Revista de Edificación. **RE** • Nº 15 • Septiembre 1993

Hormigones de altas prestaciones (I)

MIGUEL ANGEL GUTIERREZ FERNANDEZ, DR. ARQUITECTO

RESUMEN. ***En este artículo se trata el tema de los Hormigones de Altas Prestaciones, debido a que tienen resistencias mecánicas y durabilidad superiores a la de los hormigones ordinarios.***
En esta primera parte del artículo, se estudian las características de los componentes que son necesarios para la fabricación de esta clase de hormigones. En la segunda parte se hace referencia a su dosificación, propiedades, durabilidad y aplicaciones.

SUMMARY. *In this article the subject of high utility concrete is dealt with because of its mechanical resistance and durability, superior to that of normal concrete.*
In this first part of the article the characteristics of the components necessary for the production of these types of concretes are studied. In the second part, reference is made to their dosage, properties, durability and applications.

INDICE GENERAL

0. Introducción ***1.*** *Componentes de los hormigones de altas prestaciones (HAP) o de muy altas prestaciones (HMAP) (1ª Parte RE 15)*
2. *Dosificación de HAP y de HMAP* ***3.*** *Propiedades del HAP y del HMAP* ***4.*** *Durabilidad* ***5.*** *Aplicaciones*
6. *Bibliografía (2ª Parte RE 16)*

0. INTRODUCCION

0.1 Se trata de hormigones de muy **alta compacidad**. Como consecuencia de esta característica se consigue que las prestaciones de estos hormigones mejoren en diferentes aspectos, como son:

a) El comportamiento mecánico: resistencia a compresión, resistencia a tracción, resistencia al esfuerzo cortante, resistencia al desgaste por abrasión.

b) La durabilidad: permeabilidad, desecación y fisuración, carbonatación, corrosión de armaduras, resistencia química, resistencia a las heladas.

c) La influencia en el diseño: esbeltez, mayores luces, reducción de peso propio.

0.2 Su denominación **hormigón de altas prestaciones (HAP)**, o bien **hormigón de muy altas prestaciones (HMAP)** en vez de **hormigón de alta resistencia (HAR)** u **hormigón de muy alta resistencia (HMAR)**, es debido a que en dichos hormigones no solo se consiguen resistencias mecánicas altas, sino que se mejora su durabilidad,como se deduce del análisis de las seis propiedades que se señalan como influyentes en ella (0.1.b), aunque en el caso de la corrosión de armaduras pueda existir algún efecto desfavorable y en el caso de la desecación, si no se toman precauciones en la primera fase de su vida plasto-viscosa, pueda favorecer la microfisuración y la carbonatación posterior.

Se suelen considerar como **HAR**, aquellos cuya resistencia característica a compresión a los 28 días de edad en probeta cilíndrica de 15x30 cm supera los 50 MPa y como **HMAR** a los que superan la resistencia de 80 MPa; aunque esta consideración de grado de resistencia varía de unos paises a otros y ha variado con el paso del tiempo.

Se puede considerar que las resistencias mecánicas mínimas que deben alcanzar los **HAP** y los **HMAP** para ser considerados como tales, sean los correspondientes a los **HAR** y **HMAR**, esto es 50 y 80 MPa.

1. COMPONENTES DE LOS HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES (HAP) O DE MUY ALTAS PRESTACIONES (HMAP)

1.1 Introducción

1.1.1 Ha sido un objetivo para la obtención de hormigones compactos, característica necesaria para alcanzar buenas resistencias mecánicas y durabilidad, la disminución de la relación **agua/cemento (a/c)**, hasta conseguir eliminar el agua no necesaria para la hidratación del cemento, pero que si lo es para la manejabilidad del hormigón fresco durante su puesta en obra.

1.1.2 Las investigaciones para conseguir este hormigón compacto con el mínimo volumen de poros en su interior, con características de una roca dura, se dirigían a conseguir:

a) Reducir la cantidad de agua de amasado hasta el volumen mínimo de agua necesaria en cada caso para la hidratación del cemento utilizado.

b) Que la trabajabilidad de estos hormigones frescos, amasados con menor cantidad de agua, sea aceptable.

1.1.3 Las investigaciones realizadas, sobre todo durante las décadas 1970-1990 (se inician en 1958 en Japón), han conseguido este objetivo por dos vías diferentes de naturaleza físico-química, que se complementan:

1. Utilización de **superfluidificantes.**

Según la *UNE 83-200-84. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Clasificación y definiciones*, entre los aditivos que modifican la reología de los hormigones en estado fresco define los superfluidificantes como aditivos cuya función principal es:

a) Aumentar, significativamente, la trabajabilidad del hormigón, mortero o pasta, para una relación agua/cemento dada.

b) Producir una reducción considerable de la relación agua/cemento, para una determinada trabajabilidad.

c) Obtener simultáneamente los efectos a) y b).

La composición básica de estos aditivos está constituida por polímeros orgánicos sintéticos y naturales, entre estos compuestos químicos se pueden destacar algunos policondensados de formaldehído y de naftaleno sulfonado o formaldehído y melamina sulfonada.

Estos aditivos tienen propiedades dispersantes para las partículas de cemento, debido a lo cual se consigue disminuir la floculación de dichas partículas en el agua de amasado.

2. Ampliación de la curva granulométrica mediante la utilización de **adiciones de elementos ultrafinos**, especialmente **microsílice**, cenizas volantes ricas en sílice, filler calizo.

1.1.4 Con la utilización aislada de estas vías se han conseguido **HAP** de resistencia a compresión entre 60 y 80 MPa. Combinando ambas vías se han conseguido **HMAP** de resistencia a compresión entre 90 y 140 MPa.

Es posible que actuando sobre los otros componentes del hormigón seleccionando el cemento y los áridos a utilizar en él y con la adición de polímeros sintéticos (resinas sintéticas), se consigan hormigones de más altas prestaciones que puedan competir con otros materiales, considerados como más nobles, y que habitualmente se exigen en otros sectores industriales.

1.1.5 Consideraremos los siguientes componentes de los **HAP** y de los **HMAP**: cemento, áridos, agua, aditivos y adiciones.

1.2 Cemento

1.2.1 El cemento no tiene que ser especial, se pueden emplear los cementos comerciales disponibles en el mercado.

Al cemento utilizado se le exige que con él se puedan obtener morteros con resistencias altas y que sean compatibles con los aditivos y adiciones utilizadas en la mezcla.

Se ha recomendado que la resistencia a compresión del mortero en probeta cúbica, a siete días, fuese al menos de 30 MPa. Para ello podrían utilizarse cementos de los tipos **I** (Cem. Portland), **II** (Cem. Portland con Adiciones) y **III** (Cem. de Alto Horno) con una categoría resistente **Alta** (45 MPa) o **Muy Alta** (55 MPa). Es frecuente la opinión que, para la fabricación de **HAP** es necesario utilizar Cemento Portland de clase **I-0** y **I**.

Los cementos idóneos técnicamente para la fabricación de **HAP** son de clase **I-0** y categoría resistente 55A, 55, 45A y 45, que sean de composición química y de grado de molturación **uniformes** en las partidas que se suministren sucesivamente. Con estos cementos se **aseguran** las siguientes cualidades:

a) Se consiguen morteros de resistencias altas.

b) No se producen cambios importantes en la velocidad de hidratación de los constituyentes del cemento debidas a variaciones de su superficie específica.

c) Al ser cementos comerciales sin adiciones, con un 100% de clinker portland y regulador de fraguado, se puede llegar a saber y controlar con mayor facilidad las repercusiones que tienen en la fabricación del hormigón la incorporación de adiciones y aditivos en cantidad y calidad conocidas, especialmente de microsílice y de superfluidificantes.

Aunque está clara la conveniencia teórica de la utilización de cementos **I-0 55** en los **HAP**, hay que tener en cuenta que, actualmente, son muy pocas las industrias cementeras que los fabrican, lo cual puede

encarecer su precio en el punto de consumo, debido a ello , en algunos casos será necesario considerar la posibilidad de utilizar otras clases y tipos de cementos.

1.2.2 La cantidad de cemento utilizada en los **HAP** suele ser considerablemente superior a la utilizada en los **hormigones ordinarios (H.O)**. Esta cantidad suele oscilar de 400 a 500 Kg/m^3. En cada caso concreto, en función de las características de los demás componentes del hormigón, hay una dosificación óptima de cemento con la que se consigue la máxima resistencia. Es recomendable hacer **ensayos de información** para ajustar previamente la dosificación de todos los componentes que se vayan a emplear después en la fabricación del hormigón que se utilizará en obra.

1.2.3 Composición química de los clinkeres

La composición química, determinada analíticamente, de los clinkeres se suele expresar en forma de porcentajes de diversos óxidos.

Los **componentes químicos mayoritarios** de clinkeres industriales de cemento portland son los óxidos siguientes:

CaO, SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3, designados de forma abreviada, respectivamente como **C, S, A** y **F**.

Frecuentemente existen también otros **componentes químicos secundarios o minoritarios**, que generalmente no sobrepasan un pequeño porcentaje del peso del clinker, pero que pueden tener influencia en el comportamiento del clinker. Por ejemplo: MgO (magnesia), Na_2O y K_2O (álcalis), SO_3, MnO, P_2O_5, etc.

Los cuatro componentes químicos mayoritarios citados (C, S, A, F), se pueden encontrar en el clinker portland en forma de distintos **grupos de compuestos** (sistemas fisicoquímicos en equilibrio en unas condiciones dadas) más complejos bien definidos, cuya naturaleza y porcentaje en el clinker dependen de la composición y finura del crudo, del proceso de cocción (calcinación y sinterización) en el horno y de la velocidad de enfriamiento del clinker.

Uno de estos grupos de compuestos complejos que potencialmente pueden llegar a formarse durante la fabricación del clinker portland es el formado por los siguientes compuestos: silicato tricálcico ($3CaO.SiO_2$), silicato bicálcico ($2CaO.SiO_2$), aluminato tricálcico ($3CaO.Al_2O_3$) y alumino-ferrito tetracálcico ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$), designados de forma abreviada, respectivamente como **C_3S, C_2S, C_3A** y **C_4AF.**

Estos compuestos complejos son los **responsables más importantes** (según su clase y porcentaje) **de las propiedades de clinker portland y de los cementos derivados de ellos**, debido a lo cual se consideran como "**constituyentes mineralógicos principales**" del clinker portland. En él existen también porcentajes pequeños de otros componentes (cal libre, magnesia libre y álcalis) que pueden considerarse a su vez como "**constituyentes mineralógicos secundarios**" del clinker.

En los cementos a base de clinker portland, además de los constituyentes mineralógicos del clinker utilizado, se le añade el **sulfato cálcico** en forma de yeso dihidrato (o mezclas de este con yeso hemidrato y/o anhidrita soluble) como regulador de fraguado.

Existen ecuaciones (fórmulas de Bogue, UNE 80-304) para calcular la **composición potencial**, o porcentaje teórico aproximado de los constituyentes mineralógicos principales (incluido el yeso) del clinker y del cemento (si este solo consta de clinker y yeso) en función de los porcentajes de los componentes químicos mayoritarios (C, S, A y F). La **composición real** (clase y porcentajes de constituyentes mineralógicos) de un clinker se aproximará más o menos a su composición potencial según hayan sido las circunstancias de su fabricación.

La influencia de la composición de los clinkeres portland en los cementos de los que formen parte, dependerá del porcentaje en el que estén en ellos y de la naturaleza de las adiciones que se hayan incorporado en cada cemento.

1.2.4 Composición química de los cementos

Para realizar el análisis químico de los clinkeres portland y de los cementos fabricados con ellos, existen diversas normas. Se utilizan fundamentalmente tres:

– *UNE 80-215-88 (EN 196-2) Métodos de ensayo de cementos. Análisis químico de cementos,* para el análisis de clinkeres y de cementos sin adiciones (solo con reguladores de fraguado).

– *UNE 80-216-91 (ENV 196-4) Métodos de ensayo de cementos. Determinación cuantitativa de los componentes,* para cementos portland con una o varias adiciones.

– *UNE 80-217-91 (EN 196-21) Métodos de ensayo de cementos. Determinación del contenido de cloruros, óxidos de carbono y alcalinos en los cementos,* que se aplica tanto a los cementos como a sus materiales componentes.

La composición analítica química obtenida normalmente se expresa como porcentajes en peso de los siguientes componentes:

CaO **(C)**, SiO_2 **(S)**, Al_2O_3 **(A)**, Fe_2O_3 **(F)**, Na_2O + K_2O, MgO, SO_3, Cloruros, pérdida al fuego **(P.F.)**, residuo insoluble **(R.I.)**.

En el *RC-93. Instrucción para la recepción de cementos,* se refleja un porcentaje máximo aceptable para los cuatro últimos.

La proporción de los constituyentes mineralógicos principales de un clinker de cemento portland suele oscilar, según los casos, entre los límites señalados en la tabla de la figura 1, recogida en la norma *UNE 80-300-92. Cementos, recomendaciones para el uso de cementos.*

Según la norma *UNE 80-302-91. Cementos.*

Especificaciones químicas para sus componentes, los clinkeres portland deberán cumplir las siguientes condiciones:

a) *Deberán estar compuestos, al menos en 2/3 de su masa, por silicatos cálcicos (C_3S y C_2S). El resto debe estar formado por compuestos de óxido de aluminio (AlO_3), óxido de hierro (Fe_2O_3) y otros óxidos.* Con ello se pretende asegurar que el cemento tenga resistencias suficientemente elevadas tanto a corto plazo (por contribución del C_3S) como a largo plazo (por contribución del C_2S).

b) *La relación porcentual en masa del óxido de calcio (CaO) con respecto al dióxido de silício (SiO_2) no debe ser inferior a 2.* Con ello se pretende garantizar una relación de C_3S a C_2S en el clinker lo bastante alta para que los cementos resultantes tengan una velocidad de endurecimiento suficientemente rápida y lleguen a alcanzar las resistencias previstas; también para conseguir que durante su hidratación se forme una cantidad suficiente de portlandita (hidróxido de calcio formado en la hidrólisis parcial e hidratación de los silicatos de calcio anhidros del clinker) en pasta para asegurar una gran reserva alcalina que mantenga en el cemento fraguado un pH elevado, que contribuya a la protección de las armaduras y para la combinación con los elementos ácidos de las adiciones de carácter puzolánico (microsílice, cenizas volantes silíceas) propias del cemento.

c) *El contenido de óxido de magnesio (MgO) no debe ser superior al 5% del peso del clinker.* Con ello se pretende evitar la posibilidad de expansión del cemento a largo plazo.

Conocer la composición química y la finura de molido de los cementos a utilizar para la fabricación de **HAP** nos permitirá elegir el cemento que se adapte mejor a la clase de obra concreta que se vaya a realizar con dicho hormigón.

1.3 Aridos

Se puede utilizar cualquier tipo de árido que cumpla el *Artículo 7. Aridos,* de la *Instrucción EH-91*, en cuanto a tamaños, condiciones físico-químicas y físico-mecánicas, granulometría y coeficiente de forma.

Ya que, aproximadamente, el 75% del volumen de un hormigón está constituido por áridos pétreos y que de estos, el volumen de los áridos gruesos suele ser el doble que los áridos finos, será muy importante utilizar **áridos seleccionados** (en función de su naturaleza mineralógica, su clasificación granulométrica y su limpieza) cuyas características contribuyan a conseguir un hormigón de adherencia, resistencia y compacidad elevadas.

COMPUESTO	PORCENTAJE		
	Máx.	Mín.	Med.
C_3S	70	35	60
C_2S	35	10	20
C_3A	17	0	10
C_4AF	20	5	12

Figura 1
Composición potencial aproximada del clinker

Las características de los áridos serán compatibles con otras operaciones posteriores de puesta en obra (bombeo de hormigón, llenado de encofrados con gran cantidad de armaduras, etc.).

1.3.1 Aridos gruesos

Las características de los áridos que repercuten en las propiedades del **HAP** son la siguientes:

a) Forma y textura superficial:

La rotura de un **HO** se suele producir por pérdida de adherencia entre el árido grueso y el mortero de cemento que los envuelve debido a la rotura de la pasta de cemento que está en contacto con los áridos. Los **HAP** pueden fallar por pérdida de adherencia o por rotura de los áridos si estos no son adecuados a las elevadas tensiones de trabajo previsibles.

La adherencia entre los áridos y la pasta de cemento dependerá de la textura (rugosidad superficial) y limpieza de los áridos, de la cantidad de cemento y de la relación agua/cemento (a medida que esta relación es mayor, la zona de la pasta de cemento que está en contacto con la superficie del árido tiene una microestructura más porosa y menos resistente que en el resto de la pasta).

Los áridos gruesos de machaqueo producen hormigones de mayor resistencia que los rodados debido a que, por su textura, desarrollan mayor adherencia con la pasta de cemento endurecido.

Se recomienda el uso de áridos gruesos de machaqueo de forma próxima a la cúbica. No es bueno utilizar áridos con forma de lajas o circulares, o con superficies lisas, ya que tienen resistencias menores y los hormigones frescos tienen peor trabajabilidad.

b) Granulometría:

La compacidad del hormigón dependerá, en gran parte, de la proporción de los diversos tamaños de los granos que componen el árido utilizado y de la forma que tengan dichos granos. Teniendo especial importancia la influencia del grano grueso.

El tamaño máximo del árido grueso es algo menor que el de los tamaños que se utilizan habitualmente en **HO**, no deben pasar de 15 mm; sin embargo, se han conseguido altas resistencias con áridos de tamaño máximo 25 mm. Ello es debido a que, normalmente, en la mayoría de los áridos pétreos naturales obtenidos por machaqueo, los áridos de tamaño más pequeño son más resistentes que los de tamaño superior, ya que, en este proceso de transformación, se eliminan defectos internos del árido (microfisuras, poros, partículas alteradas o

menos resistentes, etc.) que influirían negativamente en su comportamiento mecánico. Además, al utilizar un árido de tamaño máximo pequeño, se consigue que la superficie de contacto entre los áridos y la pasta de cemento sea mayor para un mismo volumen de áridos, consiguiéndose con ello una mayor adherencia entre los áridos gruesos y el mortero que los rodean. Estas dos circunstancias tienen gran repercusión en la capacidad de los **HAP** para soportar elevadas tensiones de trabajo como consecuencia de las solicitaciones a que estén sometidos.

c) Propiedades mecánicas:

En los **HO** todos los áridos que se utilizan generalmente son de mayor resistencia que los hormigones de los que forman parte, pero en los **HAP** algunos de estos áridos pueden no tener suficiente resistencia. Hay que tener en cuenta que en el interior de un hormigón en carga, el reparto de tensiones puede que no sea uniforme, pudiéndose alcanzar en algunos puntos tensiones mayores a las previstas.

Los áridos utilizados deben tener una resistencia a compresión elevada y uniforme. Las máximas resistencias se han obtenido con áridos de basalto; también se han obtenido altas resistencias con áridos de calizas de buena calidad.

Los tipos de rocas más utilizados en **HAP** son: basalto (250-400 MPa), dioritas y gabros (170-300 MPa), diabasas (165-250 MPa), sílice y ofita (150-300 MPa), granitos (125-240 MPa) y calizas compactas (50-200 MPa).

La procedencia de los áridos para el mismo tipo de **HAP** de una misma obra debe ser siempre la misma.

d) Estabilidad fisico-química

Las partículas que componen los áridos para **HAP**, además de tener la forma, granulometría y resistencia mecánica adecuadas, al igual que en los **HO**, deberán estar limpias, no hincharse o retraerse cuando se humedecen o secan, no tener componentes que alteren la hidratación del cemento o que reaccionen con sus productos de hidratación produciendo expansiones, no contener sustancias que puedan reducir la durabilidad del hormigón y/o de las armaduras, etc., tal y como se prescribe en la *Instrucción EH-91.*

1.3.2 Aridos finos

Los granos de las arenas procedentes de machaqueo, generalmente, tienen formas excesivamente angulosas y de gran superficie específica, que dan lugar a mezclas poco trabajables, por lo que se hace necesario utilizar una mayor cantidad de agua para que tengan una trabajabilidad aceptable, aumentándose así la relación a/c, lo cual reducirá la resistencia del hormigón resultante. Por ello, en los **HAP**, es recomendable la utilización de **árido fino rodado**. Una solución intermedia aceptable podría ser utilizar una mezcla compuesta en su mayor parte por áridos finos rodados y la parte de tamaño menor de arena de machaqueo.

En la fabricación de los **HAP** se utiliza una importante cantidad de componentes finamente molidos como consecuencia de la utilización de dosificaciones de cemento altas y por el empleo de adiciones minerales (microsílice, cenizas volantes ricas en sílice, filler calizo), debido a lo cual las mezclas resultantes tienen un elevado contenido de finos que aseguran la trabajabilidad y la cohesión del hormigón fresco, por ello, en los **HAP** es conveniente que el árido fino (de 0-5 mm de diámetro) sea una arena no muy fina en la que hayan disminuido las cantidades de árido de tamaño inferior a 160 μm y 315 μm (luces nominales de las aberturas de tamices de ensayo según *UNE-7-050-85. Parte 2*). Se recomienda un módulo de finura próximo a 3 y equivalentes de arena superiores al 80 %.

1.4 Agua de amasado

En los **HAP** se utiliza menor cantidad de agua que en los **HO** Es utilizable cualquier agua que cumpla las condiciones que se contemplan en el *Artículo 6º. Agua,* de la *Instrucción EH-91.*

1.5. Aditivos químicos

Estos productos deben cumplir las especificaciones que se describen en el *Apartado 8.1. Aditivos,* de la *Instrucción EH-91.*

Dado que en el mercado proliferan gran cantidad de estos productos, es muy aconsejable verificar que cada aditivo que se vaya a utilizar disponga de la documentación que acredite que cumple adecuadamente con las especificaciones y condiciones de empleo definidas en las correspondientes normas UNE.

Antes de utilizar cualquier tipo de aditivo en obra, es recomendable hacer los **ensayos de información** adaptados en cada caso a las condiciones de obra y de un modo especial a los materiales que se vayan a utilizar (cemento y áridos), que permitan ajustar para ese hormigón concreto cual es la dosificación adecuada del aditivo que se vaya a emplear en sus condiciones reales de utilización.

1.5.1 Superfluidificantes

La utilización de **superfluidificantes**, denominados también **superplastificantes**, es necesario para **conseguir reducir** la relación agua/cemento, manteniendo o mejorando su trabajabilidad. Estos aditivos dan mayor cohesión a la masa fresca sin alterar su fluidez, reduciendo también los riesgos de segregación de áridos para consistencias con asientos grandes en el cono de Abrans.

Se consiguen reducciones del contenido de agua de amasado del 20 al 30% (llegan a reducir la rela-

ción agua/cemento a valores inferiores a 0,30, es decir, prácticamente al agua necesaria para la hidratación de cemento), manteniendo la misma consistencia de la masa fresca y una buena trabajabilidad si está adecuadamente dosificada, formándose una pasta de cemento fraguado con una **microestructura muy densa** con características mecánicas similares o superiores a las de los áridos utilizados disminuyendo a su vez la posibilidad de aparición de fisuras por retracción hidráulica. Debido a ello, el hormigón endurecido obtenido podrá alcanzar **altas prestaciones** por tener menor porosidad y permeabilidad y mayores resistencias mecánicas que si no se hubiese reducido la cantidad de agua de amasado, todo lo cual mejora su durabilidad.

No obstante, hay que advertir que los hormigones con superfluidificantes necesitan mayor energía de compactación que los que tienen mayor contenido de agua para la misma consistencia.

Las dosificaciones de superfluidificantes dependen de las características del producto, del porcentaje de agua que se pretende reducir y de la dosificación y características del cemento utilizado. Suele variar entre el 0,5% y el 2% del peso del cemento, lo que representa que oscila entre 5 y 20 litros por metro cúbico de hormigón. En los **HMAP** suelen utilizarse las dosificaciones más elevadas de superfluidificantes.

La mayor parte de los superfluidificantes actuales tienen un pH que varía entre 7 y 10.

La norma *UNE 83-282-90. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Superfluidificantes (Reductores de agua de alta actividad),* define las especificaciones y las condiciones de empleo de estos productos.

Los superfluidificantes de calidad garantizada (generalmente más caros que otros de menos garantía) que se utilizan actualmente son productos que no suelen tener efectos secundarios nocivos para el hormigón del que forman parte.

Supuesta la compatibilidad del cemento y el aditivo superfluidificante, hay que tener en cuenta que el mismo superfluidificante no se comporta de igual manera con cementos distintos aunque sean de la misma categoría resistente. Su efectividad con cada cemento depende especialmente de la composición química del cemento y de su finura de molido (suele disminuir la efectividad a medida que el molido es más fino).

La efectividad de un superfluidificante, que hace que un hormigón que por su contenido de agua de amasado tendría una consistencia seca o plástica se transforme en otro de consistencia blanda o fluida, se mantiene solo **por un tiempo limitado**, a partir del cual experimentan una pérdida rápida del asiento en el cono de Abrans y, por ello, de su trabajabilidad. Se suele apreciar aproximadamente a los 30 minutos de su adición, dependiendo de la composición del fluidificante y del tipo de cemento utilizados, aunque puede volver a recuperarse la consistencia anterior añadiendo una nueva cantidad de aditivo a la masa de hormigón fresco.

La forma de añadir el aditivo a la mezcla durante el proceso de fabricación del hormigón influye en su efectividad y en la duración de su efecto. Normalmente se añade en dos veces. Primero, mezclando con el agua de amasado de 1/3 a 2/3 de la dosis total prevista que permitirá una mezcla homogénea de todos los componentes y su transporte sin segregación, el resto se añade 20 o 30 minutos después del amasado (incluso, en algunos casos, se añade en su totalidad después del amasado), lo que permite mantener una buena trabajabilidad durante una hora.

Para reducir este inconveniente de pérdida de trabajabilidad, especialmente en climas calurosos y cuando el transporte del hormigón amasado dure mucho tiempo, se puede combinar la acción de un retardador convencional con un superfluidificante o utilizar superfluidificantes con propiedades simultáneas de retardador. En climas fríos y para utilizar en prefabricados, puede ser conveniente la utilización de superfluidificantes con propiedades simultaneas de acelerador de fraguado.

1.5.2 Otros aditivos químicos

Pueden utilizarse **aireantes**, cuando sean necesarios para que el hormigón de respuesta positiva a acciones de agentes agresivos, como puede suceder en el caso de estar situado en climas con heladas frecuentes.

En **HMAP** se recomienda utilizar aireantes sólo cuando se prevén problemas de durabilidad; su utilización suele disminuir la resistencia a compresión.

Se utilizan **retardadores** de fraguado para tener periodos de uso más largos del hormigón fresco, así como para reducir las temperaturas producidas por el calor de hidratación.

1.6 Adiciones minerales

1.6.1 Generalidades

Con cantidades elevadas de cementos, áridos seleccionados, superfluidificantes, una relación a/c baja y una cuidada fabricación se pueden conseguir **HAR** con una trabajabilidad aceptable, pero no **HMAR**.

Para conseguir **HAP** y **HMAP** es necesario añadir en la dosificación un porcentaje adecuado de adiciones minerales cementosas que, además de contribuir a aumentar su resistencia, mejoran su trabajabilidad.

Las adiciones minerales **activas químicamente** son materiales inorgánicos finamente molidos que, debido a su hidraulicidad (atenuada o latente) y/o puzolanidad, tienen **propiedades cementosas** cuando son amasados con agua y, generalmente,

con clinker portland porque, en esas condiciones, se producen en los componentes de las adiciones unos procesos físico-químicos que hacen que la pasta que se forma pueda fraguar y endurecer con mayor o menor rapidez. Ello es debido a que, después del amasado, se han formado silicatos y aluminatos cálcicos hidratados semejantes a los producidos en la hidratación del propio clinker portland que contribuyen, junto con los del clinker, a las propiedades de la pasta cementosa: resistencia, adherencia a los áridos, impermeabilidad, etc.

Las velocidades de estas reacciones en las adiciones son **menores** que las correspondientes de hidratación de los constituyentes del clinker (C_3S, C_2S, C_3A) y, algunas de ellas, comienzan después, lo que hace que el desarrollo de las resistencias de las adiciones sea mas lento que el de los componentes del clinker, pero sin perjuicio de que las resistencias a plazos medios o largos sean suficientemente altas, dependiendo de su naturaleza.

Hay adiciones que **pueden considerarse inertes** porque **no tienen** (o muy poco) **propiedades cementosas**, pero que pueden ejercer acciones de tipo físico, comunes a las de las demás adiciones, la reología y tixotropía de las pastas y la exigencia y retención de agua por parte de estas.

Debido a las propiedades cementosas de las adiciones, estas **se utilizan complementariamente al cemento**, unas veces de añaden en el proceso de fabricación de los distintos tipos y clases de cementos, otras en el proceso de amasado de los hormigones o, incluso, en ambas ocasiones. El cemento y las adiciones, una vez amasadas con agua, forman una **pasta cementosa hidratada** que fragua y endurece.

1.6.2 Adiciones Puzolánicas

• Las adiciones minerales de carácter puzolánico, sin propiedades hidráulicas cementosas por si mismas, cuando están finamente molidas y son amasadas conjuntamente con cementos derivados clinker portland, reaccionan sus constituyentes ácidos (sílice y alúmina activas) con la cal (disolución saturada de hidróxido de calcio o portlandita) producida por la hidrólisis parcial que tiene lugar en la hidratación de los silicatos (C_2S y C_3S) del clinker, dando lugar a los mismos compuestos hidratados que el propio clinker, principalmente tobermorita (silicatos de calcio hidratados).

La **tobermorita** formada directamente por la hidratación de los silicatos del clinker se denomina **primaria**, y la formada por la acción puzolánica de las adiciones sobre la portlandita se denomina **secundaria**. La **tobermorita**, en sus diversas formas y estructuras, es el responsable principal de la trabazón, adherencia y resistencia de la pasta de cementosa endurecida y, por ello, también de los morteros y hormigones.

• Este **aumento** de la tobermorita secundaria sobre la primaria en la pasta cementosa hidratada tiene **varios efectos positivos**:

a) Produce un **incremento de la resistencia mecánica** de la pasta cementosa fraguada, con respecto a la misma pasta sin adiciones puzolánicas, sobre todo a medio y largo plazo, debido a que las reacciones puzolánicas son más lentas.

b) La fijación de la portlandita no combinada en forma de tobermorita secundaria confiere a la pasta cementosa fraguada, y por tanto al hormigón del que forma parte, una **mayor resistencia química**, que aumentará su durabilidad, como consecuencia de que:

1. La tobermorita es mucho **menos soluble en agua** y **menos atacable por medios ácidos** que la portlandita, lo que la hace menos sensible al deslavado y arrastre; debido a estas características, la transformación de portlandita en tobermorita da a la pasta de cemento fraguada **mayor estabilidad** frente a los ataques por aguas puras (de gran poder disolvente, como las de montaña), ácidas y carbónicas agresivas. Las aguas puras disuelven físicamente la portlandita; las ácidas la convierten químicamente en sales cálcicas solubles; las carbónicas agresivas la transforman también químicamente en bicarbonato cálcico, que es soluble y lavable. Todo ello, hace que la pasta cementosa fraguada (y los morteros y hormigones de los que forma parte) progresivamente sea **más porosa y menos resistente**. La formación de tobermorita contribuye a atenuar o evitar esta clase de daños en los hormigones.

2. La presencia de adiciones puzolánicas en los hormigones contribuye también a **diluir** los componentes del clinker más sensibles y débiles ante determinados agentes agresivos externos, como cuando el aluminato tricálcico (C_3A) y el aluminoferrito tetracálcico (C_4AF) entran en contacto con agua de mar o con sulfatos disueltos de terrenos yesíferos.

3. La formación de geles de tobermorita secundaria durante las etapas de fraguado y endurecimiento de un hormigón con adiciones puzolánicas produce una **variación de la red de poros capilares** que se forman como consecuencia del aire ocluido y, sobre todo, del agua de amasado que todavía no ha sido incorporada a los productos de hidratación. Dado que los productos de hidratación ocupan más del doble de su volumen antes de hidratarse, la red de poros capilares, que forma un sistema interconectado de capilares con distribución aleatoria en todo el hormigón que no es visible directamente (se supone que su tamaño es de 1,3 µm aproximadamente), puede bloquearse, segmentarse y reducir su volumen a medida que **avanza la hidratación** de las adiciones puzolánicas (y de los granos de cemento no hidratados todavía). Este proceso, al contribuir a que se reduzcan el volumen y la continuidad de los poros capilares, hace que tanto el hormigón como la pasta cementosa endurecida que lo compone sean más compactos y sean más imper-

meables al agua y a las disoluciones iónicas agresivas (especialmente de sulfatos y cloruros), más resistentes a la penetración de iones en su interior por difusión y, también, se reduce su vulnerabilidad a las heladas. Esta reducción de poros capilares continuos depende mucho de la combinación de **dos factores**, de la relación agua/cemento y de que se mantenga un periodo suficientemente largo de curado por humedad.

• Las adiciones minerales puzolánicas utilizadas son las siguientes:

– Ultrafinos silíceos obtenidos por molienda, de tamaño medio 1µm.

– Humo de sílice o microsílice.

– Cenizas volantes silíceas.

Las adiciones **más empleadas** son el humo de sílice o microsílice en **HAP** y **HMAP** y, en menor escala, las cenizas volantes silíceas en **HAP**.

1.6.3 Microsílice

• Es un producto altamente silíceco (normalmente superior al 90%) y de textura muy fina, que se forma y recoge en los procesos de obtención de silicio y ferrosilicio, y que consta de partículas esféricas muy finas de sílice amorfa (0,1 a 0,2 µm), con una superficie específica 50 veces mayor que la de un cemento portland ordinario (su superficie específica varía de 14,2 a 22,3 m^2/gr, la del clinker portland es de 0,3 a 0,4 m^2/gr). Esto hace que sea extraordinariamente activo como material puzolánico y que desarrolle su puzolanicidad en un plazo relativamente corto.

La microsílice es un polvo de color gris y tonalidad variable de claro a oscuro, que mezclado con agua forma una pasta de color negro. Tiene una densidad relativa aproximada de 2,2, menor que la del cemento, cuyo valor, también aproximado, es de 3,1.

Las características químicas exigidas a la microsílice como adición a las pastas cementosas, morteros y hormigones vienen recogidas en el reciente proyecto de norma *UNE 83-460. Adiciones al hormigón. Humo de sílice. Definiciones, especificaciones, recomendaciones generales para la utilización del humo de sílice* son las siguientes: un contenido de óxido de silicio (SiO_2) mayor o igual al 85%, una pérdida por calcinación menor o igual de 5% y un contenido del cloruros menor o igual del 0,1%; referidos a la masa de la muestra seca.

Comercialmente, algunas adiciones de microsílice vienen con **algún aditivo** superfluidificante incorporado que facilita su manipulación.

Dada la composición y gran finura de la microsílice, esta ejerce **dos tipos de acciones** en el hormigón del que forma parte si su dispersión en él ha sido uniforme, simultáneamente se comporta como **adición puzolánica** y como **filler.**

• Debido a la **acción puzolánica**, cuya velocidad de reacción es más rápida que la de las puzolanas naturales y la de las cenizas volantes, se forman en la pasta cementosa silicatos de calcio hidratados de **mayor densidad y menor permeabilidad** que los silicatos de calcio del cemento, con el consiguente aumento de resistencia y disminución de porosidad. Su capacidad de fijación de cal (portlandita) es tal que, si la formación de esta no fuese suficiente, podría llegar a eliminarla totalmente, lo cual no es deseable, pues la portlandita constituye la **reserva alcalina** de la pasta cementosa fraguada, ya que confiere a ésta un pH de aproximadamente 12,6, necesario y suficiente para mantener en **estado pasivo**, exento de corrosión, las araduras de acero de los hormigones armados y sobre todo, pretensados.

• El efecto físico del **filler** se manifiesta en que:

a) Se consigue **mejorar algunas propiedades reológicas** de los hormigones frescos, como es la **reducción de la relación agua/cemento** manteniendo su trabajabilidad, ya que se comporta como un plastificante que reduce su viscosidad al disminuir el rozamiento interno de los componentes del hormigón y, a la vez, **aumenta su cohesión** de manera importante, lo que reduce la tendencia a la segregación de finos y la exudación, que son la principal causa de heterogeneidades en la microestructura de la pasta cementosa hidratada.

b) Las patículas de microsílice libres actúan como numerosos **puntos de precipitación** de los productos de hidratación del cemento, dando lugar a un cierre de poros y canales capilares y a hormigones más homogéneos.

• Como consecuencia de la acción conjunta de la microsílice, del superfluidificante y de una alta dosificación de cemento, **se modifica la microestructura de la pasta cementosa fraguada y de su zona de contacto con la superficie de los áridos**, de forma que, alcanza mayor densidad y su resistencia y su adherencia a los áridos se refuerza de una forma muy eficaz. La incorporación de microsílice en la composición de hormigón puede contribuir a que pueda alcanzar **mayores prestaciones** físicas, mecánicas y químicas, **mejorando su resistencia y durabilidad.**

1.6.4 Cenizas volantes

Las cenizas volantes se pueden utilizar también en la fabricación de **HAP** debido a su acción puzolánica, pero al ser una adición más pobre en sílice y debido al mayor tamaño de sus partículas, su acción puzolánica es **menos activa y más tardía** que con la microsílice. Estas características hacen que en general la utilización de este tipo de adición no sea tan idónea como la microsílice.

Las cenizas volantes a utilizar en **HAP** deben ser de gran uniformidad y su calidad debe cumplir las especificaciones que figuran en el *Apartado 8.2. Adiciones* de la *Instrucción EH-91.*