto.

Cuando se hormigonan grandes áreas horizontales donde una parte del área total a hormigonar deba acabarse antes de llenar las áreas sucesivas, deben efectuarse largas interrupciones. En estos casos el empleo de reglas metálicas es muy aconsejable para un buen acabado del HAC.



**Figura 11.1: Llenado de una losa de HAC. Centro comercial, Ferrata, Italia.**

#### 11.4 Colocación por bombeo

El bombeo es el método más usado para la colocación del HAC y por lo tanto del que se dispone de mayor experiencia acumulada.

Si la tolva de recepción de la bomba no se ha preparado con mortero de cemento, la primera parte de la carga (100-150 litros) debe pasarse por la bomba y la tubería y ser reciclados de nuevo a la hormigonera. Esto lubrica la líneas de bombeo, mientras que los áridos gruesos residuales se remezclan en el tanque del camión hormigonera del HAC.

El HAC es adecuado para la inyección por bombeo a través de una válvula adecuada en la parte inferior del encofrado, puesto que tiene una buena resistencia a la segregación. Este método da una superficie de acabado del hormigón lisa y limpia, y es muy empleado para la construcción de edificios con sistemas de encofrados y también en revestimiento de túneles y pilares. También se usa en los hormigonados perimetrales a estructuras de hormigón existentes en obras de refuerzos.

El bombeo desde la parte inferior del encofrado a través de válvula es el que da mejor superficie de acabado para cualquier elemento vertical. Este sistema ocluye menos aire en el hormigón y permite además un mayor ritmo de bombeo que vertido desde arriba. La tolva y la bomba estarán llenas de hormigón para asegurar que no se introduce aire en la parte inferior. Hay que recordar que el reinicio después de una parada puede provocar un aumento de la presión de encofrado.

Después de bombear desde abajo, la válvula se cierra y se bloquea. El hormigón sobrante se puede eliminar una vez sacado el encofrado pero existen sistemas especiales para lograr una superficie lisa de acabado sin ser necesarias más acciones después de retirar el encofrado (véase Apartado 10.8).

Cuando se bombea desde arriba, y se desea obtener un buen acabado superficial, se colocará el HAC con una manguera sumergida (trompa) para minimizar la posibilidad de oclusión de aire. El llenado empezará por la parte más baja del encofrado, en un lugar donde la manguera de bombeo se pueda localizar tan cerca como sea posible de la parte inferior del encofrado. Cuando se alcanza una profundidad suficiente, la manguera queda sumergida en el hormigón. El final de la manguera se mantendrá siempre, si es posible, por debajo de la superficie del hormigón, incluso en los cambios de ubicación así nunca se introduce aire en la manguera.

Hay que controlar la velocidad de bombeo para tener un ritmo continuo de hormigonado y una superficie llana de subida del hormigón en el encofrado, efectuando el mínimo corte de suministro posible.

#### 11.5 Colocación con tolva o cubilote

Aunque se recomienda el bombeo para la colocación el HAC, tanto la tolva como el cubilote han sido empleados con éxito. Cuando se descarga con tolva, la salida de la misma se dirigirá al punto más alejado del hormigonado y se irá acercando conforme avance el proceso de colocación.

Cuando se coloca el HAC desde una grúa y con cubilote hay que considerar los siguientes puntos:

- El método del cubilote es adecuado para unidades relativamente pequeñas o muros cortos por la capacidad de aplicación (usualmente 10-20 m<sup>3</sup>/hora), pero depende del tamaño del cubilote de hormigón y de la maniobrabilidad de la grúa.
- El cubilote debe ser hermético para prevenir pérdidas de mortero o pasta durante el transporte
- El cubilote no debe sufrir vibraciones o excesivas agitaciones para evitar la segregación del hormigón.
- Una estancia prolongada de la masa en el cubilote puede causar bloqueo tixotrópico por lo que no caerá del cubilote de manera espontánea cuando se abra para la compuerta de descarga.

- Un ritmo lento de suministro puede provocar largos periodos sin flujo en el interior del encofrado provocando incrustación superficial o bloqueo tixotrópico, que puede llevar a juntas frías horizontales visibles entre descargas.
- Cuando se rellenan muros altos o esbeltos se llenará a través de un tubo (trompa) o una manguera flexible desde el cubilote. El uso de mangueras flexibles en vez de tubo rígido ayuda a que ésta se mantenga llena y evita la entrada de aire en el hormigón, y esto es especialmente importante si se requiere de un buen acabado superficial. Si se usa un tubo rígido, la salida de éste se mantendrá siempre por debajo de la superficie del HAC y se tendrá especial cuidado en asegurar que no entra aire en el hormigón.

### **11.6 Vibrado**

Se evitará siempre el vibrado en HAC ya que tiende a provocar una sedimentación importante de los áridos gruesos. Si no se alcanzara la compactación deseada, hay que recomprobar antes la conformidad del hormigón de acuerdo con las especificaciones. Si está conforme pero no se llega a la compactación completa, hay que considerar un cambio en las especificaciones.

En algunas ocasiones se necesita de un vibrado bien controlado y suave:

- En algunas estructuras la forma del encofrado puede originar aire atrapado en algunas zonas. Se puede sacar normalmente con un golpeteo localizado o por simple varillado del área afectada.
- Las losas, especialmente las rellenas con HAC de la menor clase de asentamiento requieren de una ligera compactación o sutil vibración con barra para dar un buen nivel de acabado, libre de las protuberancias que producen los áridos gruesos.
- La reanudación después de un paro en la aplicación si la superficie que debe fluir está endurecida de forma que pueda producir una junta fría o una mancha superficial.

### **11.7 Acabado de losas**

Las losas normalmente requieren de menor clase de asentamiento que los muros o pilares. Su consistencia, en combinación con la falta de lechada y tendencia a manchas por tixotropía pueden hacer que el hormigón sea viscoso y difícil de trabajar. La fase de acabado debe iniciarse tan pronto como se alcance la cota de acabado, y antes de que se inicie la formación de manchas por tixotropía y secado de la superficie.

Se ha demostrado que las reglas y las barrillas vibrantes son efectivas en el enrasado del HAC siempre que esta no esté inclinada, también se puede hacer el acabado a mano si hay riesgo de segregación de áridos. Las reglas de acero funcionan mejor que las de madera o las de espuma de poliuretano.

Si la pendiente superficial de la losa es mayor del 2-3 % hay que tener mucho cuidado con el empleo del equipo de vibrado ligero ya que puede causar fugas laterales u otros movimientos indeseados del HAC aún en estado fresco.

La nivelación de las losas se hará mejor con la ayuda de una regla superficial manual (véase Figura 11.1). Esto activa la superficie del hormigón y da una compactación suficiente, sin provocar la segregación indeseada de los áridos. Una consistencia y ejecución correcta del hormigón darán una superficie nivelada y lisa sin enriquecer excesivamente la matriz superficial. El uso de aditivos aireantes ha dado buenos resultados de acabado superficial en algunos casos.



**Figura 11.1 Nivelado del HAC con una regla flotante**

El acabado final con el uso de paletas metálicas giratorias (helicóptero) hay que realizarlo igual que en el hormigón vibrado convencional. Sin embargo, la determinación del momento adecuado de aplicación será más difícil ya que puede producirse un fortalecimiento superficial tixotrópico aparente.

### **11.8 Curado**

El curado es importante en todos los hormigones pero lo es más especialmente aún en los elementos hechos con HAC para alcanzar un buen acabado superficial. Éste puede secar rápido por la mayor cantidad de pasta, la baja relación agua / finos y la falta de lechada en la superficie. El curado superficial se iniciará tan pronto como sea posible después de los trabajos de colocación y acabado para minimizar el riesgo de fisuración superficial y formación de grietas en la fase plástica causadas por la evaporación temprana del agua.

## 12 Elementos de hormigón prefabricado

### 12.1 Introducción

La industria del hormigón prefabricado suministra a sus clientes productos de hormigón ya endurecido que son montados en obra y que, dependiendo del diseño estructural, pueden estar combinados con hormigón a colocar en obra. El proceso se inicia cuando el cliente especifica las propiedades requeridas de la estructura o del producto de hormigón prefabricado.

### 12.2 Especificación de elementos de hormigón prefabricado con HAC

Para elementos estructurales, los requisitos de especificación estarán conforme a los aspectos más pertinentes armonizados en la normativa (basado en la PNE-EN 13369: *Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón*) o cuando sea de aplicación, directamente con la PNE-EN 13369 que afecta a las partes pertinentes de la PNE-EN 1992 (Eurocódigo 2) y a la UNE 83900.

Las propiedades del hormigón fresco las define el fabricante, en función de los requisitos del producto o de las características del proceso de producción.

Cuando hay que especificar las características en fresco del HAC para la prefabricación de una aplicación concreta, el HAC se especificará conforme el Capítulo 6 de este documento y el sistema de clasificación detallado en el Anexo A.

Los requisitos de durabilidad y recubrimiento del hormigón son los mismos que para el hormigón vibrado convencional y se definen en la correspondiente normativa de productos y / o en la PNE-EN 13369.

### 12.3 Diseño de la mezcla de HAC para elementos de hormigón prefabricado

La especificación inicial del hormigón para aplicaciones prefabricadas consiste normalmente en encontrar la clase de exposición y la resistencia a compresión característica a los 28 días. Sin embargo, para el fabricante, los requisitos de resistencia a edad temprana serán los más importantes, para permitir los trabajos de desmoldeo, pretensado o movimiento del elemento dentro del ciclo de producción.

Los componentes se deberán escoger de acuerdo con el Capítulo 6 y además, con cualquier otro requisito de la normativa específica del producto a elaborar y / o la PNE-EN 13369.

El diseño de la mezcla debe de alcanzar previamente los requisitos definidos para el HAC endurecido, combinado con las propiedades necesarias del HAC fresco como son la fluidez, viscosidad y estabilidad, dependiendo de las condiciones de colocación y acabado.

El tiempo reducido de transporte y colocación que se requiere, normalmente no más de 30 minutos, significa que no es precisa una larga retención, permitiendo el uso de HAC de corto tiempo de consistencia, rápida colocación y rápido desarrollo de resistencias iniciales. Este rápido inicio del proceso de fraguado es beneficioso para las resistencias tempranas que se requieren para mantener el ciclo de producción, normalmente  $14 \pm 2$  horas.

Se alcanza una mayor resistencia temprana del HAC con un diseño específico de mezcla y/o por curado a vapor.

Las plantas de hormigón prefabricado normalmente desarrollan unas mezclas de diseño específicas para cada tipo de producto. Estas mezclas específicas se pueden modificar por requisitos concretos. El diseño de la mezcla del HAC prefabricado se basa en la propuesta dada en el Capítulo 8.

## 12.4 Moldes

Los tipos de molde, si son de acero para numerosos usos o de madera para usos limitados, no variarán notablemente de los empleados para hormigón vibrado convencional para la mayoría de productos prefabricados.

La falta de vibración permite la introducción de algunos detalles novedosos en el encofrado como son placas de metal en el encofrado unidas magnéticamente. Esto es particularmente útil para aplicaciones de HAC prefabricado donde puede hacerse un diseño de detalles produciendo un producto mejorado con intrincados detalles superficiales. Se podrán producir placas singulares o complejas que no son posibles con el hormigón vibrado convencional.

El uso de HAC permite que algunos productos sean llenados de una vez cuando el hormigón vibrado convencional requiere de un día de interrupción del llenado.

Aunque el desgaste será menor por la ausencia de vibradores de masa o de contacto, la robustez y resistencia del molde dependerá de la presión del hormigón durante el llenado y debe resistir plenamente la presión hidrostática (véase Apartado 10.5).

Se da más información en los apartados 10.6 y 10.7 sobre el diseño del molde, la preparación de superficie y los agentes desencofrantes.

## 12.5 Producción en fábrica

El hormigón prefabricado tiene las mismas generalidades principales para la producción que las dadas en el Capítulo 9. El fabricante de prefabricados tendrá en cuenta los siguientes requisitos.

Todo hormigón descargado en la tolva debe ser inspeccionado visualmente para asegurar la homogeneidad y la consistencia antes de la aceptación y colocación en los respectivos moldes. Se efectuarán ensayos de caracterización de la fluidez en una proporción de las amasadas. En caso de duda, podrán hacerse otros ensayos adicionales que darán más información sobre las propiedades del HAC en estado fresco.

Se recomienda (y es requerido en algunos países miembros de la UE) que el productor implemente un control de producción en fábrica siguiendo los requisitos de la correspondiente normativa de productos y/o la PNE-EN 13369, Anexo D. El control de producción incluye:

- Inspección de equipos
- Inspección de materiales
- Inspección del proceso
- Inspección del producto acabado
- Especificaciones de venta

Si se requiere de un almacenaje temporal de hormigón fresco desde la salida de la amasadora y/o por demanda de producción, se puede usar un tanque amasador intermedio para su almacenaje, permitiendo una aplicación ininterrumpida de HAC para cada elemento individual.



**Figura 12.1** Uso de un tanque amasador intermedio para activar el HAC justo antes de la aplicación.

## 12.6 Colocación

Para el hormigón prefabricado es muy importante que, como en el hormigón colocado en obra, todo el personal involucrado en el proceso de fabricación de elementos de HAC reciba una formación adecuada antes del inicio de las operaciones debido a las distintas técnicas requeridas.

También son de aplicación las directrices de colocación del Capítulo 11 y especialmente los apartados 11.3 y 11.6. Es esencial para el llenado del molde que el ritmo de vertido permita la salida del aire de un modo que asegure que no queda aire ni ocluido ni atrapado. La operación de llenado hay que realizarla en continuo, puesto que interrupciones temporales causarán juntas frías entre capas que pueden afectar la resistencia, la durabilidad y el aspecto del elemento. Si se produce una parada en el proceso de llenado vertical, hay que aumentar la energía de colocación del hormigón en la siguiente capa, p.e. incrementando la distancia de vertido, con lo que la superficie de la primera capa se desnivela, y se evita la formación de una junta fría.

Algunas unidades de llenado tienen salidas de pequeño tamaño para aumentar la energía cinética del caudal fluyendo durante las operaciones de colocación.

Los anclajes para conectar elementos prefabricados por ejemplo con muros de mampostería (esperas), pueden doblarse y luego recolocarse en la superficie del hormigón, en su posición correcta después de vertido y desencofrado.

## 12.7 Acabado, curado y desencofrado

Si el HAC no es completamente autonivelante, la superficie puede quedar ligeramente ondulada produciendo irregularidades en la superficie. La vibración mecánica sólo se usará siguiendo minuciosamente los ensayos para comprobar la segregación en elemento (véase Apartado 11.6).

La técnica de acabado final es similar a la del hormigón vibrado convencional pero generalmente empieza más tarde, en función de la composición, de las propiedades y de la temperatura del hormigón y del ambiente.

Las superficies expuestas a la intemperie de los elementos prefabricados con HAC se curan del mismo modo que para hormigón vibrado convencional (véase Apartado 11.8).

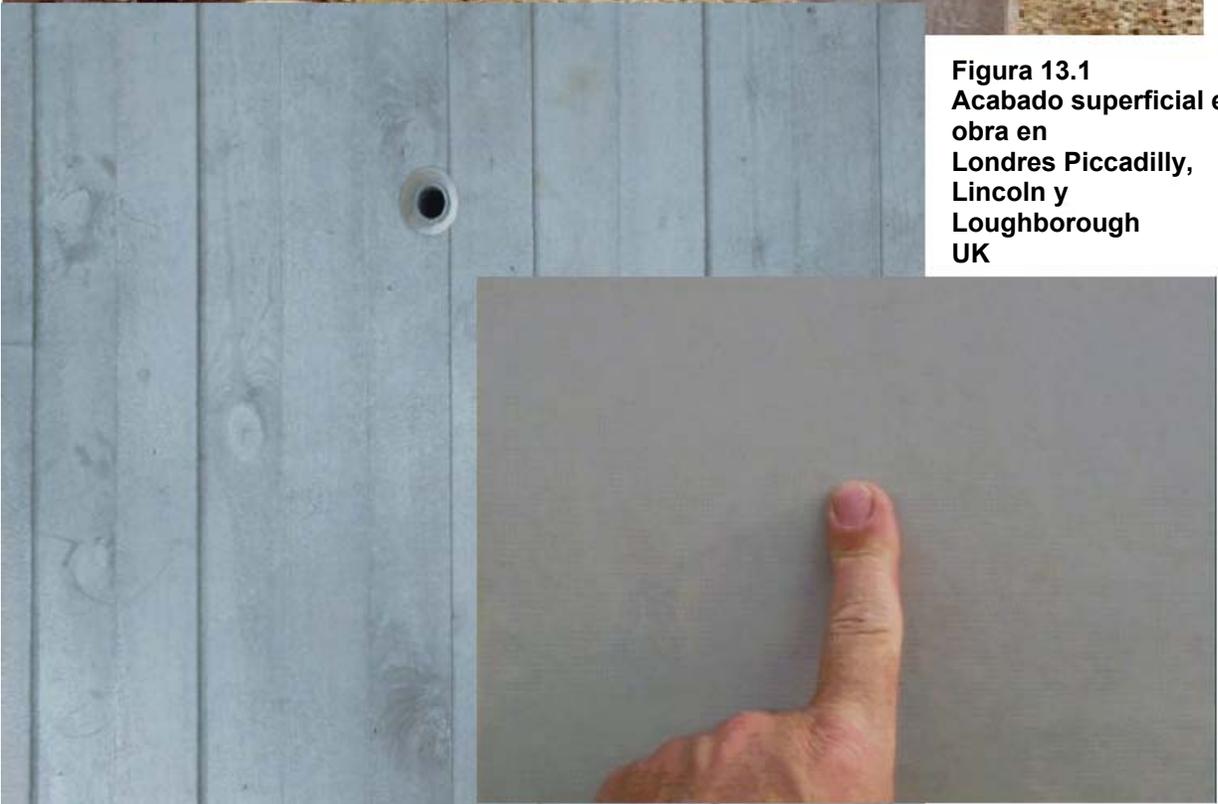
El uso de calor (curado al vapor) para estimular y acelerar el desarrollo de las resistencias iniciales del elemento fabricado es igual de efectivo para el HAC que para el hormigón convencional. El ensayo de maduración se usa para acelerar y controlar el desarrollo de las resistencias.

Cuando se use calor con el HAC para acelerar su endurecimiento, el tratamiento térmico cumplirá con los requisitos de la PNE-EN 13369, apartado 4.2.1.4.

## 13 Aspecto y acabado superficial

### 13.1 Introducción

Una de las características del HAC es la alta calidad del acabado superficial, pero hay que poner especial atención al diseño de la mezcla y el desarrollo de los trabajos en obra si se quiere alcanzar este objetivo.



**Figura 13.1**  
Acabado superficial en  
obra en  
Londres Piccadilly,  
Lincoln y  
Loughborough  
UK

El aspecto de un elemento llenado con HAC depende principalmente de:

- El tipo de cemento y adiciones usadas
- La composición de mezcla del HAC
- La calidad del molde y el agente desencoformante
- El procedimiento de llenado

El aspecto normalmente es mejor que el del hormigón normal:

- El color es generalmente más uniforme
- Es más fácil evitar defectos por puntos de fuga situados en las juntas del encofrado y alrededor de los puntos de salida de alambres
- Los bordes serán muy afilados si el molde está bien diseñado y cuidado
- Las burbujas estarán siempre presentes, pero son menores en tamaño y número
- Los huecos por aire ocluido en las superficies horizontales se pueden limitar en número y tamaño, cuando el molde es llenado apropiadamente.

La siguiente lista de defectos se encuentra en todos los tipos de hormigón, pero trabajando con cuidado el HAC puede dar mejores acabados que el hormigón convencional:

- Burbujas
- Coqueras
- Manchas verticales y otras variaciones de color
- Fisuras por retracciones plásticas o de secado

En el Anexo C se da una lista de verificación para encontrar las causas de los defectos y prevenirlas.

En los siguientes apartados se da información adicional de algunos defectos.

### **13.2 Oclusiones de aire**

El aire se introduce en el hormigón durante el proceso de mezcla, y también durante el transporte y la colocación. La cantidad de aire que se ocluye dentro del hormigón o que se libera durante la colocación depende de la cohesión de mezcla. Un HAC clase SF3 con alto asentamiento y VS/VF1 de baja viscosidad es beneficioso y ayuda a obtener superficies perfectas puesto que facilita la salida del aire contenido en el hormigón. Un hormigón que está próximo a la segregación dará normalmente un mejor acabado superficial.

Las oclusiones de aire se forman cuando pequeñas burbujas de aire quedan atrapadas o se adhieren a la superficie del encofrado. Además de los factores anteriores, las oclusiones de aire pueden deberse a la calidad de la superficie del encofrado y del tipo y/o calidad del desencoformante usado. Hay que prestar atención a las indicaciones del fabricante del desencoformante y a las del productor del hormigón.

El aire se evacuará más fácilmente si se limita el ritmo de subida del hormigón en el encofrado y también si éste puede salir por los lados del molde cada ciertos metros.

El bombeo desde la parte inferior del encofrado siempre comporta un mejor acabado superficial. Si no es posible, la manguera de llenado se deberá mantener siempre por debajo de la superficie del hormigón. Si el hormigón se coloca con caída libre, esto aumentará el número y tamaño de huecos (burbujas) de aire atrapados tanto en la superficie como en el seno del hormigón.

### **13.3 Coqueras**

Las coqueras pueden aparecer por movimientos del encofrado pero es más usual que se produzca por una baja capacidad de paso, generando puentes de áridos y vacíos entre las barras de las armaduras.

El HAC con baja capacidad de paso se debe normalmente a:

- Clase de asentamiento demasiado baja
- Una viscosidad demasiado alta
- El tamaño máximo de áridos demasiado grande
- Pasta insuficiente o demasiados áridos gruesos

Si se producen coqueras y no se deben a movimientos del encofrado, hay que comprobar si el hormigón es conforme a las especificaciones. Si se confirma que está dentro de especificación, habrá que tomar en consideración la revisión de las mismas.

#### **13.4 Uniformidad del color y defectos superficiales**

No son usuales las rallas verticales en la superficie del HAC y están causadas normalmente por exudación de agua. El agua de exudación tiende a acumularse en las superficies verticales del molde y fluir hacia la superficie dejando rallas visibles en la superficie endurecida del hormigón debido al lavado o por la flotación del desencofrante del molde.

Hay varias razones por las que pueda darse exudación:

- Una alta relación agua / finos
- Una viscosidad demasiado baja
- Bajas temperaturas
- Discontinuidades en el llenado

Otras razones de variación del color son:

- Superficie de secado irregular (por ejemplo a causa de molde de madera nueva o seca o planchas de plástico que tocan parte del hormigón durante el periodo de curado)
- Sobredosis de desencofrante o empleo de desencofrante de mala calidad
- Discontinuidad de los componentes entre los distintos lotes del hormigón

#### **13.5 Minimización de las fisuras superficiales**

El HAC está diseñado para ser estable y resistente a la segregación pero, como el hormigón convencional, puede presentar fisuras por sedimentación plástica sobre las barras de armado si hubiera sedimentación de los áridos. Algunos diseños de mezcla del HAC, especialmente en los que se requiere un muy buen acabado superficial, pueden estar muy cerca de la sedimentación de áridos por lo que se requerirá de un control adicional. Si se usa VEA, junto con el contenido adecuado de finos, puede ayudar a obtener un hormigón más estable y reducir el riesgo de sedimentación plástica o fisuras.

Las fisuras de sedimentación plástica pueden ser anchas pero no son profundas por lo que la superficie se puede reparar mediante una llana antes que el hormigón fragüe totalmente.

Puesto que el HAC tiene poca o ninguna exudación puede perder agua superficial, produciéndose fisuras de contracción si no se efectúa el curado en el momento adecuado.

## Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante

### Anexo A: Requisitos del hormigón autocompactante

#### Introducción

El hormigón autocompactante está considerado como una extensión del hormigón de alta consistencia.

Deberán darse especificaciones basadas en la ejecución siempre que se use el método de especificación de hormigón por propiedades. Para las propiedades y requisitos, distintas de las relacionadas con la autocompactación, regirá la norma UNE 83900, y/o en el caso de elementos de hormigón prefabricado la PNE-EN 13369.

#### A.1 Alcance

Este anexo define los requisitos y criterios de conformidad para el HAC.

#### A.2 Referencias normativas

Este anexo incorpora referencias con y sin fecha, que provienen de publicaciones. Estas referencias normativas se citan en las partes adecuadas del texto y a continuación también se listan dichas publicaciones. Para referencias con fecha, las revisiones posteriores de cualquier documento deberán contemplarse en este anexo sólo cuando se efectúe su revisión. Para las referencias sin fecha la válida es la última edición de la publicación.

UNE 83900 Hormigón. Prestaciones, fabricación, puesta en obra y criterios de aceptación  
PNE-EN 13369 Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón

Anejo B, Ensayos de hormigón fresco – Parte 1: Ensayo de asentamiento  
Anejo B, Ensayos de hormigón fresco – Parte 2: Ensayo del embudo en V  
Anejo B, Ensayos de hormigón fresco – Parte 3: Ensayo de la caja en L  
Anejo B, Ensayos de hormigón fresco – Parte 4: Ensayo de resistencia a la segregación

NOTA. Se recomiendan estos ensayos para su normalización a nivel europeo.

#### A.3 Definiciones, símbolos y abreviaturas

Para el propósito de este Anejo, deben aplicarse los términos y definiciones dados en la UNE 83900 y las siguientes.

##### A.3.1.1

##### **Hormigón especificado por propiedades**

Hormigón en el que el suministrador asegura la mezcla sujeta a una buena práctica en la aplicación, compactación y curado, y por lo que el suministrador no está obligado a declarar su composición.

##### A.3.1.2

##### **Hormigón autocompactante (HAC)**

Hormigón capaz de fluir y recubrir cualquier parte y rincón del encofrado y a través de las armaduras simplemente por la acción de su propio peso y sin la necesidad de ningún otro tipo de método de compactación sin segregación ni indicios de bloqueo.

##### A.3.1.3

##### **Capacidad de relleno**

Capacidad para rellenar completamente todas las zonas del encofrado así como recubrir y fluir a través de las armaduras, sin formación de vacíos (perfecta compactación) y sin la necesidad de vibrado ni otros métodos de compactación externos.

**A.3.1.4**

**Viscosidad**

Resistencia del material a fluir (p.e. HAC) una vez éste entra en movimiento.

NOTA: En el HAC se relaciona con la velocidad de fluidez  $T_{500}$  del ensayo de asentamiento o con el tiempo de flujo en el ensayo del embudo en V.

**A.3.1.5**

**Capacidad de paso**

Capacidad para fluir libremente a través las armaduras, ofreciendo un perfecto relleno, sin indicios de bloqueo del árido grueso ni otros fenómenos relacionados con la pérdida de homogeneidad (segregación y exudación).

**A.3.1.6**

**Resistencia a la segregación**

Capacidad del hormigón de mantener la homogeneidad de su composición en estado fresco

**A.3.2 Símbolos y abreviaciones**

Para el propósito de este Anexo, son de aplicación los símbolos y abreviaciones dadas en la UNE 83900 y siguientes

HAC	Hormigón autocompactante
SF1 a SF3	Clases de consistencia expresadas por el ensayo de asentamiento
VS1 a VS2	Clases de viscosidad según $T_{500}$
VF1 a VF2	Clases de viscosidad según el ensayo del embudo en V
PA1 a PA2	Clases de capacidad de paso según habilidad de paso (Ensayo de la caja en L)
SR1 a SR2	Clases de segregación según el ensayo de segregación con tamiz

**A.4 Clasificación**

**A.4.1 Introducción**

Son de aplicación las clasificaciones dadas en la UNE 83900, Apartado 4.

**A.4.2 Clasificación usada en la especificación del HAC**

Cuando se clasifiquen las propiedades del HAC deben aplicarse las Tablas de la A.1 a la A.5

NOTA. Es normal especificar solamente la clase de asentamiento. En algunas situaciones también es necesario especificar, como ensayos iniciales, el ensayo de la caja en L y/o de resistencia de segregación y/o tanto el valor de  $T_{500}$  como la clase según el ensayo del embudo en V.

**Tabla A.1 – Clases de asentamiento**

Clase	Asentamiento en mm
SF1	de 550 a 650
SF2	de 660 a 750
SF3	de 760 a 850

**Tabla A.2 – Clases de viscosidad**

Clase	$T_{500}$ , s	Tiempo del ensayo del embudo en V en s
VS1/VF1	$\leq 2$	$\leq 8$
VS2/VF2	$> 2$	de 9 a 25

**Tabla A.3 – Clases de capacidad de paso (Ensayo de la caja en L)**

Clase	Capacidad de paso
PA1	≥ 0,80 con 2 obstáculos de barras
PA2	≥ 0,80 con 3 obstáculos de barras

**Tabla A.4 – Clases de resistencia a la segregación (segregación en tamiz)**

Clase	Capacidad de paso
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

NOTA: el método preferido para especificar será usando la clasificación aquí indicada, pero en casos especiales pueden especificarse otros valores objetivo.

## **A.5 Requisitos para el hormigón y métodos de verificación**

### **A.5.1 Requisitos básicos para los componentes**

Se aplica la UNE 83900, Apartado 5.1 o, en caso de elementos de hormigón prefabricado, las normativas pertinentes del elemento y/o la PNE-EN 13369, Apartado 4.1.

### **A.5.2 Requisitos básicos de la composición del hormigón**

Se aplica la UNE 83900, Apartado 5.2 o, en el caso de elementos de hormigón prefabricado, las normativas pertinentes del elemento y/o la PNE-EN 13369, Apartado 4.1.

### **A.5.3 Requisitos relacionados con la clase de exposición**

El hormigón debe satisfacer los requisitos dados para los suministros válidos en el lugar de la obra respecto a la(s) clase(s) de exposición y/o los valores límites especificados o las normativas pertinentes del elemento.

### **A.5.4 Requisitos para el hormigón endurecido**

Se aplica la UNE 83900, Apartado 5.5 o, en caso de elementos de hormigón prefabricado, las normativas pertinentes del elemento y/o la PNE-EN 13369

## **A.6 Entrega del hormigón fresco**

### **A.6.1 Información del constructor al productor**

Se aplica la UNE 83900, 7.1.

### **A.6.2 Información del productor de hormigón al constructor**

El productor tendrá que facilitar la siguiente información si le es requerida:

- a) Resultados de los ensayos correspondientes del hormigón;
- b) Desarrollo de las resistencias a las distintas edades

### **A.6.3 Albarán de entrega para el hormigón preparado**

En el albarán de entrega deberá facilitarse la información dada en la UNE 83900, Apartado 7.3 más la siguiente:

- Resistencia característica;
- Clase de exposición;
- Contenido de cloro;

**“Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante”**

- Clases o valores de referencia especificados por el comprador del HAC;
- Valores límites de la composición del hormigón, si se especifica;
- Tamaño máximo de los áridos;
- Cualquier otra propiedad especificada.

**A.7 Control y criterios de conformidad**

NOTA: En el caso de suministro desde una planta de hormigón preparado, se asume que las afirmaciones hechas en el albarán de entrega son válidas.

En el caso de elementos de hormigón prefabricado y hormigón elaborado en obra donde el usuario y el productor son la misma parte, se entiende que los ensayos y verificaciones son parte de los controles de producción, y que se realizan al mismo ritmo y usando los mismos criterios para su conformidad. En este caso, una falta de cumplimiento de los criterios no lleva a un informe de no conformidad pero sí a una investigación interna para averiguar si esto implicará una no-conformidad con los requisitos del hormigón endurecido.

El ritmo de ensayos de asentamiento se da en la UNE 83900 por consistencia o, en el caso de elementos prefabricados, la PNE-EN 13369 y/o otras normas pertinentes al producto determinado. El valor de  $T_{500}$ , el tiempo del ensayo del embudo en V, el ensayo de la caja en L y el ensayo de resistencia a la segregación en tamiz solo se asumirán en caso de su especificación.

Se dará la conformidad a las propiedades del HAC si los criterios especificados satisfacen los límites dados en la Tabla A.6.

<b>Tabla A.6 – Criterios de conformidad para las propiedades del HAC</b>	
<b>Propiedad</b>	<b>Criterio</b>
Clase de asentamiento SF1	$\geq 520 \text{ mm}, \leq 700 \text{ mm}$
Clase de asentamiento SF2	$\geq 640 \text{ mm}, \leq 800 \text{ mm}$
Clase de asentamiento SF3	$\geq 740 \text{ mm}, \leq 900 \text{ mm}$
Clase de asentamiento especificada como valor nominal	$\pm 80 \text{ mm}$ del valor nominal
Clase del ensayo del embudo en V VF1	$\leq 10 \text{ s}$
Clase del ensayo del embudo en V VF2	$\geq 7 \text{ s}, \leq 27 \text{ s}$
Clase del ensayo del embudo en V especificada como valor nominal	$\pm 3 \text{ s}$
Clase de Capacidad de paso PA1	$\geq 0,75$
Clase de Capacidad de paso PA2	$\geq 0,75$
Clase de Capacidad de paso especificada como valor nominal	No más de 0,05 debajo del valor nominal
Clase de resistencia a la segregación de tamiz SR1	$\leq 23$
Clase de resistencia a la segregación de tamiz SR2	$\leq 18$

Para otras propiedades y requisitos especificados, la frecuencia de ensayos y los criterios de conformidad son los que indica la UNE 83900 o, en caso de elementos prefabricados, las normativas pertinentes del producto y/o la PNE-EN 13369.

**A.8 Control de producción**

Para las propiedades especificadas del HAC se aplican los principios de control de producción de hormigón fresco definidos en la UNE 83900, Apartado 9. En el caso de elementos prefabricados, o para otros aspectos de la producción, se aplica la PNE-EN 13369, Apartado 6.3 y/o las otras normativas pertinentes del producto.

## Anexo B: Métodos de Ensayo para el HAC

### Anexo B.1

#### Ensayos de hormigón – Parte B1: Caracterización de la fluidez, ensayo del escurrimiento

##### Introducción

El ensayo del escurrimiento y el tiempo  $T_{500}$  son métodos para caracterizar la fluidez y el ritmo de flujo del hormigón autocompactante en ausencia de obstrucciones. Se basa en el ensayo del escurrimiento descrito en la PNE-EN 12350-2. El resultado indica la capacidad de llenado del hormigón autocompactante. El tiempo  $T_{500}$  es también una medida de la velocidad de flujo y por lo tanto de la viscosidad del HAC.

##### 1 Alcance

Este documento especifica el procedimiento para ensayar el escurrimiento y determinar el tiempo  $T_{500}$  para el HAC. El ensayo no es el adecuado si el tamaño máximo del árido excede de 40 mm.

##### 2 Normas para consulta

Este documento incorpora referencias con y sin fecha, que provienen de otras publicaciones. Estas referencias normativas se citan en las partes adecuadas del texto y a continuación también se listan dichas publicaciones. Para referencias con fecha, las revisiones posteriores de cualquier documento deberán contemplarse en este anexo sólo cuando se efectúe su revisión. Para las referencias sin fecha la válida es la última edición de la publicación (incluyendo cualquier revisión).

PNE-EN 12350-1, *Ensayos de hormigón fresco – Parte 1: Muestreo*

PNE-EN 12350-2, *Ensayos de hormigón fresco – Parte 2: Ensayo de asentamiento*

UNE 82009, *Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición*

##### 3 Principio

Se rellena con el hormigón fresco un cono como el usado en el ensayo de asentamiento de la PNE-EN 12350-2. Cuando se saca el cono hacia arriba, se mide el tiempo desde el inicio del movimiento vertical del cono hasta que el hormigón ha fluido hasta la marca de 500 mm de diámetro; éste es el valor del tiempo  $T_{500}$ . Se miden el mayor diámetro de la extensión del flujo del hormigón y el diámetro de extensión perpendicular a éste y la media es el escurrimiento.

Nota: Se puede omitir la medida del tiempo  $T_{500}$  si no se requiere.

##### 4 Aparatos

Los aparatos serán conformes a lo indicado en la PNE-EN 12350-2 excepto en los siguientes casos:

**4.1 Bandeja**, hecha con un placa plana con un área de cómo mínimo 900 mm x 900 mm en la que se pueda verter el hormigón. La placa tendrá una superficie plana, lisa y no absorbente con un grosor mínimo de 2 mm. La superficie no debe ser fácilmente atacable por la pasta de cemento ni ser oxidable. La construcción de la placa debe prevenir la distorsión. La desviación de la planimetría no debe exceder de 3 mm en ningún punto cuando un borde recto se sitúa entre los centros de dos caras opuestas.

El centro de la placa debe estar marcada con una cruz, las líneas de ésta serán paralelas a los bordes de la placa y con círculos de 200 mm de diámetro y de 500 mm de diámetro de centro coincidente con el punto central de la placa. Véase figura 1.

**4.2 Metro o regla graduada**, desde 0 mm hasta 1000 mm con intervalos de 1 mm.

4.3 Cronómetro, capaz de medir con una resolución de 0,1 s.

4.4 Anillo pesado (opcional), con una masa mínima de 9 kg.

NOTA: el anillo pesado permite que el ensayo lo pueda realizar una sola persona.

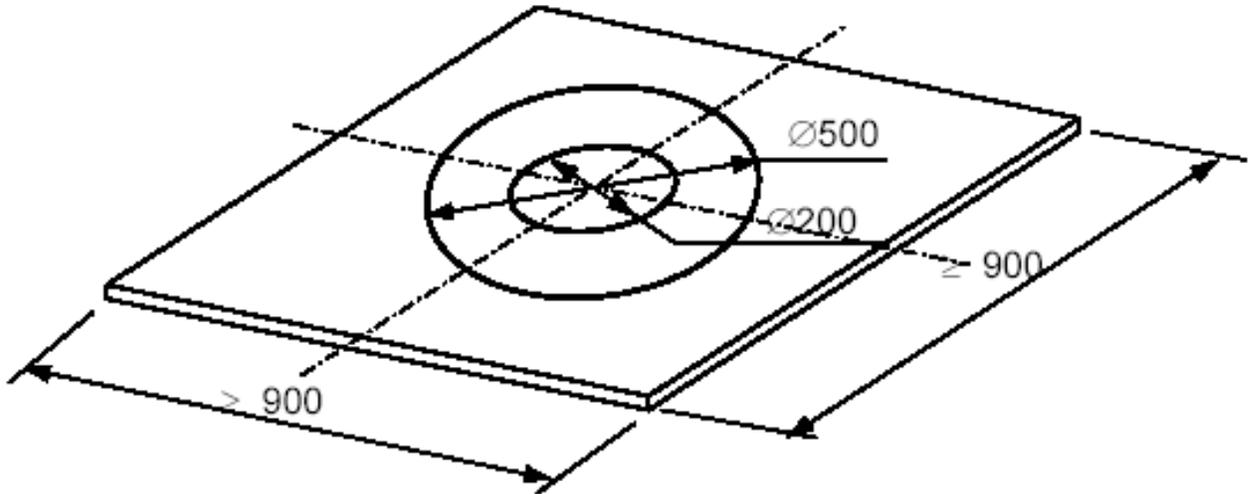


Figura 1. Bandeja, referenciada en el Apartado 4.1

## 5 Muestra de ensayo

La toma de muestra se hará de acuerdo a lo especificado en la Norma PNE-EN 12350-1.

## 6 Procedimiento

Preparar el cono y la bandeja tal y como se describe en la PNE-EN 12350-2.

Poner el anillo en el cono si se va a usar.

Poner el cono con la base coincidiendo con el círculo de 200 mm de la bandeja y mantener en esta posición usando las piezas de la base (o usando el anillo pesado), asegurando que el hormigón no sale por debajo del cono.

Llenar el cono sin compactación alguna, y sacar el sobrante de la parte superior del cono. No dejar el cono lleno más de 30 s; durante este tiempo sacar el hormigón derramado, si lo hubiera, de la bandeja y asegurarse de que ésta está completamente húmeda, pero sin sobrantes de agua.

Elevar verticalmente el cono de forma continua, sin interferir en el flujo del hormigón. Si se va a tomar el tiempo  $T_{500}$ , hay que accionar el cronómetro justo en el momento que el cono deja de estar en contacto con la bandeja y detenerlo cuando la masa de hormigón alcance algún punto del círculo de 500 mm con una resolución de 0,1 s. Sin tocar la bandeja o el hormigón, medir el diámetro máximo de la extensión del flujo y registrar como  $d_m$  con una precisión de 10 mm. Entonces medir el diámetro perpendicular a la  $d_m$  con una precisión de 10 mm y registrar como  $d_r$ .

Comprobar si hay segregación en el borde perimetral del hormigón. La pasta de cemento / mortero puede segregarse de los áridos gruesos, haciendo un anillo de pasta / mortero extendido unos milímetros más allá de los áridos gruesos. Los áridos gruesos segregados se observarán en la zona central. Hay que anotar si hay o no segregación y que el ensayo es por lo tanto no conforme.

## 7 Resultados del ensayo

La fluidez es la media entre el valor  $d_m$  y el  $d_r$ , con una precisión de 10 mm.

El tiempo  $T_{500}$  se registra con una precisión de 0,1 s.

## 8 Informe del ensayo

El informe del ensayo debe contener:

- a) identificación de la muestra del ensayo;
- b) lugar del ensayo;
- c) fecha del ensayo;
- d) fluidez con precisión de 10 mm;
- e) cualquier indicación de segregación del hormigón;
- f) tiempo entre la finalización del mezclado y la realización del ensayo;
- g) cualquier desviación del procedimiento descrito en este documento.

El informe también puede contener, en el caso que se requiera:

- h) Tiempo  $T_{500}$  con una precisión de 0,1 s;
- i) La temperatura del hormigón en el momento del ensayo;
- j) La hora del ensayo.

### B.1 Anexo (informativo)

#### Precisión

La repetibilidad  $r$  y la reproducibilidad  $R$  se han determinado con un programa que incluye 8 laboratorios, 16 operarios y 2 replicas, e interpretado de acuerdo con la UNE 82009.

Los valores resultantes para  $r$  y  $R$  se dan en la tabla 1.

**Tabla 1 – Precisión de los resultados**

<b>Fluidez mm</b>	<b>&lt; 600</b>	<b>600 – 750</b>	<b>&gt; 750</b>
Repetibilidad $r$ mm	n/a	42	22
Reproducibilidad $R$ mm	n/a	43	28
<b>Tiempo <math>T_{500}</math> s</b>	<b>&lt; 3,5</b>	<b>3,5 – 6,0</b>	<b>&gt; 6,0</b>
Repetibilidad $r$ mm	0,66	1,18	n/a
Reproducibilidad $R$ mm	0,88	1,18	n/a

## **Anexo B: Métodos de Ensayo para el HAC**

### **Anexo B.2**

#### **Ensayos de hormigón – Parte B2: Ensayo del embudo en V**

##### **Introducción**

El ensayo del embudo en V se usa para calcular la viscosidad y la capacidad de llenado del hormigón autocompactable.

##### **1 Alcance**

Este documento especifica el procedimiento para determinar el tiempo de flujo del embudo en V del HAC. El ensayo no es adecuado si el tamaño máximo de los áridos supera los 20 mm.

##### **2 Normas para consulta**

Este documento incorpora referencias con y sin fecha, que provienen de otras publicaciones. Estas referencias normativas se citan en las partes adecuadas del texto y a continuación también se listan dichas publicaciones. Para referencias con fecha, las revisiones posteriores de cualquier documento deberán contemplarse en este anexo sólo cuando se efectúe su revisión. Para las referencias sin fecha la válida es la última edición de la publicación (incluyendo cualquier revisión).

PNE-EN 12350-1, *Ensayos de hormigón fresco – Parte 1: Muestreo*

UNE 82009, *Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición*

##### **3 Principio**

Se llena un embudo en V con hormigón fresco y se anota el tiempo que tarda el hormigón en salir del embudo, siendo el tiempo de flujo del embudo en V.

##### **4 Aparatos**

**4.1 Embudo en V**, hecho con las dimensiones de la figura 1 (tolerancias de  $\pm 1$  mm), llenado con una carga rápida, disponiendo de una compuerta hermética en su base, colocado de tal modo que la parte superior esté horizontal. El embudo en V será metálico; las superficies deben ser lisas, y sin ser fácilmente atacables por la pasta de cemento ni ser oxidables.

**4.2 Recipiente**, para almacenar la muestra de ensayo, de volumen mínimo 12 l, y mayor que el volumen embudo.

**4.3 Cronómetro**, con una resolución de 0,1s.

**4.4 Barra metálica**, para enrasar el nivel de hormigón a la parte superior del embudo.

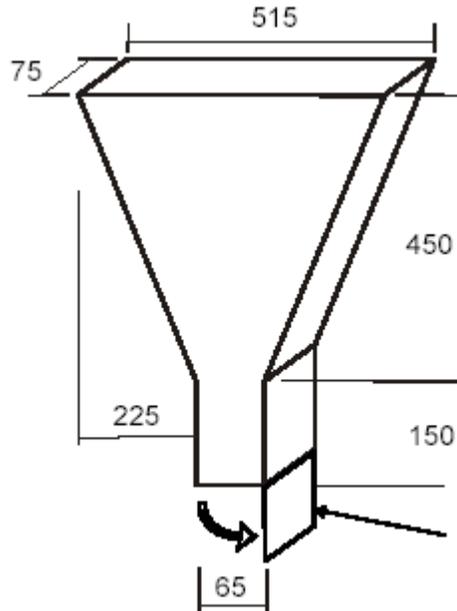


Figura 1 – Embudo en V

## 5 Muestra de ensayo

Se obtendrá una muestra de cómo mínimo 12 litros de acuerdo con la Norma PNE-EN 12350-1.

## 6 Procedimiento

Limpiar el embudo y la compuerta inferior, humedecer toda la superficie interior incluyendo la compuerta. Cerrar la compuerta y poner la muestra de hormigón en el embudo, sin compactación alguna, después enrasar la parte superior con la barra metálica, igualando la superficie del hormigón a la parte superior del embudo. Poner el recipiente debajo del embudo para recoger el hormigón en su caída. Pasados  $10 \pm 2$  s del llenado del embudo, abrir la compuerta y tomar el tiempo  $t_v$  con una resolución de 0,1 s, desde el inicio de la apertura de la compuerta y hasta que se pueda ver por primera vez verticalmente a través del embudo el interior del recipiente. El tiempo de flujo del ensayo del embudo en V es  $t_v$ .

## 7 Informe de ensayo

El informe debe contener:

- Identificación de la muestra de ensayo;
- Lugar del ensayo;
- Fecha del ensayo;
- Tiempo de flujo ( $t_v$ ) con sensibilidad de 0,1 s;
- Tiempo transcurrido entre la mezcla completa y la realización del ensayo;
- Cualquier desviación del procedimiento detallado en este documento.

El informe puede contener además, en el caso que se requiera:

- La temperatura del hormigón en el momento del ensayo;
- La hora del ensayo.

## B.2 Anexo (informativo)

### Precisión

La repetibilidad  $r$  y la reproducibilidad  $R$  se han determinado con un programa que incluye 10 laboratorios, 20 operarios y 2 replicas, e interpretado de acuerdo con la UNE 82009.

Los valores de  $r$  y  $R$  se dan a partir de las siguientes ecuaciones, donde  $C$  es el coeficiente de correlación.

$$r = 0,335 t_v - 0,62, \text{ con } C^2 = 0,823, \text{ cuando } 3 \leq t_v \leq 15; \text{ y } r = 4,4 \text{ cuando } t_v > 15$$

y

$$R = 0,502 t_v - 0,943, \text{ con } C^2 = 0,984, \text{ cuando } 3 \leq t_v \leq 15; \text{ y } R = 6,6 \text{ cuando } t_v > 15$$

Los valores de  $r$  y  $R$ , para valores típicos de  $t_v$ , calculados a partir de estas ecuaciones, se dan en la Tabla 1.

**Tabla 1 – Repetibilidad y reproducibilidad para valor típicos del tiempo de flujo del embudo en V**

Tiempo de flujo (s)	3,0	5,0	8,0	12,0	> 15,0
Repetibilidad $r$ s	0,4	1,1	2,1	3,4	4,4
Reproducibilidad $R$ s	0,6	1,6	3,1	5,1	6,6

## **Anexo B: Métodos de Ensayo para el HAC**

### **Anexo B.3**

#### **Ensayos de hormigón – Parte B3: Ensayo de la caja en L**

##### **Introducción**

El ensayo de la caja en L se usa para calcular la capacidad de paso del hormigón autocompactante, de fluir a través de aperturas estrechas incluyendo el espaciado entre las barras de la armadura y otras obstrucciones, sin segregación ni atasco. Hay dos variantes; el ensayo de 2 y el de 3 obstáculos de barras. El ensayo de tres obstáculos de barras simula un armado más denso.

##### **1 Alcance**

Este documento especifica el procedimiento para determinar la capacidad de paso, usando el ensayo de la caja en L, para hormigón autocompactante.

##### **2 Referencias normativas**

Este documento incorpora referencias con y sin fecha, que provienen de otras publicaciones. Estas referencias normativas se citan en las partes adecuadas del texto y a continuación también se listan dichas publicaciones. Para referencias con fecha, las revisiones posteriores de cualquier documento deberán contemplarse en este anexo sólo cuando se efectúe su revisión. Para las referencias sin fecha la válida es la última edición de la publicación (incluyendo cualquier revisión).

PNE-EN 12350-1, *Ensayos de hormigón fresco – Parte 1: Muestreo*

UNE 82009, *Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición*

##### **3 Principio**

Se permite fluir un volumen determinado de hormigón fresco horizontalmente a través de espacios entre obstáculos de barras de armado verticales y lisas, y se mide la altura del hormigón más allá de las barras de armado.

##### **4 Aparatos**

**4.1 Caja en L**, de forma genérica como la que se muestra en la figura 1 y dimensiones de la figura 2 (tolerancias de  $\pm 1$  mm). La caja en L será de construcción sólida con superficies que sean lisas, planas y no atacables por la pasta de cemento ni oxidables. El recipiente vertical debe ser fácil de sacar para limpiezas. Con la compuerta cerrada, el volumen del contenedor vertical completamente lleno será de 12,6 – 12,8 l.

El anclaje que sostiene la armadura tendrá 2 barras lisas de 12 mm de diámetro con una separación de 59 mm para el ensayo de dos obstáculos de barras y 3 barras lisas de 12 mm de diámetro con una separación de 41 mm para el ensayo de tres obstáculos de barras. Estos montajes deben ser intercambiables y con las barras de la caja en L verticales y equidistantes a través del ancho de la caja.

NOTA: Sería preferible un molde de acero, aunque también es adecuado un encofrado de madera laminada de 12 mm, con las vetas selladas.

**4.2 Regla graduada**, desde 0 – 300 mm en intervalos de 1,0 mm.

**4.3 Recipiente**, mantiene la muestra de ensayo, con un volumen mínimo de 14 l.

“Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante”

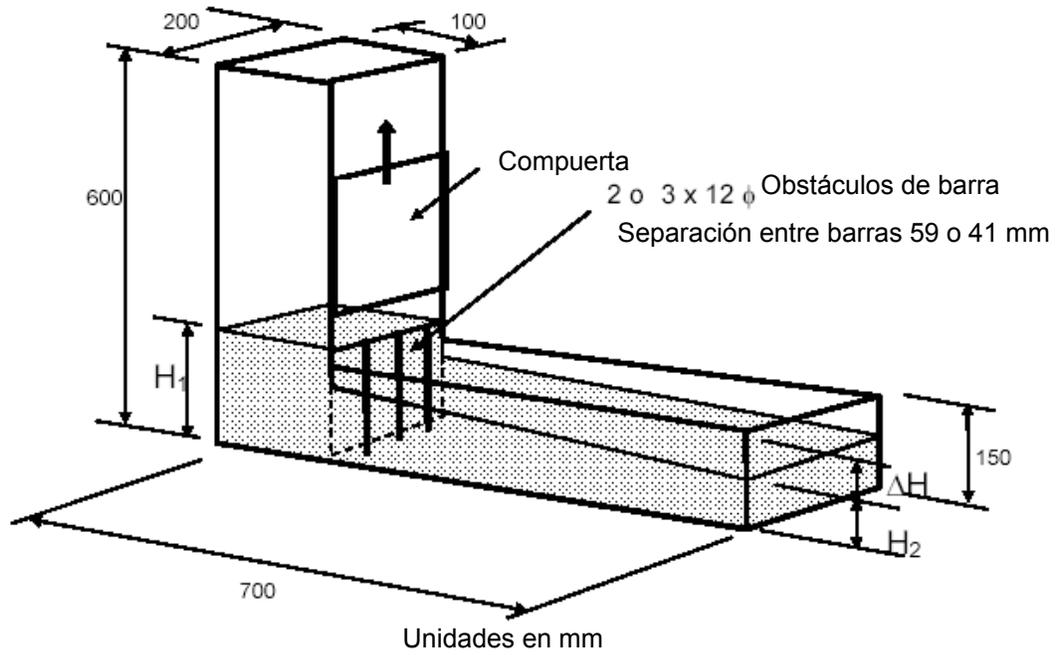


Figura 1 – Montaje general de la caja en L

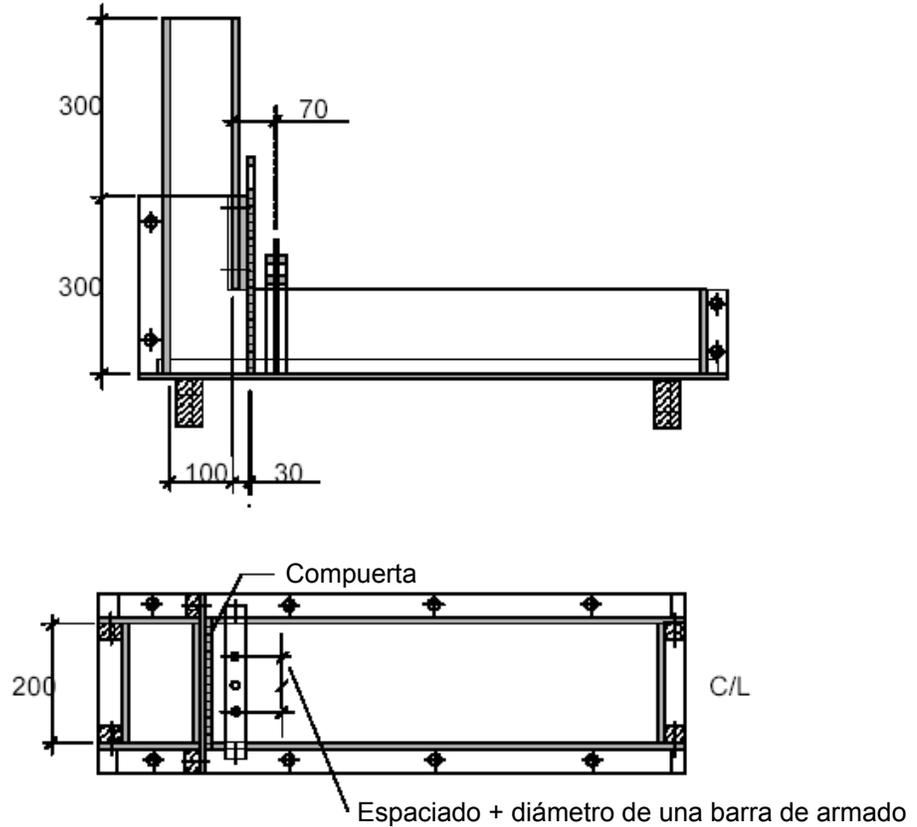


Figura 2 – Dimensiones y diseño típico de la caja en L

## 5 Muestra de ensayo

Se obtendrá una muestra de aproximadamente unos 17 litros de acuerdo con la PNE-EN 12350-1.

## 6 Procedimiento

Poner la caja en L en una superficie horizontal y cerrar la compuerta y las secciones horizontales. Verter el hormigón del recipiente a la tolva de llenado de la caja en L y dejar pasar  $60 \pm 10$  s. Anotar cualquier segregación y luego subir la compuerta para que el hormigón fluya hacia la sección horizontal de la caja en L.

Cuando el movimiento haya cesado, medir la distancia vertical, al final de la sección horizontal de la caja en L, entre la superficie del hormigón y la parte superior de la sección horizontal de la caja en tres posiciones igualmente espaciadas a través del ancho de la caja. A partir de la diferencia de altura de la sección horizontal de la caja, estas tres medidas se usan para calcular la profundidad media del hormigón como H2 mm. Se hace el mismo procedimiento para calcular la profundidad del hormigón inmediatamente después de la compuerta como H1 mm.

## 7 Resultado del ensayo

La capacidad de paso PA se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$PA = H2 / H1$$

## 8 Informe de ensayo

El informe debe contener:

- a) Identificación de la muestra de ensayo;
- b) Lugar del ensayo;
- c) Fecha del ensayo;
- d) Cualquier segregación observada durante el llenado de la caja en L;
- e) Si es ensayo de 2 o 3 obstáculos de barras;
- f) Ratio de paso con una sensibilidad de 0,01;
- g) Tiempo transcurrido entre la mezcla completa y la realización del ensayo;
- h) Cualquier desviación del procedimiento detallado en este documento.

El informe puede contener además, en el caso que se requiera:

- i) La temperatura del hormigón en el momento del ensayo;
- j) La hora del ensayo.

## Apéndice

Existe un proyecto para expresar el resultado del ensayo de la caja en L como  $PA = H2 / H_{\text{máx}}$

Dónde  $H_{\text{máx}}$  es 91 mm y es teóricamente la altura H2 si la tolva vertical contiene exactamente 12,7 litros de HAC y se autonivela completamente en el ensayo.

Usar este método de cálculo hace la medida más fácil y mejora la precisión del ensayo.

Sin embargo, tanto el volumen de HAC en la tolva como todas las dimensiones del molde deberán ser correctos si se va a usar esta constante.

### Atención:

**El valor de PA usando  $H2 / H_{\text{máx}}$  será distinto del obtenido como  $H2/H1$  y no se usará para mantener la conformidad con los requisitos del Anexo A de estas Directrices.**

**B.3 Anexo (informativo)**

**Precisión**

La repetibilidad  $r$  y la reproducibilidad  $R$  se han determinado con un programa que incluye 11 laboratorios, 22 operarios y 2 replicas, e interpretado de acuerdo con la UNE 82009.

Para el ensayo de tres obstáculos de barras los valores para  $r$  y  $R$  se dan a partir de las siguientes ecuaciones, donde  $C$  es el coeficiente de correlación.

$$r = 0,074 - 0,463 P_L, \text{ con } C^2 = 0,996, \text{ cuando } P_L \geq 0,65; \text{ y } r = 0,18 \text{ cuando } P_L < 0,65$$

y

$$R = 0,454 - 0,425 P_L, \text{ con } C^2 = 0,989, \text{ cuando } P_L \geq 0,65; \text{ y } R = 0,18 \text{ cuando } P_L < 0,65$$

Los valores de  $r$  y  $R$ , para valores típicos de  $P_L$ , calculados a partir de estas ecuaciones, se dan en la Tabla 1.

**Tabla 1 – Repetibilidad y reproducibilidad para valor típicos de la capacidad de paso**

<b>Relación de paso PA H2 / H1</b>	<b>≥ 0,8</b>	<b>&lt; 0,8</b>
Repetibilidad $r$	0,11	0,13
Reproducibilidad $R$	0,12	0,16

## Anexo B: Métodos de Ensayo para el HAC

### Anexo B.4

#### Ensayos de hormigón – Parte B4: Ensayo de la resistencia a la segregación en tamiz

##### Introducción

El ensayo de resistencia a la segregación se usa para calcular la resistencia del hormigón autocompactante a la segregación.

##### 1 Alcance

Este documento especifica el procedimiento para determinar la segregación en tamiz del hormigón autocompactante.

##### 2 Normas para consulta

Este documento incorpora referencias con y sin fecha, que provienen de otras publicaciones. Estas referencias normativas se citan en las partes adecuadas del texto y a continuación también se listan dichas publicaciones. Para referencias con fecha, las revisiones posteriores de cualquier documento deberán contemplarse en este anexo sólo cuando se efectúe su revisión. Para las referencias sin fecha la válida es la última edición de la publicación (incluyendo cualquier revisión).

PNE-EN 12350-1, *Ensayos de hormigón fresco – Parte 1: Muestreo*

UNE 7050:1997, *Tamices y tamizado de ensayo. Parte 4: Exigencias técnicas y verificación de tamices de chapa perforada.*

UNE 82009, *Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición*

##### 3 Principio

Después de tomar la muestra, se deja el hormigón durante 15 minutos y se anota cualquier segregación de lechada de exudación. La parte superior de la muestra se introduce en un tamiz de aperturas cuadradas de 5 mm. Después de 2 minutos se registra el peso del material que ha pasado a través del tamiz. La relación de segregación se calcula entonces como la proporción de la parte de la muestra que ha pasado a través del tamiz.

##### 4 Aparatos

**4.1 Tamiz**, con aperturas cuadradas de 5 mm, de 300 mm diámetro y una altura de 40 mm conforme con la UNE 7050:1997, junto con un recipiente del que el tamiz pueda sacarse con facilidad subiendo verticalmente.

**4.2 Báscula**, de plataforma plana que pueda acomodar el recipiente del tamiz y con una capacidad mínima de 10 kg, con una sensibilidad de  $\leq 20$  g.

**4.3 Recipiente de muestra**, hecho de plástico o metal, con un diámetro interno de  $300 \pm 10$  mm, una capacidad de 11 – 12 l y con tapa.

## 5 Muestra de ensayo

Se obtendrá una muestra que llene el recipiente de muestra de acuerdo con la PNE-EN 12350-1.

## 6 Procedimiento

Poner una muestra de  $10 \pm 0,5$  l de hormigón en el recipiente de muestra y poner la tapa. Dejarlo reposar en una superficie horizontal, sin golpes ni vibraciones, durante  $15 \pm 0,5$  min.

Asegurarse que la báscula está nivelada y libre de vibraciones. Poner el recipiente del tamiz encima de la báscula y anotar el peso ( $W_p$  g). Entonces poner el tamiz en el recipiente y anotar de nuevo el peso.

Después de la espera, sacar la tapa del recipiente de la muestra y anotar cualquier exudación de lechada que se haya producido en la superficie del hormigón. Con el tamiz y el recipiente encima de la báscula, y con la parte superior del recipiente de muestra unos  $500 \pm 50$  mm por encima del tamiz, verter rápidamente  $4,8 \pm 0,2$  kg de hormigón (incluyendo la lechada de exudación) en el centro del tamiz. Anotar el peso del hormigón en el tamiz ( $W_c$  g). Dejar el hormigón en el tamiz unos  $120 \pm 5$  s y después sacar el tamiz verticalmente sin agitar. Anotar el peso del recipiente y del hormigón que ha pasado dentro del recipiente ( $W_{PS}$  g).

## 7 Resultado del ensayo

La proporción de segregación SR se calcula a partir de la siguiente ecuación y se redondea al 1%.

$$SR = (W_{PS} - W_p) 100 / W_c \%$$

## 8 Informe de ensayo

El informe debe contener:

- a) Identificación de la muestra de ensayo;
- b) Lugar de realización del ensayo;
- c) Fecha de ejecución del ensayo;
- d) Presencia de agua de exudación, si la hay, después de 15 minutos;
- e) Proporción de segregación lo más cercano a 1%;
- f) Tiempo transcurrido entre la mezcla completa y la realización del ensayo;
- g) Cualquier desviación del procedimiento detallado en este documento.

El informe puede contener además, en el caso que se requiera:

- h) La temperatura del hormigón en el momento del ensayo;
- i) La hora del ensayo.

**B.4 Anexo (informativo)**

**Precisión**

La repetibilidad  $r$  y la reproducibilidad  $R$  se han determinado con un programa que incluye 11 laboratorios, 22 operarios y 2 replicas, e interpretado de acuerdo con la UNE 82009.

Los valores resultantes de  $r$  y  $R$ , se dan en la Tabla 1.

**Tabla 1 – Resultados de precisión**

<b>Proporción de segregación %</b>	<b>≤ 20</b>	<b>&gt; 20</b>
Repetibilidad $r$ %	3,7	10,9
Reproducibilidad $R$ %	3,7	10,9

**Anexo C: Mejoramiento del acabado del HAC**

La tabla adjunta resume los defectos principales que pueden surgir durante o después de la colocación del HAC. Algunos de los defectos descritos son también aplicables al hormigón vibrado convencional. No obstante, algunos de los defectos son más fácilmente evitables utilizando HAC por la naturaleza del producto. Hay que remarcar que los defectos de superficie tales como burbujas y otros defectos superficiales afectan la a la superficie del hormigón, otros problemas como las coqueras, juntas frías, tongadas separadas y grietas podrían condicionar la integridad del hormigón.

Tipo de defecto	Causas principales	Razones prácticas	Cómo prevenir o corregir
<b>Burbujas</b>	Aire atrapado Agua atrapada Aceite del desencofrante atrapado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exceso de finos / superficie específica excesivamente alta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducir finos</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicación en exceso o irregular del desencofrante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dotación especificada y aplicada uniformemente</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Superficie áspera del molde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar que la superficie del molde esté limpia</li> <li>Usar geo-textil como forro ya que absorberá el aire</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>velocidad de vertido demasiado rápida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar descarga constante en los elementos a hormigonar</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Longitud de flujo demasiado larga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limitar longitud de flujo a 5 m.</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Longitud de flujo demasiado corta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ampliar longitud de flujo a 1 m</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Distancia de caída libre demasiado grande</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rebajar la caída libre a &lt; 1m.</li> <li>Usar mangueras flexibles en descargas profundas</li> <li>Bombear de abajo arriba ayudará a expeler el aire</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura del hormigón demasiado alta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducir la temperatura del hormigón por debajo de 25 °C</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Velocidad de vertido demasiado lenta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planificar la entrega del hormigón y el emplazamiento de recursos para asegurar la continuidad del vertido</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Superplastificante defectuoso, particularmente el agente antiespumante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Productor de hormigón: mejora del almacenamiento, uso de la fecha y rotación de stock.</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Viscosidad demasiado alta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducir dosificación de VEA</li> <li>Revisar la proporción de la mezcla</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Granulometría de los áridos inadecuada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Usar VEA o aireante</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Amasada demasiado alto, oclusión de aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisar el tiempo de mezcla</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Interacción aditivos /cemento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar compatibilidad aditivo /cemento ante de la producción.</li> </ul>		
<p><b>Razones físicas:</b> capacidad de relleno pobre, capacidad de paso pobre, elevada viscosidad y alta tensión superficial de producto, bajo asentamiento y/o alto tiempo T<sub>500</sub>, rápida reducción de asentamiento</p>			

Tipo de defecto	Causas principales	Razones prácticas	Cómo prevenir o corregir
<b>Rallas verticales o rastros visibles de agua en la superficie del hormigón</b>	Segregación de agua y finos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta relación de agua respecto los finos</li> <li>Viscosidad baja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Puede ayudar el uso de VEA</li> <li>Aumentar la viscosidad con finos adicionales</li> <li>Usar aire ocluido para compensar la pobre distribución granulométrica de los áridos</li> </ul>
<b>Razones físicas:</b> baja estabilidad			

Tipo de defecto	Causas principales	Razones prácticas	Cómo prevenir o corregir
<b>Variaciones de color</b>	En la superficie  Diferencias entre lotes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura demasiado baja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mantener la temperatura mínima del hormigón y el encofrado durante el invierno.</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Asentamiento demasiado alto, viscosidad demasiado baja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incrementar la viscosidad incrementando los finos o considerar el uso de VEA</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Efecto retardante del aditivo o del agente desencofrante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Selección cuidadosa del aditivo con los requisitos de contenido de aire</li> <li>Reducir el contenido de agua o reducir la relación de adición del superplastificante</li> <li>Considerar el uso de un acelerante suave</li> <li>Usar geotextil como forro del encofrado</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Cambios de zona de vertido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Llenado continuo</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Membrana plástica de curado en contacto irregular con la superficie del hormigón</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar un buen contacto</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Superficie de maderas no fenólicas seca</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Humedecer el encofrado antes de la aplicación</li> <li>Usar preferiblemente las caras usadas de encofrado</li> </ul>
<b>Razones físicas:</b> Efecto retardante o manchado causado por el desencofrante, aditivo, etc. Viscosidad plástica demasiado alta o alta tensión superficial del producto			

Tipo de defecto	Causas principales	Razones prácticas	Cómo prevenir o corregir
<b>Superficie molde poco rígida o irregular</b>	Deformación del molde  “huellas digitales” de la superficie del molde a la del hormigón	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relación de vertido rápida o diseño del encofrado poco rígido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducir la velocidad de vertido para reducir la presión hidrostática</li> <li>Usar VEA para aumentar la viscosidad</li> <li>Rediseñar el encofrado</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Encofrado gastado</li> <li>Hormigón residual adherido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Renovar el encofrado</li> <li>Limpiar la superficie antes de llenar</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Agente desencofrante o método de aplicación inadecuado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ensayar para establecer el mejor agente desencofrante</li> <li>Aplicar con la dosificación apropiada, con equipo adecuado, usando la presión correcta y pulverizador de spray</li> </ul>

**“Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante”**

<b>Tipo de defecto</b>	<b>Causas principales</b>	<b>Razones prácticas</b>	<b>Cómo prevenir o corregir</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Relación agua /finos demasiado alta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>aumentar la dosificación del superplastificante o usar VEA</li> </ul>
<b>Razones físicas:</b> alta presión de encofrado viscosidad plástica demasiado baja			

<b>Tipo de defecto</b>	<b>Causas principales</b>	<b>Razones prácticas</b>	<b>Cómo prevenir o corregir</b>
<b>Coqueras</b>	Pasta o finos insuficientes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contenido de pasta/finos baja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumentarle usando mínimo 450 kg finos/m<sup>3</sup></li> <li>Añadir contenido de aire con un aireante</li> </ul>
	Hormigón segregado debido a una viscosidad plástica demasiado baja	<ul style="list-style-type: none"> <li>Granulometría inadecuada</li> <li>Tamaño de áridos demasiado grande comparado a los espaciados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Curva continua</li> <li>Disminuir el tamaño máximo de los áridos</li> </ul>
	Hormigón incapaz de llenar partes del molde	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fugas en el molde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Comprobar la integridad del molde, particularmente el sellado de las juntas</li> </ul>
<b>Razones físicas:</b> capacidad de llenado baja capacidad de paso baja estabilidad baja demasiado asentamiento y/o T <sub>500</sub> demasiado bajo segregación de los áridos gruesos /pasta			

<b>Tipo de defecto</b>	<b>Causas principales</b>	<b>Razones prácticas</b>	<b>Cómo prevenir o corregir</b>
<b>Incrustaciones</b>	La capa superficial contiene sólo material fino y ha asentado demasiado rápido	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falta de curado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar un curado apropiado a las condiciones ambientales</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Segregación y/o exudación causados por un bajo contenido de finos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumentar el contenido de finos</li> <li>Usar VEA</li> <li>Incrementar el contenido de aire con un aireante</li> </ul>
<b>Razones físicas:</b> estabilidad baja Segregación y/o exudación Secado demasiado rápido			

<b>Tipo de defecto</b>	<b>Causas principales</b>	<b>Razones prácticas</b>	<b>Cómo prevenir o corregir</b>
<b>Planos de unión visibles entre distintos lotes (comúnmente llamadas “juntas frías”)</b>	El endurecimiento superficial impide la unión monolítica con el siguiente hormigón	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entregas intermitentes de hormigón</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Llenado continuo: sin pausas</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Fraguado rápido del hormigón</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Preensayo: no haya fraguado demasiado rápido</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta temperatura del hormigón o del ambiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bajar la temperatura del hormigón a menos de 25°C</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Segregación de los áridos gruesos</li> <li>Superficie específica de finos demasiado alta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisar la proporción de mezcla</li> <li>Reducir la distancia de flujo</li> <li>Reducir el contenido de finos</li> </ul>
<b>Razones físicas:</b> capacidad de llenado baja sedimentación tixotrópica rápida pérdida de asentamiento viscosidad demasiado alta interacción aditivo - cemento			

Tipo de defecto	Causas principales	Razones prácticas	Cómo prevenir o corregir
<b>Rotura plástica (contracción temprana y asentamiento plástico)</b>	Secado demasiado rápido  Sedimentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curado pobre o iniciado muy tarde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empezar el curado inmediatamente después de la aplicación/ acabado</li> <li>• Curado apropiado de acuerdo a las condiciones ambientales</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Segregación y exudación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cerrar las fisuras plásticas antes del asentamiento del hormigón</li> <li>• Aumentar el contenido de finos</li> <li>• Usar VEA</li> <li>• Usar un aditivo aireante</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condiciones ambientales extremas (temperatura, humedad relativa, viento, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicar acabado de acuerdo con las condiciones ambientales reales</li> </ul>	
<b>Razones físicas:</b> incremento de la plasticidad retracciones de secado (fisura) baja estabilidad			