



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
DE CARTAGENA**



**ESCUELA DE ARQUITECTURA  
E INGENIERÍA EN LA  
EDIFICACIÓN**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**DOSIFICACIÓN, COMPORTAMIENTO EN ESTADO  
FRESCO Y PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO  
DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE EN LA REGIÓN  
DE MURCIA**

Autor:

Andrés Jiménez Madrid

Director Académico:

Dr. Carlos José Parra Costa





**DOSIFICACIÓN,  
COMPORTAMIENTO EN  
ESTADO FRESCO Y  
PROPIEDADES EN ESTADO  
ENDURECIDO DEL  
HORMIGÓN  
AUTOCOMPACTANTE EN  
LA REGIÓN DE MURCIA**

Autor:

Andrés Jiménez Madrid

Director Académico:

Dr. Carlos José Parra Costa







*A la memoria de mi perro Rocky,  
el bicho que más he querido en mi vida.*



# AGRADECIMIENTOS

Tras un camino que ha sido más largo de lo debido, aunque no por ello menos duro, con este Proyecto Final de Carrera se pone fin a mi carrera de Arquitectura Técnica, por este mismo motivo quiero dar las gracias de corazón ante todo a mis padres y mi hermano, pues sin ellos esta hazaña no habría sido posible. Especialmente quiero agradecerse a mis padres, pues sin su ayuda ni mi hermano ni yo habríamos llegado tan lejos en nuestras vidas.

Como no, mi agradecimiento incondicional a mi tutor, profesor y compañero de elaboración en la investigación que dio lugar a este Proyecto Final de Carrera, Carlos José Parra Costa a quien considero un gran amigo y maestro. Uno nunca se puede imaginar lo que puede llegar a aprender de una mente tan maravillosa.

Gracias a mis compañeros y amigos, pero en especial a David, con el que pasé tantas horas dibujando y del que tanto aprendí en ese campo. A Salva, otro con el que también he pasado incontables horas en la biblioteca estudiando para los exámenes, aunque el que más recuerdo fue el de Estructuras II, en el que tanto me ayudaste. A Vicente y Concha, que tanto me han apoyado y animado a acabar la carrera y en otros campos de mi vida personal. Y como no, no me puedo olvidar de Cristina, Jesús, Miguel y Poli, con los que también he pasado horas estudiando, pero sobre todo agradecerles que fueron los primeros en demostrarme el significado de la palabra amistad.

Agradecer a la Asociación Empresarial Centro Tecnológico de la Construcción de la Región de Murcia, la oportunidad que me brindó para poder realizar esta investigación en sus instalaciones. A Holcim Hormigones, empresa responsable de este proyecto, en especial a Cristóbal, con el que literalmente, me manchaba las manos de hormigón. A Basf, por el apoyo y conocimientos aportados para el desarrollo de esta investigación, pero en especial a Paco, con el que tantas horas de mi vida he compartido, ya haya sido investigando o trabajando. Y hay una empresa que aunque no participara en este proyecto también he darle las gracias, no es otra que HORMISSA, Hormigones del Sureste, S.A. quien me abrió sus puertas sin tener yo experiencia en el campo del hormigón llevado a obra, en especial, este agradecimiento es para dos de los que fueron mis jefes y que me brindaron su confianza y que tanto me enseñaron, ellos son José García-Balibrea Ríos y José Calvo López, quien también fue profesor mío en la carrera.

A todos vosotros, muchas gracias.

Andrés Jiménez Madrid



# RESUMEN

El hormigón autocompactante (HAC) se puede definir como aquel hormigón que es capaz de fluir en el interior del encofrado, rellenándolo de forma natural, pasando entre las barras de armadura y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso. Esto supone grandes ventajas frente al hormigón convencional. Éstas inciden, entre otros, en aspectos cualitativos (al disminuir en la dependencia de la formación y experiencia de los operarios para obtener compactaciones correctas, y al aumentar la posibilidad de proyectos más complejos en lo que respecta al diseño), aspectos económicos (ya que, a pesar de tener un coste de material mayor que el hormigón convencional, disminuye los costes de personal y equipos asociados a la compactación, y reduce considerablemente los plazos de ejecución), aspectos medioambientales (al reducir los ruidos, especialmente importante en plantas de prefabricación y obras en entornos urbanos) y aspectos relativos al ambiente de trabajo y la salud laboral (mejorando las condiciones ambientales y eliminando los riesgos laborales imputables a la compactación).

Para conseguirlo, es necesario que el HAC en estado fresco posea unos requeridos niveles de las siguientes propiedades principales:

- . • Alta fluidez o capacidad de relleno (*flowability* o *filling ability*): habilidad del HAC para fluir dentro del encofrado y rellenarlo bajo su propio peso, garantizando una cobertura total de la armadura.
- . • Habilidad de paso (*passing ability*): facilidad del HAC para fluir a través de obstáculos tales como el espacio libre entre las barras de armadura o zonas estrechas del encofrado, sin bloquearse.
- . • Estabilidad frente a la segregación (*segregation resistance* o *stability*): el HAC debe conseguir las dos características anteriores conservando su composición uniforme durante el proceso de transporte y colocación.

Obviamente, todos estos parámetros son ajenos a la caracterización convencional de la trabajabilidad del hormigón fresco, basada fundamentalmente en la medida del asiento del cono de Abrams. Por ello, para evaluar la autocompactabilidad, los investigadores y otros usuarios del material han tenido que utilizar, y en los inicios de la investigación del HAC, desarrollar ensayos específicos o modificar ensayos convencionales. Esta situación ha dado como resultado un gran número de ensayos no normalizados, que evidenció la necesidad de priorizar algunos de ellos, así como de unificar los procedimientos, que posteriormente se convirtieron en las normas UNE de HAC que hoy conocemos.

No obstante, el HAC continuaba siendo un campo poco explorado, y por ello y en base a esta necesidad, la principal tarea realizada fue el análisis y desarrollo de Dosificaciones con Materiales disponibles en la Región de Murcia.

Además, se llevó a cabo una campaña experimental para estudiar estas Dosificaciones, tanto en estado fresco como en estado endurecido, características y propiedades imprescindibles de definir en un HAC válido para su uso en obra.

Finalmente, se realizaron 6 vigas de hormigón autocompactante, con la intención de compararlas con las también realizadas con hormigón tradicional. Para ello previamente se definieron varias dosificaciones de hormigón, siguiendo el método propuesto por la Universidad Politécnica de Cataluña (Gomes et al., 2001; 2002), y utilizando, como ya se ha dicho antes materiales disponibles en la Región de Murcia.





---

# ÍNDICE

• Capítulo 1. Introducción	2
○ 1.1 Consideraciones Generales	4
○ 1.2 Objetivos	7
○ 1.3 Estructura del Proyecto	9
• Capítulo 2. Estado del Arte del HAC	12
○ 2.1 Introducción	14
○ 2.2 Motivación	15
○ 2.3 Definición del HAC	19
○ 2.4 Composición y Mezclas Típicas	21
▪ 2.4.1 Composición	21
▪ 2.4.2 Mezclas Típicas	23
○ 2.5 Métodos de Caracterización	26
○ 2.6 Métodos de Dosificación	28
○ 2.7 Aplicaciones Prácticas	31
▪ 2.7.1 Japón	33
▪ 2.7.2 Suecia y Francia	36
▪ 2.7.3 España	36
• 2.7.3.1 Ejemplos prácticos en la Región de Murcia	38
○ 2.8 Conclusiones	44

• Capítulo 3. Métodos de Caracterización del HAC	48
○ 3.1 Introducción	50
○ 3.2 Ensayo de Extensión de Flujo	51
▪ 3.2.1 Descripción y Objetivo	51
▪ 3.2.2 Variantes	52
▪ 3.2.3 Interpretación de los resultados y valores típicos	53
▪ 3.2.4 Observaciones	54
○ 3.3 Caja en L	55
▪ 3.3.1 Descripción y Objetivo	55
▪ 3.3.2 Variantes	56
▪ 3.3.3 Interpretación de los resultados y valores típicos	58
▪ 3.2.4 Observaciones	59
○ 3.4 Caja en U	60
▪ 3.4.1 Descripción y Objetivo	60
▪ 3.4.2 Variantes	61
▪ 3.4.3 Interpretación de los resultados y valores típicos	62
▪ 3.4.4 Observaciones	63
○ 3.5 Embudo V	64
▪ 3.5.1 Descripción y Objetivo	64
▪ 3.5.2 Variantes	65
▪ 3.5.3 Interpretación de los resultados y valores típicos	66
▪ 3.5.4 Observaciones	67
○ 3.6 Anillo de Barras	68
▪ 3.6.1 Descripción y Objetivo	68
▪ 3.6.2 Variantes	69
▪ 3.6.3 Interpretación de los resultados y valores típicos	70
▪ 3.6.4 Observaciones	70
○ 3.7 Ensayo Orimet	72
▪ 3.7.1 Descripción y Objetivo	72
▪ 3.7.2 Variantes	73
▪ 3.7.3 Interpretación de los resultados y valores típicos	73
▪ 3.7.4 Observaciones	73

○ 3.8 Ensayo de Caja de Relleno _____	74
▪ 3.8.1 Descripción y Objetivo.....	74
▪ 3.8.2 Interpretación de los resultados y valores típicos .....	75
▪ 3.8.3 Observaciones .....	75
○ 3.9 Ensayo de Tamiz Vertical _____	77
▪ 3.9.1 Descripción y Objetivo.....	77
▪ 3.9.2 Variantes .....	78
▪ 3.9.3 Interpretación de los resultados y valores típicos .....	78
▪ 3.9.4 Observaciones .....	78
○ 3.10 Otros Ensayos para evaluar la Resistencia a la Segregación _____	80
▪ 3.10.1 Ensayo de estabilidad con Tamiz.....	80
▪ 3.10.2 Ensayo de la Columna .....	81
▪ 3.10.3 Tubo U.....	82
▪ 3.10.4 Resistencia a penetración .....	83
▪ 3.10.5 Índice Visual de Estabilidad .....	84
○ 3.11 Control de la Recepción en Obra _____	86
○ 3.12 Selección de Ensayos a Estudiar _____	87
▪ 3.12.1 Consideraciones generales.....	87
▪ 3.12.2 Selección Propuesta .....	88
• 3.12.2.1 <i>Fluidez y capacidad de relleno</i> .....	89
• 3.12.2.2 <i>Habilidad de paso</i> .....	91
• 3.12.2.3 <i>Conclusiones</i> .....	92
• Capítulo 4. Dosificaciones con Áridos de la Región de Murcia	98
○ 4.1 Fase 1:	
Estudio de la Dosificación	
Influencia de los Aditivos Químicos y	
Propiedades en Estado Fresco _____	100
▪ 4.1.1 Objetivos de la Fase.....	100
• 4.1.1.1 <i>Estudio de la Dosificación</i> .....	100
• 4.1.1.2 <i>Estudio del Comportamiento en Estado Fresco</i> ...	101

•	4.1.1.3 Estudio de la influencia de los Aditivos Químicos	101
▪	4.1.2 Ensayos Preliminares.....	102
•	4.1.2.1 Método de Dosificación .....	107
•	4.1.2.2 Materiales .....	109
•	4.1.2.3 Campaña Preliminar de Ensayos .....	113
•	4.1.2.4 Resultados Experimentales .....	119
•	4.1.2.5 Discusión de Resultados .....	123
A.	Pasta Cementante	123
B.	Esqueleto Granular	127
C.	Ensayo del cono de Marsh	128
•	4.1.2.6 Conclusiones de los Resultados.....	129
▪	4.1.3 Dosificaciones Ensayadas .....	131
○	4.2 Fase 2:	
	Estudio de la Presión en los Encofrados _____	138
▪	4.2.1 Objetivos de la Fase.....	138
▪	4.2.2 Introducción.....	139
▪	4.2.3 Antecedentes .....	141
▪	4.2.4 Recopilación datos experimentales otros autores....	148
•	4.1.4.1 Hormigón Tradicional.....	148
•	4.1.4.2 Hormigón Autocompactante .....	156
▪	4.2.5 Conclusiones.....	158
○	4.3 Fase 3:	
	Investigación del Comportamiento	
	en Estado Endurecido _____	159
▪	4.3.1 Objetivos de la Fase.....	159
▪	4.3.2 Campaña de Ensayos .....	161
▪	4.3.3 Resultados .....	162
•	4.3.3.1 Materiales .....	162
•	4.3.3.2 Dosificaciones.....	164
•	4.3.3.3 Probetas, preparación y métodos de ensayo .....	164
•	4.3.3.4 Resultados Experimentales .....	165
A.	Resistencia a Compresión	166
B.	Resistencia a Tracción	167
C.	Conclusiones de los resultados	167

---

▪ 4.3.4 Campaña Experimental de Ensayos en Piezas Reales.....	168
• 4.3.4.1 Vigas.....	168
• 4.3.4.2 Ensayos.....	170
• 4.3.4.3 Dosificaciones empleadas.....	171
• 4.3.4.4 Resultados de Ensayos a Flexión.....	172
• 4.3.4.5 Resultados de Ensayos a Cortante.....	173
• 4.3.4.6 Conclusiones.....	173
○ 4.4 Fase 4: Establecimiento de Procesos de Producción, Transporte y Puesta en Obra _____	175
○ 4.5 Conclusiones Finales _____	178
• Anejo 1. Funcionamiento de los Aditivos Cohesionantes ____	180
○ I.1 Introducción _____	183
• Anejo 2. Ensayos de HAC 2006 _____	186
○ II.1 Actividades realizadas en las instalaciones de Holcim Hormigones S.A. en Molina de Segura (Murcia)_____	188
▪ II.1.1 Primera Campaña de realización de probetas.....	188
▪ II.1.2 Segunda Campaña de realización de probetas.....	190
▪ II.1.3 Tercera Campaña de realización de probetas.....	191
▪ II.1.4 Cuarta Campaña de realización de probetas.....	193
○ II.2 Actividades realizadas en el Laboratorio Regional_____	195
▪ II.2.1 Campaña de roturas.....	195
○ Tabla Resumen de Dosificaciones _____	197
○ Tabla Resumen de Ensayos en Estado Fresco _____	198
• Anejo 3. Referencias Bibliográficas _____	200







# **CAPÍTULO 1**

## **Introducción**



## 1.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Prácticamente todo el hormigón utilizado habitualmente en la construcción actual depende directamente de una compactación forzada eficiente, durante la colocación, para conseguir compacidades compatibles con la resistencia y durabilidad requeridas. El método de compactación por excelencia es la vibración con aguja, tras el vertido del hormigón en el interior del encofrado. Sin embargo este método, cuya eficacia depende en gran medida de la habilidad del operario que lo ejecuta, puede dar lugar a falta de uniformidad o buena compactación, en especial en estructuras densamente armadas, o en zonas estrechas o poco accesibles del encofrado. Para evitar estos problemas, y promover la construcción más durable y fiable de estructuras el Profesor Okamura de la Universidad de Tokio (Japón) introdujo, en 1986, el concepto de Hormigón Autocompactante (Okamura, 1997). Otros investigadores han seguido esta iniciativa, llegando a desarrollar una clase de hormigones capaces de ser colocados sin necesidad de vibración interna u otro modo de compactación.

Esto supone grandes ventajas frente al hormigón convencional. Estas inciden, entre otros, en:

- Aspectos cualitativos, al disminuir en gran medida la dependencia de la formación y experiencia de los operarios para obtener compactaciones correctas, y al aumentar la posibilidad de proyectos más complejos y exigentes en lo que respecta al diseño

- Aspectos económicos, ya que, a pesar de tener un coste de material mayor que el hormigón convencional, disminuye los costes de personal y equipos asociados a la compactación, y reduce considerablemente los plazos de ejecución (especialmente en estructuras monolíticas)
- Aspectos medioambientales, al reducir los ruidos, especialmente importante en plantas de prefabricación y obras en entornos urbanos
- Aspectos relativos al ambiente de trabajo y la salud laboral, mejorando las condiciones ambientales y eliminando los riesgos laborales imputables a la compactación.

Para obtener estas ventajas es necesario un comportamiento adecuado del hormigón autocompactante (HAC) en estado fresco. Esta autocompactabilidad exige una alta fluidez de sus mezclas, con suficiente viscosidad y cohesión entre los componentes, a fin de garantizar un flujo continuo y uniforme en toda la masa, sin exhibir segregación y sin que se produzca bloqueo del hormigón entre las barras de armadura o en las zonas estrechas del encofrado. Para conseguirlo, es necesario que el HAC en estado fresco posea unos requeridos niveles de las siguientes propiedades principales:

- Alta fluidez o capacidad de relleno (*flowability* o *filling ability*): habilidad del HAC para fluir dentro del encofrado y rellenarlo bajo su propio peso, garantizando una cobertura total de la armadura.
- Habilidad de paso (*passing ability*): facilidad del HAC para fluir a través de obstáculos tales como el espacio libre entre las barras de armadura o zonas estrechas del encofrado, sin bloquearse.

- Estabilidad frente a la segregación (*segregation resistance* o *stability*): el HAC debe conseguir las dos características anteriores conservando su composición uniforme durante el proceso de transporte y colocación.

Si bien en la actualidad no se puede hablar de una utilización sistemática del hormigón autocompactante en la construcción, sí existen referencias de aplicaciones de los mismos en el ámbito internacional, siendo pioneras las que se han llevado a cabo en Japón.

Sin embargo, en general, su uso está por ahora limitado a casos especiales. En estos casos los investigadores y otros usuarios del material tuvieron que desarrollar ensayos de caracterización específicos no normalizados hasta hace poco tiempo, o modificar ensayos convencionales. Esto es debido a que las tres propiedades principales del HAC (capacidad de relleno, habilidad de paso y estabilidad frente a la segregación), que constituyen los requisitos fundamentales de autocompactabilidad, son parámetros ajenos a la caracterización del hormigón fresco convencional, y actualmente, no existen otros ensayos de caracterización de la trabajabilidad en las normas europeas o de otras nacionalidades que sean adecuados para dar una evaluación rápida de las principales propiedades de este tipo de hormigones en estado fresco, y que permitan determinar si un hormigón es o no autocompactante (Bortos, 2000). No obstante, y como se verá en los sucesivos capítulos, este problema inicial con el que se enfrentaron los primeros investigadores del HAC, está más que superado.

## 1.2 OBJETIVOS

El objetivo fundamental de este trabajo fue la definición de unas dosificaciones con distintos materiales de la Región de Murcia, que permitan la posibilidad de fabricar de forma sencilla y eficaz hormigón autocompactante en una central de hormigón preparado. Dado que no existía al inicio de este proyecto una normativa específica, la revisión del estado actual de conocimiento sobre caracterización del HAC desarrollado por los diferentes grupos de trabajo que se han ido formado en torno a este nuevo material fue esencial para el progreso de este trabajo.

En cuanto a la fase experimental, el principal objetivo fue la validación de las dosificaciones de hormigón autocompactante, y compararlas con sus análogas de hormigón tradicional, así como un estudio de su variabilidad en términos de reproducibilidad y repetibilidad.

Otro objetivo importante de este trabajo fue una realización de campañas de probetas y finalmente, la realización de vigas de hormigón autocompactante, con la intención de compararlas con las también realizadas con hormigón tradicional. Para ello previamente se definieron varias dosificaciones de hormigón, siguiendo el método propuesto por la Universidad Politécnica de Cataluña (Gomes et al., 2001; 2002), y utilizando, como ya se ha dicho antes materiales disponibles en la Región de Murcia.

Más específicamente, la satisfacción de los objetivos fundamentales identificados arriba se realizó consiguiendo los siguientes objetivos parciales:

- 1.-Elaboración de una investigación bibliográfica del estado de conocimiento en torno al hormigón autocompactante, y más específicamente de los métodos de caracterización del mismo en estado fresco.
- 2.-Estudio de los distintos métodos de dosificación existentes, en particular del método propuesto por Paulo C. C. Gomes et al. (2001; 2002).
- 3.-Diseño de varias dosificaciones de hormigón autocompactante, siguiendo el método mencionado en el punto anterior.
- 4.-Propuesta de unos ensayos fundamentales de caracterización, a partir de la documentación bibliográfica.
- 5.-Evaluación de la efectividad de estos métodos aplicándolos a los hormigones diseñados.
- 6.-Comparación del comportamiento en estado endurecido del hormigón autocompactante con el hormigón tradicional.

## 1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Este estudio se organizó de la siguiente manera:

El CAPÍTULO 1 está reservado a la descripción de los objetivos y la estructura que constituyen el presente trabajo.

En el CAPÍTULO 2 se recoge el Estado del Arte del Hormigón Autocompactante, incluyendo sus principales características, métodos de dosificación propuestos por diferentes autores, ensayos más utilizados para su caracterización y algunas de las aplicaciones prácticas de mayor relevancia, así como una serie de aplicaciones prácticas realizadas por una empresa hormigonera en varias obras en la Región de Murcia, y el por qué de la motivación que llevó a las Direcciones Facultativas de las distintas obras a utilizar este tipo de hormigón.

En el CAPÍTULO 3 se realiza una recopilación bibliográfica más específica de los distintos métodos de caracterización del hormigón autocompactante en estado fresco, con las diferentes variantes según autores.

En el CAPÍTULO 4 se presenta la metodología aplicada en la fase experimental, que consta de 5 fases:

- Fase 1: Estudio de la Dosificación, Influencia de los Aditivos Químicos y Propiedades en Estado Fresco.
- Fase 2: Estudio de la Presión en los Encofrados.
- Fase 3: Investigación del Comportamiento en Estado Endurecido.
- Fase 4: Establecimiento de Procesos de Producción, Transporte y Puesta en Obra.
- Conclusiones Finales.

En el ANEJO 1 se habla de la influencia y funcionamiento de los aditivos cohesionantes.

En el ANEJO 2 se recoge la campaña de ensayos realizados con Hormigón Autocompactante durante los estudios de 2006.

El ANEJO 3 queda reservado para las referencias bibliográficas.



# **CAPÍTULO 2**

**Estado del Arte del**

**Hormigón Autocompactante**



## 2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta un estado general de conocimiento sobre el hormigón autocompactante previo al inicio del proyecto, así como los avances hechos hasta la fecha. Para comenzar se expone la motivación que llevó a investigar con este nuevo material, incluyendo las ventajas que presenta frente al hormigón convencional. A continuación se hace una revisión de las definiciones y se detallan las principales propiedades que caracterizan al HAC. Seguidamente se tratan distintos aspectos relativos a su composición y se presentan algunas mezclas típicas donde se reflejan los componentes y proporciones usualmente utilizados para esta clase de hormigones. Se mencionan también los ensayos de caracterización más aceptados, que se tratan con más detalle en el Capítulo 3. Finalmente se recogen las directrices de los métodos de dosificación propuestos por los principales grupos de trabajo, y se exponen a modo de ejemplo algunas aplicaciones en los distintos campos en los que se utilizó el hormigón autocompactante.

## 2.2 MOTIVACIÓN

En el hormigón convencional una compactación insuficiente tiene como consecuencia una reducción drástica de las prestaciones estructurales, independientemente de la calidad de la producción y de la propia composición del material. Como resultado, con frecuencia pueden verse en la superficie del hormigón zonas de compactación incompleta, exigiendo posteriormente trabajos de reparación, que pueden resultar costosos o de difícil ejecución. Todavía más críticas son las zonas de compactación deficiente que pueden formarse en el interior de la masa de hormigón, y que escapan a la observación visual.

Las consecuencias de la utilización de vibradores de hormigón son además perjudiciales para sus operarios (ver Figura 2.1). Uno de los inconvenientes es la propia vibración transmitida al operario, responsable de perturbaciones en la circulación sanguínea de las manos, dando lugar a una dolencia denominada “dedos blancos” (*“white finger syndrom”*). Por otro lado, los ruidos generados por los equipos de compactación, ya sean vibradores de aguja, vibradores acoplados al encofrado o mesas vibratoras, resultan incómodos y perjudiciales para los trabajadores y las personas que ocupan los espacios circundantes. Esto hace que la eliminación de la necesidad de vibrado beneficie el ambiente de trabajo y la salud laboral, lo que supondría un valor añadido en términos de la eficacia en la construcción (Skarendahl y Petersson, 2000).



**Figura 2.1 – Aspecto general de un hormigonado con hormigón convencional**

A principios de los años 80, en Japón, surgió una preocupación seria por la falta de uniformidad y buena compactación del hormigón, que se identificó como principal factor responsable de la deficiencia de durabilidad observada en estructuras existentes. A la par, en la industria de la construcción japonesa se verificó una reducción gradual de la mano de obra especializada, llevando igualmente a una reducción de la calidad.

Como respuesta a este conjunto de preocupaciones (ver Figura 2.2) el Profesor Okamura de la Universidad de Tokio (Japón) introdujo en 1986 el concepto del Hormigón Autocompactante (HAC), promoviendo estudios sobre la trabajabilidad del hormigón que dieron lugar al primer prototipo en 1988 (Okamura y Ouchi, 1999). Al mismo tiempo, fueron también tenidas en cuenta las cuestiones ligadas a la salud, seguridad y medio ambiente, discutidas anteriormente.



**Figura 2.2 – Motivación original para el hormigón autocompactante (Okamura, 1997)**

Además de las principales causas que motivaron las primeras investigaciones, el uso de HAC en el sector de la prefabricación puede conducir a ventajas adicionales, como el aumento de la vida útil de los moldes, la posibilidad de emplear moldes más ligeros, y la reducción del tiempo y esfuerzo necesarios empleados para el acabado manual de los elementos debido a la mejora de la calidad de las superficies (Walraven, 2001).

En términos económicos, a pesar de tener un coste por tonelada o metro cúbico mayor que el hormigón convencional, el uso del HAC puede ser rentable cuando se considera el coste total de la construcción o fabricación del elemento (Schlagbaum, 2002; Pacios, 2003). La mejora económica constituye una condición esencial para la aceptación de este

nuevo material, tal como ocurre con cualquier innovación.

Reconociendo las ventajas del HAC, el interés del sector de la construcción hacia este material ha ido creciendo de forma significativa en la última década. Este hecho condujo a la formación de grupos de trabajo como son, entre otros, los de la Sociedad de Ingenieros Civiles de Japón, el Instituto de Arquitectos de Japón, la Asociación Técnica Internacional RILEM, la Asociación Francesa AFGC y la Federación Europea de Fabricantes de Productos Especiales para Estructuras EFNARC para la redacción de documentación de referencia, recomendaciones y normativas (Tomosawa et al., 1999; AFGC, 2000; Skarendahl y Petersson, 2000; EFNARC, 2002).

## 2.3 DEFINICIÓN DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

El hormigón autocompactante se puede definir como aquel hormigón que es capaz de fluir en el interior del encofrado, rellenándolo de forma natural, pasando entre las barras de armadura y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso (Okamura, 1997). Además, la composición del hormigón debe ser homogénea después de la colocación, es decir, el hormigón debe tener una buena resistencia a segregación (Bartos y Grauers, 1999).

Tales prestaciones se consiguen con la fluidez, viscosidad y cohesión apropiadas en las mezclas de estos hormigones. La alta fluidez proporciona la habilidad o facilidad de fluir en el encofrado y de rellenarlo, y la viscosidad y cohesión moderadas evitan la segregación de sus componentes garantizando una deformabilidad uniforme en el proceso de colocación. En este sentido, la facilidad o habilidad para el relleno y el paso entre las armaduras son parámetros esenciales en la definición de las prestaciones de estos hormigones.

Una definición más exigente del HAC es la dada por Okamura et al. (2000), quienes bautizaron el material como hormigón autocompactante de altas prestaciones, que debía satisfacer los tres requisitos que se exponen a continuación. Primero, el hormigón debe fluir libremente por cada rincón del encofrado sin el uso de vibración. Segundo, los efectos derivados de la generación de calor, endurecimiento o retracción por secado deben ser mínimos. Tercero, la permeabilidad del hormigón frente a la penetración del oxígeno, cloruros y agua debe ser mínima, lo cual obliga al uso de contenidos bajos de materiales cementicios y relaciones agua/cemento bajas (Billberg, 1999).

Aunque el hormigón autocompactante tiene características reológicas significativamente diferentes a las de los hormigones convencionales, ambos no difieren mucho en términos de su comportamiento en otros aspectos del estado fresco o en el estado endurecido. Sin embargo, se observó (Billberg, 1999; Skarendahl y Petersson, 2000) que, en un HAC, la microestructura y las interfases árido-pasta son más densas que en un hormigón convencional con la misma relación agua/cemento, que la permeabilidad a cloruros y gases es menor, y que la adherencia entre el hormigón y barras de armadura es mejor.

Por otro lado, debido al contenido mayor de pasta, es esperable un aumento en la sensibilidad a un curado no adecuado, que puede conducir a la fisuración por retracción plástica en elementos como losas y pavimentos. Asimismo, cabe esperar un módulo de deformación más bajo que un hormigón convencional de la misma resistencia, y una mayor retracción endógena en HAC de alta resistencia (AFGC, 2000).

## **2.4 COMPOSICIÓN Y MEZCLAS TÍPICAS**

### **2.4.1 Composición**

La mayoría de los componentes del hormigón autocompactante son los que se utilizan para la fabricación de hormigones convencionales. Así, por ejemplo, el cemento y los áridos (a excepción del tamaño máximo, que generalmente no sobrepasa los 20 mm) no tienen que cumplir requisitos específicos adicionales a los que se exigen para hormigones convencionales de buena calidad. En este sentido, siempre resulta ventajoso desde el punto de vista económico utilizar materiales locales, a efectos de minimizar costes de transporte.

El aditivo superplastificante es un componente imprescindible para el HAC, y también se puede escoger de entre los que estén disponibles en el mercado. Diferentes tipos de superplastificantes basados en los naftalenos y melaminas modificados, y copolímeros de nueva generación fueron empleados en la fabricación del HAC con éxito (Skarendahl y Petersson, 2000; Hamada et al., 2000; Domínguez, 2003). Sin embargo, los copolímeros en general, y los policarboxilatos en particular resultaron ser los más adecuados para el HAC, debido a su mayor efectividad.

Finalmente quedarían los componentes más atípicos del HAC en relación al hormigón convencional. Son los finos minerales tipo filler y los agentes modificadores de viscosidad (AMV), que se emplean para conseguir un nivel adecuado de cohesión en la mezcla, evitando la segregación y la exudación durante la colocación del hormigón.

La definición de los finos tipo filler varia entre diferentes países con el tamaño máximo de las partículas, siendo 80, 90 ó 125 micras (AFGC, 2000; Skarendahl y Petersson, 2000; EFNARC, 2002). Los filler más empleados son el polvo calizo, el polvo de cuarzo, el humo de sílice y las cenizas volantes. Además de ayudar a conseguir la cohesión necesaria, los finos tipo filler reducen el contenido de cemento en la pasta, evitando los problemas relacionados con el exceso de calor de hidratación y retracción.

Los AMV son aditivos químicos que mejoran sustancialmente la cohesión del hormigón y, por tanto, limitan la pérdida de agua por exudación y minimizan la tendencia a la segregación. Su empleo junto con superplastificantes de última generación permite obtener hormigones estables a pesar de tener una gran fluidez. Sin embargo, su empleo no siempre es imprescindible para obtener un hormigón autocompactante, únicamente en el caso en que los finos por si solos no sean capaces de aportar suficiente cohesión a la mezcla (AFGC, 2000).

Pero, si tenemos en cuenta que el uso de AMVs permite que el hormigón sea menos sensible a pequeños cambios del contenido de agua, del módulo de finura de la arena y de la dosis de superplastificante, su empleo puede contribuir a homogeneizar la calidad de estos hormigones y facilitar su producción (Okamura et al., 2000; Subramanian y Chattopadhyay, 2002). Además se minimiza el riesgo de segregación al aumentar accidentalmente el contenido de agua, la altura de caída del hormigón o el nivel de vibración durante el hormigonado (Sedran, 1995; Khayat y Guizani, 1997; Hibino, 2000).

## 2.4.2 Mezclas típicas

Las mezclas de HAC se caracterizan por su alta fluidez, falta de segregación y bajo riesgo de bloqueo. Tales características dependen de los componentes de la mezcla, y la diversidad de materiales existentes en el mercado dificulta la determinación de un tipo o dosificación única de materiales para los HAC.

Sin embargo, pueden establecerse algunas características comunes de mezclas de HAC fruto del análisis de diferentes trabajos citados en la literatura técnica:

- Un alto volumen de pasta de cemento, entre 33 y 40% (AFGC, 2000), con un alto contenido total de finos en el rango de 450-600 kg/m<sup>3</sup>. En el contenido de finos se incluye el cemento (entre 200 y 450 kg/m<sup>3</sup>) y los finos tipo filler. El contenido de agua ronda los 150-180 kg/m<sup>3</sup>, llegando hasta los 200 kg/m<sup>3</sup> en mezclas con agentes modificadores de viscosidad. La relación agua/cemento normalmente se sitúa en el rango de 0,4-1,0, en peso. Así se obtiene, para los casos en los que no se utilizan AMV, relaciones agua/finos del orden, 0,25-0,4 en peso, que equivalen a un 0,9-1,1 en volumen (Okamura, 1997).
- Un volumen de áridos gruesos significativamente más bajo que en el hormigón convencional, entre el 30 y el 35 % del volumen total de hormigón. La relación árido grueso/árido total es también más baja, entre el 44 y 64 % en volumen (Domone y Chai, 1996; Skarendahl y Petersson, 2000). Esto da lugar a unas proporciones de árido grueso de entre 750 y 920 kg/m<sup>3</sup> y entre 710 y 900 kg/m<sup>3</sup> de árido fino.

- Superplastificantes, principalmente de última generación, como policarboxilatos y otros copolímeros.
- Opcionalmente, agentes modificadores de la viscosidad, que pueden llegar a sustituir a los finos tipo filler.

En la Tabla 2.1 se presentan algunas de las dosificaciones típicas que pueden encontrarse en la literatura técnica.

En general se puede observar que las cantidades de finos y superplastificante son altas, comparadas con las utilizadas en hormigones convencionales. Asimismo, la dosificación del árido grueso es menor que la habitual, siendo inferior en peso, o por lo menos del mismo orden, que la de la arena. En este caso, todos los hormigones llevan filler, complementado a veces por un AMV.

Componentes (kg/m <sup>3</sup> )	Autores					
	Domone y Chai (1996)	Sedran et al (1996)	Kim et al (1998)	Bartos y Grauers (1999)	Ambroise y Péra (2001)	Su et al (2001)
<b>Cemento</b>	218	350	370	280	380	300
<b>Cenizas Volantes</b>	125	-	159	-	-	148
<b>Escorias</b>	280	-	-	-	-	63
<b>Filler Calizo</b>	-	134	-	240	20	-
<b>Arena</b>	686	852	782	865	900	928
<b>Árido máx. 10 mm</b>	-	363	-	-	-	-
<b>Árido máx. 16 mm</b>	-	-	-	-	800	-
<b>Árido máx. 20 mm</b>	785	571	820	750	-	718
<b>Superplastificante</b>	8,2	7,1	10,0	4,2	4,0	8,2
<b>Ag. de viscosidad</b>	-	-	-	-	2,0	-
<b>Relación agua/cemento</b>	0,82	0,48	0,50	0,71	0,53	0,57
<b>Relación agua/finos</b>	0,28	0,34	0,35	0,36	0,50	0,40
<b>Resistencia a Compresión 28 días (MPa)</b>	n.d.	50	47	47	48	41

n.d.: datos no disponibles

**Tabla 2.1 – Mezclas típicas de hormigón autocompactante**

## 2.5 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN

Tal como se ha expuesto anteriormente, las tres propiedades características del HAC en estado fresco son la habilidad para fluir dentro del encofrado y rellenarlo bajo su propio peso; la habilidad de pasar a través del espacio entre la armadura; y la estabilidad frente a la segregación de sus componentes. Obviamente, todos estos parámetros son ajenos a la caracterización convencional de la trabajabilidad del hormigón fresco, basada fundamentalmente en la medida del asiento del cono de Abrams. Por ello, para evaluar la autocompactabilidad, los investigadores y otros usuarios del material tuvieron que desarrollar ensayos específicos o modificar ensayos convencionales.

Las técnicas experimentales más aceptadas, de las que se analizarán la mayoría con detalle en el Capítulo 3, se muestran en la Tabla 2.2, indicando la principal propiedad que evalúan.

PROPIEDAD	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN
Fluidez o habilidad de relleno	Extensión de flujo
	Embudo-V
	Orimet
Habilidad de paso	Caja en L
	Caja en U
	Anillo de barras
	Caja de relleno
Estabilidad o resistencia a la segregación	Ensayo GTM
	Tubo-U

Tabla 2.2 – Ensayos de caracterización del HAC más aceptados

Es importante destacar, como ya se comentará en el siguiente capítulo, que no es posible garantizar el cumplimiento de las propiedades características de la autocompactabilidad con un único ensayo.

## 2.6 MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

Los métodos de dosificación de mezclas para HAC difieren de los métodos tradicionales empleados en el hormigón, estando fundamentados en una base esencialmente empírica. En la bibliografía son varios los procedimientos presentados para la obtención de mezclas de HAC. A continuación se exponen las directrices principales contempladas en los métodos de dosificación más utilizados.

El procedimiento general propuesto por Okamura (1997) y Ouchi et al. (1997) considera que el hormigón está constituido por dos fases: árido grueso y mortero. El volumen de árido grueso se fija en el 50% del volumen sólido del esqueleto granular (constituido por el árido fino y el árido grueso), mientras que el volumen correspondiente al árido fino se fija en el 40% del volumen del mortero (constituido por la pasta de cemento y los áridos finos). La relación agua/finos y la dosificación del superplastificante se obtienen mediante ensayos de fluidez sobre morteros. A partir de estas proporciones se realizan pruebas de caracterización sobre el hormigón para determinar la dosificación final. Esta metodología fue modificada posteriormente por varios investigadores (Skarendahl y Petersson, 2000).

El procedimiento propuesto por Peterson et al. (1996) y Billberg (1999), conocido como método del CBI (Swedish Cement and Concrete Research Institute) tiene como objetivo encontrar un cierto esqueleto granular capaz de minimizar el volumen de pasta necesario para producir suficiente distancia entre los áridos sin que se produzca bloqueo. Para ello se basa en el concepto de máxima distancia entre partículas, junto a un ensayo de evaluación de bloqueo. El contenido de finos (consideran como tal las partículas menores de 250  $\mu\text{m}$ ), agua,

superplastificante y otros aditivos se ajusta para obtener la resistencia pretendida en el hormigón endurecido, además de suficiente viscosidad y una baja tensión superficial. Para esta determinación se utiliza un viscosímetro coaxial.

Sedran et al. (1996), en el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de París, proponen un método que consiste en utilizar un modelo computacional para determinar un esqueleto granular con el mínimo de vacíos, considerando el efecto pared y la viscosidad de la mezcla. La dosificación de finos se fija inicialmente, en función de la resistencia y los materiales disponibles. El contenido de superplastificante para las posibles combinaciones de finos se define mediante el ensayo del cono de Marsh. El ajuste final de agua y superplastificante para obtener una viscosidad aceptable se realiza con un reómetro y el ensayo de extensión de flujo.

Investigadores de la Universidad Politécnica de Cataluña desarrollaron una metodología de dosificación para HAC de alta resistencia basada en componentes localmente disponibles y ensayos sencillos de realizar (Gomes et al., 2001, 2002; Gettu et al., 2002). Comienza utilizando el ensayo del cono de Marsh para determinar la dosis de saturación del superplastificante en el sistema de pasta constituido por cemento, agua y finos filler, y con una relación agua/cemento baja (p.e., 0,33-0,40). Posteriormente, mediante el ensayo del mini-slump, se fija la relación filler/cemento considerando una pasta de fluidez alta y cohesión moderada. Separadamente, se obtiene la relación arena/grava correspondiente a la combinación seca de estos componentes que da lugar al mínimo contenido de vacíos. Con esta relación arena/grava se fabrican hormigones con distintos volúmenes de pasta (con la dosis de saturación de superplastificante y relación

filler/cemento determinados inicialmente), tomando como mezcla optimizada la que, con el mínimo contenido de pasta, cumple los requisitos de autocompactabilidad y resistencia determinados por varios ensayos sobre el hormigón fresco.

Asimismo, con planteamientos similares existen otros métodos no tratados aquí de forma explícita, los cuales se resumen en el informe de RILEM (Skarendahl y Petersson, 2000).

## 2.7 APLICACIONES PRÁCTICAS

Tanto en el comienzo de la utilización del HAC como en la actualidad, un campo en el que este hormigón de altas prestaciones está resultando especialmente ventajoso es el de la reparación, bajo condiciones de contorno determinadas por zonas densamente armadas y dificultad de acceso a las mismas (McLeish, 1996; Lacombe et al., 1997).

También se está aplicando con éxito para la elaboración de soleras y pavimentos, así como forjados y losas. En estos casos la rápida y cómoda aplicación es la principal ventaja.

El sector del prefabricado también está empleando HAC con sorprendentes resultados. Se obtienen beneficios tanto a nivel de resistencias iniciales y acabados, como en aspectos de producción, economía y mejora del ambiente de trabajo.

En la construcción en general el uso del HAC elimina los costes de compactación, y asegura que ésta sea adecuada.

Sin embargo, el coste total de construcción no siempre puede ser reducido, salvo en aplicaciones a gran escala. Esto es debido a que los sistemas convencionales de construcción están generalmente diseñados considerando que la vibración del hormigón es imprescindible. Pero una vez salvado este obstáculo la construcción puede ser racionalizada y, tal como se esquematiza en la Figura 2.6, nuevos sistemas de construcción pueden desarrollarse, incluyendo el encofrado, la armadura y el diseño estructural (Okamura y Ouchi, 1999).

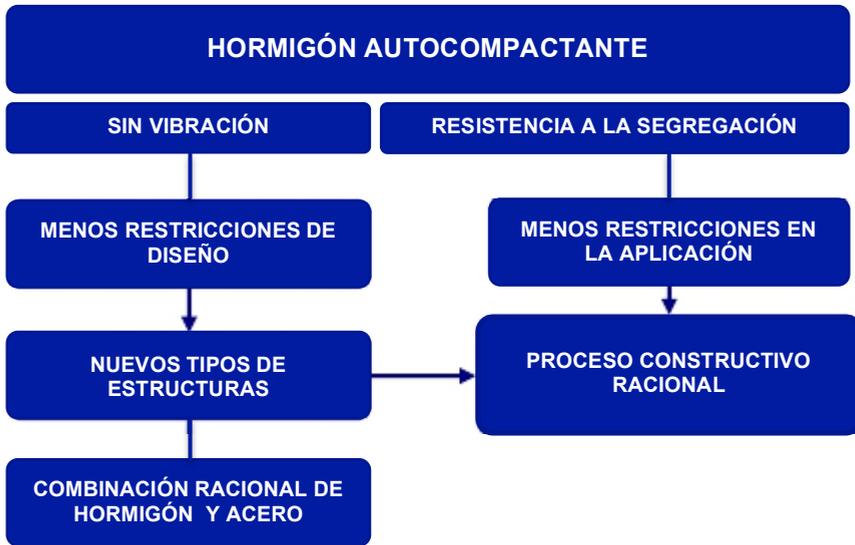


Figura 2.6 – Proceso constructivo racional, propuesto por Ozawa (Okamura y Ouchi, 1999)

Si bien, como ya se ha dicho anteriormente, no se puede hablar en la actualidad de una utilización sistemática o exhaustiva del HAC, sí existen referencias de aplicaciones pioneras de los mismos, principalmente en Japón, donde se realizaron las primeras experiencias. A continuación se recogen algunas de las aplicaciones más significativas.

### 2.7.1 Japón

Una de las principales razones que motivan el empleo de HAC es la reducción del plazo de ejecución, con garantías de compactación. Un ejemplo relevante es la aplicación en los bloques de anclaje del puente colgante Akashi Kaikyo (ver Figura 2.3), de 1.991 metros de luz. Se utilizaron 290.000 m<sup>3</sup> de HAC, con un rendimiento de 1.900 m<sup>3</sup>/día, lo que supuso una disminución del plazo de ejecución del 20 %, reduciéndolo de 30 a 24 meses (Okamura, 1997; Bartos y Grauers, 1999; Ouchi, 1999).



**Figura 2.3 – Anclaje del puente Akashi Kaikyo (Ozawa et al., 1999)**

Otra aplicación significativa fue en la construcción de un depósito de gas licuado de la empresa Osaka Gas, para lo que se utilizaron 12.000 m<sup>3</sup> de HAC de alta resistencia. En esta aplicación el periodo de ejecución fue reducido de 22 a 18 meses gracias al uso de HAC, con un rendimiento de 200-250 m<sup>3</sup>/hora (Okamura, 1997; Nishizaki et al., 1999;

Ouchi, 1999). Además, el uso del HAC comportó también la disminución del número de trabajadores de 150 a 50. El éxito alcanzado en esta obra impulsó posteriormente la construcción de otros depósitos, uno de ellos subterráneo (Seto et al., 1997; Ouchi, 2001).

También, se utilizó HAC en la construcción de un viaducto de hormigón pretensado (Skarendahl y Petersson, 2000) y de un túnel, ambos en Yokohama (Takeuchi et al., 1994).

En el campo de la edificación, el empleo del HAC llevó al desarrollo, también en Japón, de la tecnología CFT (*Concrete Filled Tubes*) para la construcción de edificios de gran altura. Ésta se fundamenta en la utilización de tubos de acero rellenos con HAC y unidos mediante diafragmas, eliminando la necesidad del encofrado y armadura, y, consecuentemente, disminuyendo el plazo de ejecución. Esta tecnología fue aplicada en los pilares de varios edificios, incluyendo los de las 9 primeras plantas del edificio más alto de Japón, el Landmark Tower en Yokohama (Hayakawa et al., 1993; Billberg, 1999).

Otra aplicación en la que también se han tenido en cuenta las propiedades del HAC a la hora del diseño, es la construcción de estructuras mixtas tipo 'sandwich', donde se rellenan con HAC bóvedas o cajones con capas exteriores de acero (Okamura, 1997; Ouchi, 1999; Tanaka et al., 2001). Este tipo de estructura, que no podría realizarse con hormigón convencional, se utilizó con éxito en la construcción de un túnel sumergido en Kobe, también en Japón (ver Figura 2.4).



**Figura 2.4 – Estructura tipo sandwich para un túnel sumergido en Kobe (Ozawa et al., 1999)**

### 2.7.2 Suecia y Francia

Otros países donde se ha utilizado HAC en varios tipos de aplicaciones son Suecia y Francia (Billberg, 1999; Skarendahl, 2002).

En Suecia, se construyeron hasta el año 1999, 3 puentes y varios edificios con HAC. Además de emplear el HAC en elementos con armadura convencional, se han construido varias estructuras con el HAC reforzado con fibras. Estas aplicaciones incluyen losas y muros de edificios, en las cuales las fibras sustituyen totalmente las barras de armadura (Groth y Nemegeer, 1999). En Francia, entre 1997 y 2000, se utilizaron por lo menos 50.000 m<sup>3</sup> del HAC en unos 40 proyectos de edificación y obra civil.

### 2.7.3 España

La primera aplicación del HAC en la construcción de una obra en España puede considerarse que fue en el arco mixto del puente de la Ronda de la Hispanidad sobre el río Ebro en Zaragoza (Puerta, 2002). En este caso, debido a la dificultad prevista para el perfecto relleno de la estructura, las empresas constructoras desarrollaron todo el proceso pensando en el uso de HAC para rellenar el arco metálico, de 120 metros de luz, con sección triangular variable, y aplanado en las esquinas. Los aproximadamente 300 m<sup>3</sup> del hormigón fueron colocados en unas 5 horas.

En otra obra, la del edificio del Ayuntamiento de Mollet del Vallès (Barcelona), también se utilizaron unos 300 m<sup>3</sup> de HAC en unos muros fuertemente armados (ver Figura 2.5). En este caso, inicialmente el proyecto contemplaba el uso de hormigón convencional, si bien se intuía

un hormigonado dificultoso, y existía riesgo de que no se alcanzaran los recubrimientos requeridos.



**Figura 2.5 – Ayuntamiento de Mollet del Vallès (Massó, 2002)**

El tiempo de puesta en obra estaba originalmente previsto en unas 20 horas ininterrumpidas, para evitar juntas frías, lo que hubiera ocasionado severas molestias al encontrarse en un entorno urbano. La aplicación de HAC redujo el tiempo de hormigonado hasta poco más de 6 horas (disminución de casi el 70 %) Se consiguió además una evolución de resistencias muy superior a la demandada, permitiendo un postesado con éxito, y con unos acabados satisfactorios (Massó, 2002).

Otras aplicaciones españolas incluyen la rehabilitación de unas viviendas en Madrid, la construcción de losas de hormigón armado en Zaragoza y en la prefabricación (Borralleras, 2003).

### 2.7.3.1 Ejemplos prácticos en la Región de Murcia:

El uso del hormigón autocompactante en estas obras se ha concentrado en rellenos de hormigón de difícil acceso y/o difícil ejecución, siendo las siguiente:

- Refuerzo del viaducto Murcia-Cartagena en Ronda Oeste.
- Relleno bajo una losa de cimentación en Nueva Condomina.
- Muro de Autocompactante negro en Benferri.
- Cruz de Abanilla.

En la primera obra se consideró el uso del autocompactante, debido a la necesidad de hormigonar en el interior de los cajones de hormigón ya realizados, sin existir posibilidad alguna de compactación. Dichos cajones tenían una longitud variable de 18 a 30 metros, siendo necesario en los primeros el alcance desde uno solo de los extremos hasta el otro, mientras que en los segundos se permitía el hormigonado desde ambos extremos.



(a) Preparación del punto de Hormigonado (b) Hormigonado del cajón de hormigón del viaducto

**Figura 2.6 – Refuerzo del viaducto Murcia-Cartagena**

En la segunda obra, se decidió utilizar hormigón autocompactante por una razón similar a la anterior, se trataba de un hormigonado de difícil acceso e inexistencia de posibilidad de compactación. Además era necesario garantizar que la cavidad bajo la losa quedaba rellena por completo y correctamente compactada. Para llevar a cabo esta operación se realizaron perforaciones de 30 cm de diámetro a través de las cuáles se procedía a hormigonar hasta observar que el material rebosaba, momento en el que se daba por terminado el relleno de la zona en cuestión. Se comprobaba la compacidad de la cavidad al observar que el hormigón ascendía por los agujeros cercanos al de hormigonado.

En las imágenes (Figuras 2.7 a 2.10) que se presentan a continuación se puede observar la dificultad del esta obra.



**Figura 2.7 – Hormigonado bajo la losa de cimentación con HAC**



(a) Tubería para el vertido de HAC desde punto exterior (b) Hormigonado mediante bombeo con gran longitud de tubería.

**Figura 2.8 – Hormigonado bajo la losa de cimentación con HAC**



(a) Paso del HAC bajo la losa (b) Ascensión del HAC en un agujero cercano a la zona de hormigonado

**Figura 2.9 – Hormigonado bajo la losa de cimentación con HAC**



(a) Comprobación de llenado último agujero (b) Avance del HAC

**Figura 2.10 – Hormigonado bajo la losa de cimentación con HAC**

En la ejecución del muro de hormigón negro de Benferri, se decidió utilizar este tipo de hormigón debido a la gran densidad existente en la pieza, lo que imposibilitaba la vibración. El vertido del material se efectuó mediante bombeo como se aprecia en las Figuras 2.11 y 2.12.



**Figura 2.11 – Hormigonado de la pieza**



(a) Vista general de la obra (b) Probetas ejecutadas en obra.

**Figura 2.12 – Detalles de la Obra**

En la obra de la Cruz de Abanilla era necesario un acabado perfecto, añadiendo la dificultad del hormigonado y la alta densidad de la armadura, razones por las que se utilizó el HAC. Esta pieza consta de un gran número de detalles para los que fue necesario la fabricación de moldes y armaduras especiales. En las fotos que se exponen a continuación (Figuras 2.13 a 2.15) se observa la ejecución de la obra en cuestión:



**Figura 2.13 – Cruz Terminada**



(a) Molde para la Cruz (b) Armadura de la Cruz

**Figura 2.14 – Complejidad de paso y nivel de detalle**



(a) Hormigonado con cazo (b) Detalle vertido del HAC

**Figura 2.15 – Hormigonado de la pieza**

## 2.8 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha hecho una recopilación de los principales aspectos que atañen al hormigón autocompactante, desde la motivación que dio lugar a su origen hasta la situación actual. De la bibliografía, y de los numerosos congresos internacionales celebrados, se desprende que la tecnología del HAC está siendo adoptada rápidamente en muchos países, si bien para optimizar y generalizar su uso todavía faltaría progresar con métodos de diseño racionales, que tuvieran en cuenta todas las propiedades del HAC, dando lugar a nuevos sistemas de producción.

También se ha avanzado mucho hasta la fecha, en los criterios de diseño y obtención del HAC, tanto es así que la última edición de la Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08, recoge en su Anejo 17 una serie de recomendaciones para la utilización del hormigón autocompactante. Sin embargo, aunque se publicaron algunas recomendaciones al respecto, previas al desarrollo de este trabajo, existía una carencia de ensayos de control normalizados, por lo que era necesario examinar críticamente los métodos existentes e identificar los más adecuados. Estos métodos deben ser capaces de una rápida y fiable valoración de las propiedades fundamentales del HAC en estado fresco, tanto en laboratorio como en obra. Además, a menos que este trabajo se lleve a cabo sin retraso, existe el peligro de que en cada caso se adopten ensayos más o menos diferentes, haciendo cualquier futura armonización muy complicada (Bartos, 2000).

Varios son los puntos en los que hacía falta ahondar. Por un lado, en la selección de los mejores métodos para evaluar la autocompactabilidad en función de la aplicación a la que se destine el

HAC. Por otro lado, en los criterios y forma de aplicación de estos métodos, precisiones, niveles de variabilidad y demás condiciones relacionadas con la aceptación o rechazo del HAC. Tanto es así, que un equipo técnico, realizó un gran número de ensayos, basándose en la repetibilidad, cambio de operario, etc. con el fin de establecer los ensayos que eran más apropiados para la determinación de un correcto HAC. Dicho estudio fue el origen de las normas de ensayo de caracterización de los HAC que hoy conocemos. En los próximos capítulos se pretende realizar un aporte en el campo de las dosificaciones y el estudio de las propiedades en estado fresco del HAC, realizando una selección argumentada de ensayos, y avanzando en los criterios de medición y aplicación de éstos, en particular en lo que se refiere a la variabilidad de las determinaciones realizadas con cada uno de ellos.







# **CAPÍTULO 3**

**Métodos de caracterización**

**del Hormigón Autocompactante**



### **3.1 INTRODUCCIÓN**

En los siguientes apartados, se presentan las bases de los principales ensayos que se propusieron y validados en la literatura científico-técnica consultada al respecto. De cada uno de ellos se recogen las diferentes variantes según autores y, en el caso de que los haya, los criterios sugeridos para la aceptación-rechazo de hormigones autocompactantes. Del gran número de ensayos existentes se evidenciaba la necesidad de priorizar algunos de ellos, así como de unificar los procedimientos de los mismos, para poder establecer comparaciones y progresar así más rápidamente esta investigación. En base a esta necesidad se exponen, en el último apartado, unas consideraciones generales en cuanto a las características básicas que deberían de cumplir los ensayos de caracterización del hormigón autocompactante para ser efectivos, y se propone una selección argumentada de los mismos.

## 3.2 ENSAYO DE EXTENSIÓN DE FLUJO

### 3.2.1 Descripción y objetivo

El ensayo de extensión de flujo, o *slump flow* en inglés, es el método más simple y el más utilizado, debido a la sencillez del equipo que se precisa. Está basado en el aparato y procedimiento del ensayo del cono de Abrams, el cual es probablemente el ensayo más universal para la determinación de la docilidad o trabajabilidad del hormigón fresco.

Este ensayo difiere del convencional en que la muestra de hormigón se coloca sin ningún tipo de compactación. Además, en este caso la altura del asentamiento no constituye una medida representativa, siendo el diámetro final de extensión ( $D_f$ ) la medida fundamental que se obtiene como resultado (ver Figura 3.1). Adicionalmente, también suele medirse el tiempo que tarda la muestra desde el inicio del levantamiento del cono hasta alcanzar un diámetro de 500 mm ( $T_{50}$ ), y más ocasionalmente, el tiempo final de extensión de flujo ( $T_f$ ), hasta que la muestra deja de moverse.



(a) Cono y base (b) Diámetro final de extensión

**Figura 3.1 - Ensayo de extensión de flujo**

El objetivo de este ensayo es evaluar la habilidad o facilidad de fluir del hormigón. Se puede también valorar cualitativamente, en términos visuales, la presencia de segregación, que se manifestaría por la presencia de una aureola de pasta o mortero alrededor del perímetro de la extensión del flujo y/o la presencia de áridos gruesos acumulados irregularmente, sobre todo en el centro.

### 3.2.2 Variantes

En algunos trabajos, se utilizó un cono DIN en lugar del cono de Abrams para determinar la extensión de flujo. Sin embargo, el cono DIN no parecía adecuado para este ensayo debido a su menor volumen.

En otra variante, se ha realizado este ensayo con el cono de Abrams invertido, es decir, con la apertura de menor diámetro sobre la base. Así se evita la necesidad de tener una persona sujetando el cono, lo cual se hace normalmente pisando las asas de la base para que la

presión del hormigón no lo levante. Con el cono invertido, el propio peso del hormigón lo mantiene estable.

En cualquier caso, se deben determinar las correlaciones entre los distintos parámetros medidos antes de comparar los resultados obtenidos con las diferentes variantes.

### **3.2.3 Interpretación de los resultados y valores típicos**

El valor de la extensión de flujo,  $D_f$ , es útil para evaluar la capacidad de deformación del hormigón autocompactante. Algunos autores la relacionaron con la tensión umbral de corte del hormigón, bajo la hipótesis de que éste se comporta como un fluido de Bingham (Sedran y De Larrard, 1999).

Se recomiendan medidas de  $D_f$  de entre 60 y 80 cm, presentando las mezclas en ese rango una buena habilidad o facilidad para el relleno (Hayakawa et al., 1993; Taniguchi et al., 1994; Nagai et al., 1999; AFGC, 2000; EFNARC, 2002; Brite EuRam, 2000; Gomes et al, 2002).

El  $T_{50}$  y el  $T_f$  se emplean para caracterizar la viscosidad y cohesión. En general, mayor tiempo significa mayor viscosidad y cohesión del hormigón. Sin embargo, estos tiempos por sí solos no puede representar directamente la viscosidad, y puede tan solo valorarla cuando el valor de extensión de flujo de las mezclas que se evalúan es constante.

En cuanto a los valores de  $T_{50}$ , la EFNARC (2002) y Brite EuRam (2000) sugieren que un tiempo de 3-7 segundos es aceptable en

aplicaciones de ingeniería civil, mientras que 2-5 segundos sería correcto para las aplicaciones en edificación. Sin embargo, en general se aceptan tiempos entre 1 y 10 segundos para mezclas de las que se espera una viscosidad moderada sin que se presente segregación y con un comportamiento favorable frente al bloqueo (Bartos y Grauers, 1999; Tviksta, 2000; Gomes et al., 2002).

### 3.2.4 Observaciones

Se trata de un procedimiento simple y rápido de ensayo, aunque resulta difícil de realizar por un solo operador, en especial si quiere medirse el período  $T_{50}$ . Puede emplearse en la obra, aunque el tamaño de la placa base de asiento es ligeramente pesado y difícil de manejar, y es esencial un terreno nivelado. Es el ensayo utilizado con más frecuencia y ofrece una buena evaluación de la capacidad de relleno. En Japón fue adoptado como norma (JSCE-F503, 1990) y en España años posteriores (UNE 83361:2007).

No presenta indicaciones de la capacidad del hormigón para pasar por entre la armadura sin bloqueos, para lo cual debería ser utilizado conjuntamente con otros ensayos que se presentarán más adelante.

Aunque se utiliza para evaluar la resistencia a la segregación, la observación visual, sin embargo, no es adecuada para una estimación cuantitativa y fiable del fenómeno (Rooney, 2002).

Para poder comparar resultados debe utilizarse el mismo tipo de superficie base, porque el rozamiento del hormigón con dicha superficie afecta tanto al diámetro de extensión como a los valores de  $T_{50}$  y  $T_f$ .

### 3.3 CAJA EN L

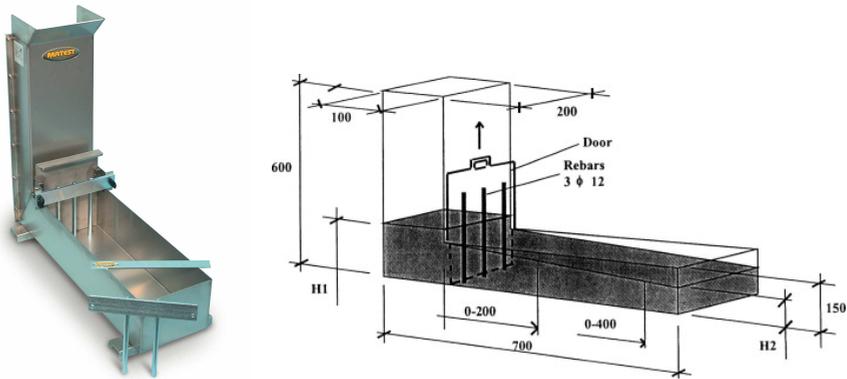
#### 3.3.1 Descripción y objetivo

La caja en L, denominada en inglés como *L-Box*, es un aparato bien conocido para la caracterización del HAC. Consta de un depósito vertical que conecta con un canal horizontal a través de una abertura en la que se colocan barras de armadura (ver Figura 3.2 según Gomes et al., 2002). Una de las primeras referencias de su utilización es la de los trabajos de Petersson et al. (1996).

El ensayo consiste en llenar el depósito y dejar fluir el hormigón hacia el canal a través de las armaduras. Se determinan el tiempo que tarda el hormigón en llegar a una distancia de 200 mm ( $T_{20}$ ) y de 400 mm ( $T_{40}$ ), y las alturas  $H_1$  y  $H_2$  que se alcanzan en ambos extremos de la parte horizontal, con la mezcla ya en reposo. La razón  $H_2/H_1$  se define como el coeficiente de bloqueo (CB).

La prueba permite determinar valores que cuantifican el bloqueo y estimar la fluidez del hormigón tras pasar por los obstáculos.

También permite evaluar cualitativamente la resistencia a la segregación mediante la observación visual.



(a) Configuración (b) Dimensiones típicas (mm)

**Figura 3.2 - Caja en L (Gomes et al., 2002)**

### 3.3.2 Variantes

Lamentablemente, no existía un acuerdo sobre los materiales y dimensiones. La especificación de EFNARC (2002), sugiere una pequeña variación de la longitud del canal, que sería de 800 mm en lugar de 700 mm. Sin embargo la JSCE (1990) propuso unas dimensiones bastante diferentes, con un aparato más pequeño. Otros investigadores utilizan una versión mayor de la Caja en L (p.e., Beaupré et al., 1999), si bien la diferencia más significativa es la colocación de 5 rejillas, separadas por 110 mm a lo largo del canal, constituidas por 4 barras horizontales de 20 mm de diámetro. Cuando se utiliza este aparato, sólo se miden las alturas a lo largo del canal sin ninguna determinación de tiempos.

En cuanto a las características del obstáculo, en general, se acepta que el tipo de barras y los espacios o separación entre ellas varíen dependiendo del tamaño máximo del árido y de las condiciones reales de aplicación del hormigón. La AFGC (2000) recomienda el uso de barras de 14 mm de diámetro, y un espacio de 39 mm entre las barras, que se puede aumentar hasta 58 mm para aplicaciones con poca armadura. Por otro lado, Billberg (1999) recomienda en el uso de 3 barras de 12 mm, lo cual se traduce en un espacio de 34 mm entre barras. Esto prácticamente coincide con la especificación de EFNARC (2002), que utilizaría igualmente barras de 12 mm, pero con un espacio libre entre ellas de 35 mm. También se considera apropiado utilizar un espacio mínimo entre barras igual a tres veces el tamaño máximo del árido (EFNARC, 2002; Gomes et al., 2002).

Actualmente en España también existe una norma que regula este ensayo (UNE 83363:2007) donde se establecen las siguientes medidas:

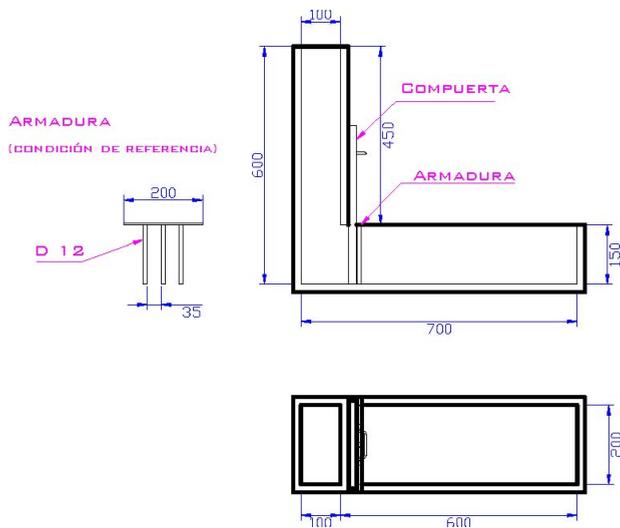


Figura 3.3 - Caja en L (UNE 83363:2007)

### 3.3.3 Interpretación de los resultados y valores típicos

Los tiempos medidos en la caja en L (es decir,  $T_{20}$  y  $T_{40}$ ) cuantifican la velocidad de flujo a través de la barrera. No obstante, cabe reseñar que estos tiempos no son representativos de la fluidez del hormigón cuando ocurren efectos de bloqueo, resultando que las mezclas que atraviesan la armadura tienen más pasta que el hormigón retenido en la caja. Para un hormigón en el que no se presente bloqueo se recomiendan tiempos en los siguientes rangos:  $T_{20} < 1,5$  s y  $T_{40} < 2,5$  s (Bartos y Grauers, 1999; Gomes et al., 2002). Por este motivo, la norma establece que el tiempo a tener en cuenta será el  $T_{60}$ , o lo que es lo mismo, el tiempo que tarda el hormigón en llegar al final del recorrido.

Por otro lado, el coeficiente de bloqueo ( $CB = H_2/H_1$ ), es un buen indicador de la habilidad para pasar por aperturas estrechas, que incluye la capacidad de deformación y la resistencia al bloqueo. Debería ser superior a 0,80 para que se considere satisfactoria la resistencia al bloqueo del hormigón (AFGC, 2000; Gomes et al., 2002). Sin embargo, hormigones con coeficientes más bajos, como 0,60, han dado resultados aceptables en aplicaciones estructurales (Tviksta, 2000). De hecho la norma española establece que  $0,8 < CB < 1$ .

El ensayo permite también evaluar la resistencia al bloqueo y la estabilidad de la muestra de hormigón, por observación visual. En los casos en que se aglomeran o acumulen áridos anterior al paso de la rejilla de armadura, se considera que se produce bloqueo. Por otro lado, cuando se observan granos del árido grueso distribuidos por la superficie del hormigón a lo largo de toda la extensión de la parte horizontal, el hormigón se considera estable, es decir, resistente a la segregación.

### 3.3.4 Observaciones

El uso de este ensayo es muy frecuente. Es muy adecuado para el laboratorio y quizá también para la misma obra. Evalúa conjuntamente la capacidad de relleno y de paso del HAC, y cualquier falta grave de estabilidad (segregación) puede detectarse visualmente.

Los tiempos  $T_{20}$  y  $T_{40}$ , como ya se ha comentado, no siempre son representativos de la fluidez del hormigón. Además, la medida de dos tiempos tan cortos obliga el uso de dos cronómetros, o un cronómetro capaz de medir dos tiempo, y está influida significativamente por los criterios y reflejos del operario. Por este motivo, en algunas ocasiones, se ha optado por medir solamente el tiempo que tarda el hormigón en tocar la pared final del canal.

## 3.4 CAJA EN U

### 3.4.1 Descripción y objetivo

Este ensayo, denominado en inglés como *U-Box*, fue propuesto por Hayakawa et al. (1993), primero con una base semicircular y posteriormente modificado con una base recta. Se diseñó para evaluar la habilidad de paso y la facilidad para el relleno.



(a) Base circular(b) Base recta

**Figura 3.4 – Caja en U (JSCE, 1998)**

La caja en U consiste en un recipiente dividido en dos zonas separadas mediante una compuerta. La configuración según la recomendación japonesa es la que se presenta en la Figura 3.4. La caja con base recta es más fácil de fabricar y es más exigente debido a la presencia de dos esquinas (Skarendahl y Petersson, 2000). En ambos casos, hay una puerta deslizante de separación en el fondo, y en la zona de paso se colocan varias barras de armadura.

El procedimiento consiste en llenar uno de los compartimentos y seguidamente abrir la compuerta, dejando al hormigón fluir, pasando al otro compartimento a través del obstáculo constituido por las varillas de acero, que simulan la armadura. Se mide la altura (H) que alcanza el hormigón en el compartimento que inicialmente estaba vacío, desde la base de la vasija hasta la superficie libre del hormigón.

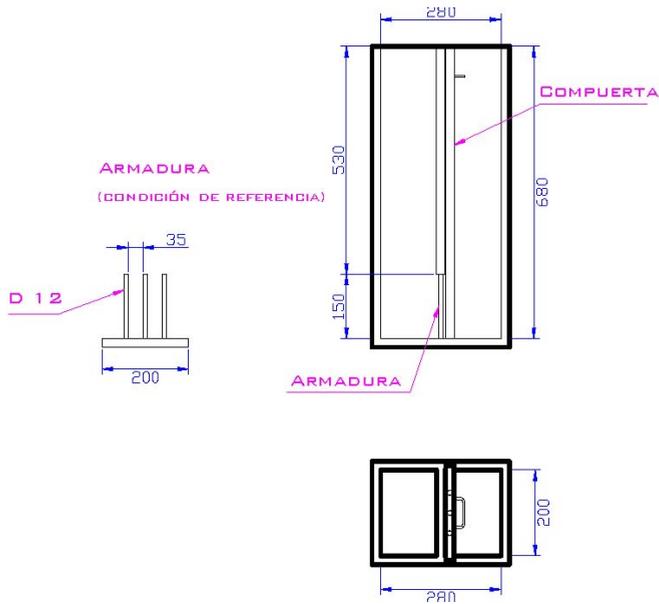


Figura 3.5 – Caja en U Medidas típicas

### 3.4.2 Variantes

En los primeros trabajos, el procedimiento incluía la aplicación de una pequeña presión (2,4 kPa) sobre la superficie del hormigón (Hayakawa et al., 1993).

Algunos grupos de trabajo utilizan otras dimensiones, como la EFNARC (2002), cuya caja en U tiene 590 mm de alto (frente a 680 mm), con una apertura de 140 mm (frente a 190 mm).

El número de barras y el espacio entre ellas se puede seleccionar de acuerdo con la situación real de construcción a la que se destinará el hormigón ensayado y se proponen distintas variantes, tal y como pasaba con la caja en L (Skarendahl y Petersson, 2000).

### **3.4.3 Interpretación de los resultados y valores típicos**

El resultado principal que obtenemos en este ensayo es la altura de relleno (H), que se utiliza para evaluar la habilidad del hormigón ensayado para pasar por aperturas estrechas, rellenando el encofrado. Concretamente, con una mayor altura de relleno tendremos una mayor habilidad de paso (Okamura, 1997). En general se acepta que cuando su valor es igual o superior al 30 cm, el hormigón tiene una buena habilidad de relleno.

Sin embargo, el significado físico de la altura de llenado (H) queda influenciado por las proporciones de la mezcla del hormigón ensayado, que darán lugar a comportamientos diferentes. Por ejemplo, cuando la cantidad y el tamaño del árido son pequeños comparados con el espacio entre las barras instaladas, H depende mucho de la capacidad de deformación o fluidez de la muestra de hormigón, y la resistencia a la segregación apenas influye. En este caso el tiempo de flujo en la caja en U representa bien la viscosidad de la mezcla, que controla la resistencia a la segregación. Por otro lado, cuando el tamaño y cantidad de árido grueso son relativamente grandes, la colisión y la interacción entre partículas de árido grueso afectan en mayor grado la

habilidad de pasar por aperturas estrechas. En este caso, un hormigón con tendencia a la segregación a menudo da una baja altura de llenado de la caja en U incluso aunque el hormigón presente una gran fluidez. Además, la velocidad de flujo tiende a ser lenta debido a la interacción de los áridos gruesos incluso si la viscosidad de la muestra no es muy alta.

Asimismo, puede medirse el tiempo de flujo del hormigón, hasta que el hormigón se detiene, para evaluar la viscosidad de la mezcla, si bien suele resultar difícil por la subjetividad de la medida.

#### **3.4.4 Observaciones**

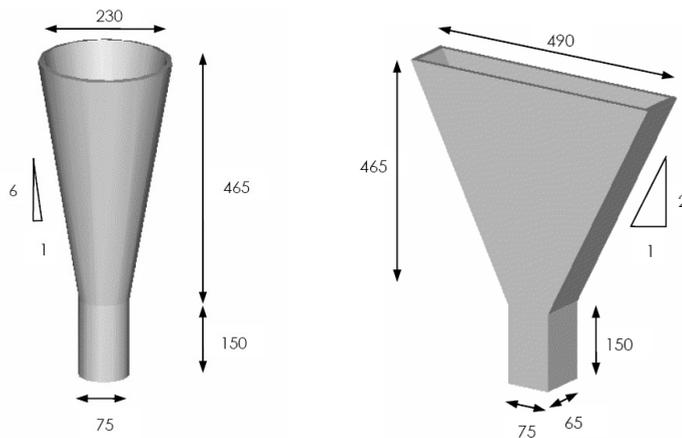
Se trata de un ensayo fácil de realizar, aunque el equipamiento puede resultar difícil de fabricar, en especial el de base circular.

Este método parece ser bastante eficiente para evaluar la habilidad de paso del hormigón, si bien, como se ha visto en el punto anterior, hay que ser cuidadoso con su interpretación. Sin embargo no evalúa bien la deformabilidad sin restricción y resulta complicado observar la segregación, por lo que precisa de otros métodos complementarios.

### 3.5 EMBUDO-V

#### 3.5.1 Descripción y objetivo

Este ensayo, denominado *V-funnel* en inglés, fue desarrollado por Ozawa en la Universidad de Tokio. Estudios experimentales pusieron de manifiesto que en el flujo de hormigón por un embudo, ir reduciendo la sección transversal de la salida aumentaba el riesgo de bloqueo por el contacto entre los áridos gruesos, siendo un indicativo de la necesidad de mejorar la viscosidad. El ensayo tiene por tanto como objetivo evaluar la habilidad de fluir del hormigón en áreas restringidas en dirección vertical y bajo su propio peso, cualificando la tendencia a la segregación y al bloqueo, mediante observación de la variación de la velocidad de flujo.



(a) Sección circular (b) Sección rectangular

**Figura 3.6 - Embudo-V (JSCE, 1998)**

El embudo-V, normalmente de acero, tiene forma de V con una apertura en el fondo, donde se coloca una compuerta que ha de ser estanca mientras esté cerrada y de rápida apertura, para interferir lo menos posible en el momento de la descarga. La geometría de la sección transversal puede ser de forma circular o rectangular, siendo la segunda la más utilizada. Las dimensiones y geometrías típicas se exponen en la Figura 3.6 (JSCE, 1998).

El ensayo consiste en llenar el embudo con la muestra representativa de HAC de forma continua y sin compactación alguna. Seguidamente, se abre la compuerta y en ese instante se comienza a medir el tiempo que tarda el volumen total de hormigón en fluir a través de la apertura. En algunos casos (JSCE, 1998; EFNARC, 2002) se propuso medir también el tiempo de flujo dejando reposar la muestra en el embudo durante 5 minutos para valorar la tendencia a la segregación.

### **3.5.2 Variantes**

Si bien las dimensiones representadas en la Figura 3.4 están bastante aceptadas (JSCE, 1998; EFNARC, 2002), en algunos trabajos se utilizaron embudos con dimensiones ligeramente mayores, con el ancho y altura de la parte trapezoidal igual a 51,5 cm y 45 cm, respectivamente, en lugar de 49 cm y 42,5 cm (Skarendahl y Petersson, 2000; Gomes, 2002).

Las dimensiones de la sección del canal de salida dependen del tamaño máximo del árido, recomendándose una dimensión mínima superior a 3 veces el tamaño máximo del árido. Esto conduce, en el caso de hormigones autocompactantes (cuyo tamaño máximo de árido no

supera en general los 20 mm) a dimensiones mínimas del orden de 6,5 a 7,5 cm, siendo la sección de 6,5 × 7,5 cm la más utilizada.

### 3.5.3 Interpretación de los resultados y valores típicos

El tiempo de flujo en segundos ( $T_v$ ) es la principal medida obtenida de este ensayo. Es aconsejable medir el tiempo de flujo al menos 2 veces en menos de 5 minutos, y obtener la media. Para el embudo de sección rectangular con  $b = 7,5$  cm (ver Figura 6), (Ozawa et al. 1994) han obtenido tiempos de 6 a 10 s para el HAC. Para  $b = 6,5$  cm, los tiempos de flujo óptimos se mueven de 6 a 15 s (Sakata et al., 1996; EFNARC, 2002; Gomes et al., 2002).

Se puede observar la naturaleza del flujo del hormigón a través del fondo para tener una idea del bloqueo producido. Respecto a la estabilidad, un flujo continuo sin interrupción se traduce en ausencia de segregación y/o bloqueo.

En cualquier caso, el significado físico de los resultados está relacionado con varios aspectos del hormigón autocompactante fresco. Cuando la cantidad y el tamaño de los áridos gruesos son suficientemente pequeños en relación a la apertura del embudo-V, la colisión y la interacción entre las partículas de grava no afectan las características del flujo. Bajo estas condiciones, el tiempo de flujo del embudo permite evaluar indirectamente la viscosidad de la mezcla a través de la fluidez. Si por el contrario la cantidad y tamaño de los áridos gruesos son relativamente grandes para el tamaño de la apertura, la interacción entre estos áridos es dominante. Bajo estas condiciones, el embudo-V es útil para evaluar la habilidad del HAC para pasar por aperturas estrechas, y no simplemente la viscosidad de la muestra.

### **3.5.4 Observaciones**

El método se ha mostrado eficiente para evaluar la habilidad de fluir del hormigón en áreas restringidas en la dirección vertical. Sin embargo, el ensayo no puede cualificar bien la tendencia a la segregación y bloqueo entre las armaduras. Asimismo, el resultado no refleja la habilidad de fluir en dirección horizontal o contraria a la gravedad. Por lo tanto, el tiempo de flujo obtenido en este ensayo no es suficiente para cuantificar las propiedades necesarias que garanticen las prestaciones del hormigón como autocompactante, por lo que deberá ser complementado con otros ensayos.

## 3.6 ANILLO DE BARRAS

### 3.6.1 Descripción y objetivo

El anillo de barras, denominado también anillo japonés, o *J-Ring* en inglés, es un aparato que se utiliza en combinación con otros ensayos, como son el de extensión de flujo, Orimet (que se describe más adelante) o embudo-V, a efectos de evaluar conjuntamente las habilidades de fluir y de pasar entre barras de armadura (EFNARC, 2002).

El aparato (Figuras 3.7 y 3.8) consiste en un anillo de 300 mm de diámetro, en el cual se disponen barras verticales de armadura de 100 o 120 mm de altura, con una apropiada separación entre ellas. Normalmente, se considera adecuado el uso de un espacio entre las barras igual o superior a tres veces el tamaño máximo del árido (EFNARC, 2002). Asimismo, las medidas del anillo según la norma española (UNE 83362:2007) son las mismas que las establecidas por la EFNARC, reflejadas en la siguiente imagen:

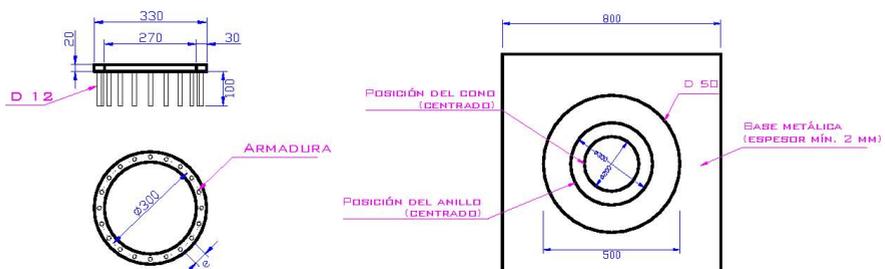


Figura 3.7 - Anillo de barras (UNE 83362:2007)

El procedimiento consiste en realizar el ensayo con el que se combine, pero dejando después fluir el hormigón horizontalmente sobre una superficie plana de manera que tenga que atravesar las barras del anillo para extenderse.



(a) Anillo de barras y cono de Abrams (b) Ensayo de extensión combinado con anillo

**Figura 3.8 - Anillo de barras**

Una vez cesa el flujo, se miden las alturas de hormigón justo dentro y fuera del anillo para evaluar el bloqueo. Ocasionalmente, también puede medirse el diámetro final de extensión, como la media de dos diámetros perpendiculares.

### 3.6.2 Variantes

La combinación de barras y espacio entre ellas varían mucho según los autores. En general se recomienda una separación de unas 3 veces el tamaño máximo de árido, si bien la especificación alemana (Brameshuber y Uebachs, 2002) reduce este valor a aproximadamente 2,5 veces.

Un caso particular es el de Brite EuRam (2000), que recomienda este ensayo únicamente para HAC reforzado con fibras, en cuyo caso sugiere un espacio libre entre barras de 1 a 3 veces la longitud de dichas fibras.

### **3.6.3 Interpretación de los resultados y valores típicos**

A pesar de que estas combinaciones de ensayos miden el flujo y la capacidad de paso, los resultados no son independientes. El flujo medido se ve afectado por el grado en que el movimiento del hormigón está bloqueado por las barras de refuerzo. El alcance del bloqueo se ve mucho menos afectado por las características de flujo y podemos decir que, de manera clara, cuanto mayor sea la diferencia de altura, menor será la capacidad de paso del hormigón.

La diferencia entre las alturas en las caras interior y exterior del anillo no debería superar los 10 mm para un hormigón con buena habilidad de paso (EFNARC, 2002).

El bloqueo y/o segregación también puede detectarse visualmente, con frecuencia de manera más fiable que mediante el cálculo.

### **3.6.4 Observaciones**

Estas combinaciones de ensayos se considera que tienen un gran potencial, aunque no existe una perspectiva general sobre cómo deberían interpretarse exactamente los resultados (EFNARC, 2002). Sin embargo, como ya se ha dicho en el apartado anterior, a pesar de que

se pretende medir simultáneamente la fluidez y la capacidad de paso, los resultados no son independientes, pues muy a menudo el material que atraviesa las armaduras tiene propiedades diferentes al original (más pasta, menor cantidad de árido grueso...).

Al igual que el ensayo de extensión de flujo, estas combinaciones presentan la desventaja de no estar limitadas, y por lo tanto no reflejan el modo en que el hormigón se desplaza y autocompacta en la práctica.

La opción combinada con Orimet tiene la ventaja de ser un ensayo dinámico y que también refleja la colocación en la práctica, aunque tiene como inconveniente la exigencia de dos operarios.

## 3.7 ENSAYO ORIMET

### 3.7.1 Descripción y objetivo

Este ensayo fue desarrollado por Bartos en 1978 para la caracterización de hormigones de alta trabajabilidad y, recientemente ha sido aplicado a hormigones autocompactantes. Se diseñó para evaluar la habilidad o facilidad del hormigón para fluir bajo su propio peso.

El aparato básico de este ensayo consiste en un tubo cilíndrico con diámetro interno de 120 mm y altura de 600 mm, con un pequeño embudo en el fondo que tiene una salida con diámetro de 80 mm (Figura 3.9). El procedimiento es similar al del embudo-V. Una vez preparado el aparato se llena el tubo con la muestra de hormigón, de forma continua y sin compactación. Inmediatamente después se abre la compuerta dejando fluir a través del embudo del fondo y se mide el tiempo que tarda en salir la muestra completa.



(a) Configuración (b) Ensayo Orimet combinado con anillo

**Figura 3.9 - Aparato del ensayo Orimet**

### **3.7.2 Variantes**

Una versión posterior del equipo incluye dos barras de acero de 10 mm dispuestas, en el embudo, perpendicularmente al flujo para evaluar la habilidad de paso del hormigón a través de las armaduras.

### **3.7.3 Interpretación de los resultados y valores típicos**

El tiempo de flujo se asocia a la habilidad de fluir o de rellenar, en el sentido de que cuanto menor es el tiempo de flujo mayor es la habilidad del hormigón de fluir. Para HAC se recomiendan tiempos de flujos inferiores a los 6 segundos (Bartos and Grauers, 1999; EFNARC, 2002; Rooney, 2002).

Cuando se combina este ensayo con el anillo de barras, se puede determinar la extensión de flujo después del paso del hormigón por las barras del anillo. En este caso, Bartos y Grauers (1999) obtienen un valor de 67 cm para un HAC, utilizando un espacio entre barras de 50 mm.

### **3.7.4 Observaciones**

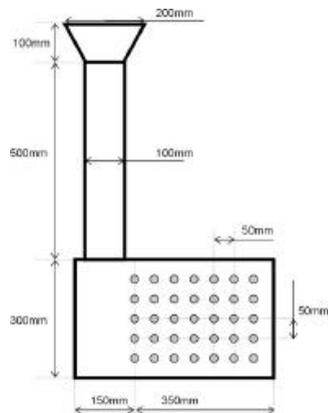
Una limitación práctica es que el aparato está patentado, lo cual encarece su adquisición.

### 3.8 ENSAYO DE LA CAJA DE RELLENO

#### 3.8.1 Descripción y objetivo

Este ensayo fue desarrollado por Yurugi et al. (1995), denominado también como ensayo Kajima o *fill box test* en inglés, para evaluar la habilidad de rellenar un espacio en presencia de obstáculos (Skarendahl y Petersson, 2000).

El equipo y la geometría del mismo se exponen en la Figura 3.10. El recipiente consiste en una caja transparente con dimensiones de 300 × 500 × 300 mm, abierta por arriba en la que se colocan perpendicularmente 35 barras de armadura a modo de obstáculo. Las barras, que pueden ser metálicas o de plástico, traspasan el espesor de 300 mm de la caja y la primera fila está situada a 150 mm de una de las paredes.



(a) Configuración b) Dimensiones típicas

**Figura 3.10 - Recipiente para el ensayo de habilidad de relleno (EFNARC, 2002)**

El método de ensayo consiste en introducir una muestra de hormigón por la zona libre de obstáculos (sin armadura) del recipiente. Se deja de verter el hormigón cuando el nivel del mismo alcanza la barra superior de la primera fila. Una vez se ha detenido el flujo en el interior del recipiente, se determinan las alturas máxima y mínima que alcanza el hormigón.

### **3.8.2 Interpretación de los resultados y valores típicos**

Con las alturas máxima ( $h_1$ ) y mínima ( $h_2$ ) alcanzadas por el hormigón se calcula el coeficiente de relleno como  $F = 100 (h_1+h_2)/2h_1$ . Este coeficiente, que representa la altura media alcanzada con respecto a la altura máxima, permite cuantificar la habilidad para el relleno.

Cuando  $F = 100$ , el hormigón es prácticamente autonivelante. Para considerar un hormigón como autocompactante deberían obtenerse un valor superior al 90.

Otros autores, en lugar de utilizar la altura como parámetro de medida, determinan el área relativa rellenada por el hormigón como indicador de la habilidad de relleno (Khayat, 1999).

### **3.8.3 Observaciones**

La mayor ventaja de este tipo de ensayo es poder visualizar el comportamiento del hormigón, ofreciendo una buena impresión sobre las características autocompactantes. Incluso una mezcla de hormigón con una elevada capacidad de relleno obtendrá malos resultados si la resistencia a la segregación y la capacidad de paso no son buenas.

Este ensayo es difícil de ejecutar en la obra debido a la estructura compleja del aparato. Necesita una gran cantidad de hormigón y un esfuerzo considerable para rellenar, vaciar y limpiar el aparato. Además, la duración del ensayo es considerable debido al proceso del relleno.

### 3.9 ENSAYO DEL TAMIZ VERTICAL

#### 3.9.1 Descripción y objetivo

Este ensayo, denominado como *vertical mesh-pass test* en inglés, tiene por objeto evaluar la habilidad del hormigón para rellenar un molde y pasar a través de una rejilla bajo una ligera presión (Ozawa et al., 1990; Skarendahl y Petersson, 2000).

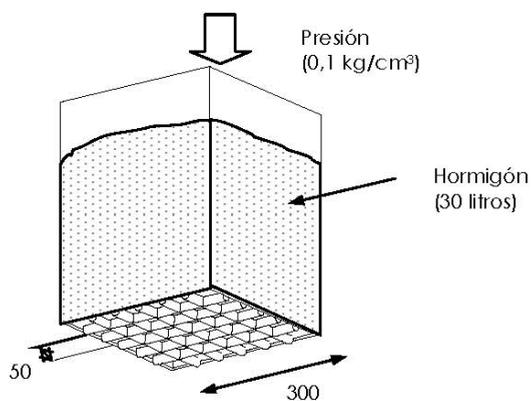


Figura 3.11 - Ensayo del tamiz vertical(Gomes, 2002)

Se utiliza un recipiente prismático, con una base de 300×300 mm, y con una capacidad de 30 litros de muestra (Figura 3.11). La base está formada por una cuadrícula de barras de 16 mm de diámetro, con una distancia de 50 mm entre ejes barras adyacentes.

Se comienza llenando el recipiente, previamente colocado sobre una superficie plana, para evitar que salga la muestra. Cuando está lleno, se levanta el recipiente y el hormigón empieza a fluir. Entonces, se aplica una presión de 0,1 kg/cm<sup>2</sup> sobre la superficie de la muestra.

### **3.9.2 Variantes**

Existe un aparato derivado de éste que sustituye la rejilla por barras paralelas y que requiere una menor cantidad de muestra de hormigón. Hay una buena correlación entre los resultados obtenidos con este aparato y los del ensayo de la rejilla (Skarendahl y Petersson, 2000).

### **3.9.3 Interpretación de los resultados y valores típicos**

Según Ozawa et al. (1990) este ensayo evalúa conjuntamente la segregación y la capacidad de relleno del hormigón en elementos con una alta densidad de armadura.

El principal resultado que se obtiene es el volumen de la muestra que atraviesa de la rejilla, que se toma como medida de la capacidad de relleno del hormigón.

La velocidad de paso es también un parámetro para la evaluación cuando todo el volumen pasa por la base.

No se han encontrado valores típicos para el HAC.

### **3.9.4 Observaciones**

El aparato fue utilizado para entender el comportamiento del hormigón autocompactante, pero no es adecuado para realizar el control de calidad sistemático debido a que tanto el volumen de muestra de hormigón como el tiempo consumido por el ensayo son relativamente grandes.

Además, se necesita una grúa para levantar la caja, lo cual dificulta el uso de este ensayo en la mayoría de los laboratorios.

### 3.10 OTROS ENSAYOS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA A SEGREGACIÓN

Para evaluar la resistencia a la segregación de los HAC se desarrollaron posteriormente diferentes ensayos específicos que consistían, básicamente, en analizar el asentamiento de los áridos gruesos en el interior de columnas del hormigón fresco. Seguidamente se detallan unos ensayos de este tipo que fueron validados, esencialmente, por los propios grupos que propusieron el método, quedando pendiente su aceptación o conocimiento por parte de otros investigadores.

#### 3.10.1 Ensayo de estabilidad con tamiz

Se propuso este ensayo, denominado también como ensayo GTM o *screen stability test* en inglés, para su uso en el diseño de mezclas y para la recepción del hormigón en la obra (AFGC, 2000; Tviksta, 2000; EFNARC, 2002). El aparato básico consiste en un tamiz de diámetro de 315 mm para retener partículas con tamaño mayor que 5 mm, sobre el cual se vierten 4,8 kg de hormigón. Se esperan 2 minutos y se determina el peso de la lechada que ha atravesado el tamiz.

Considerando el peso relativo de la lechada respecto al de la muestra, se aceptan valores del 15% y menores, y se rechazan hormigones con valores superiores al 30%. Entre estos límites, se recomienda realizar pruebas *in situ* para evaluar la segregación en el hormigón. Es un método sencillo, pero no rápido (antes de verter el hormigón hay que dejarlo reposar 15 minutos), lo que dificulta su uso en obra.

### 3.10.2 Ensayo de la columna

Otsuki et al. (1996), Ambroise et al. (1999) y Hamada et al. (2000) desarrollaron un ensayo que consiste en verter el hormigón sin compactar dentro de un molde cilíndrico con diámetro de 10 cm a 20 cm, y altura de 40 a 50 cm. Cuando el hormigón ha fraguado, se corta la muestra en discos de 5 a 10 cm. A continuación se separa el árido grueso lavando el hormigón sobre un tamiz de 5 ó 8 mm, y se evalúa el porcentaje de árido grueso presente en cada una de las secciones, por peso. Comparando los pesos obtenidos se determina el grado de segregación del árido grueso en el hormigón.

En la variante propuesta por Sedran y De Larrard (1999), se coloca el hormigón sin compactar en un molde cilíndrico, y una vez endurecido se ensaya la muestra a compresión diametral (mediante el ensayo brasileño). Se determina, por inspección visual de la cara fisurada, la altura correspondiente al asentamiento del árido grueso, que se define por el espesor de la zona superior de la muestra sin partículas de tamaño superior a 8 mm.

Una versión más sofisticada del ensayo de la columna fue desarrollada por Rooney y Bartos (2001) donde puertas situadas en las paredes de una columna (Figura 3.12) con dimensiones internas de 520 × 150 × 100 mm permiten extraer muestras de hormigón de las partes superior e inferior (Rooney, 2002). Se coloca el hormigón fresco en la columna y se aplican 20 sacudidas en la mesa de sacudidas. Después se extraen las dos muestras, se lavan sobre un tamiz de 5 mm y se comparan los pesos de los áridos gruesos para evaluar la segregación.



Figura 3.12 - Aparato del ensayo de la columna de consolidación (Rooney, 2002)

### 3.10.3 Tubo-U

El ensayo del Tubo-U fue desarrollado en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Universidad Politécnica de Cataluña (Gomes et al., 2001, 2002), para evaluar cuantitativamente la estabilidad o resistencia a la segregación.

Se diseñó como una extensión del ensayo U de Sakata et al. (1997) y el ensayo de columna de Rols et al. (1999). En este ensayo se utiliza un tubo en forma de U de 160 mm de diámetro, de las

dimensiones que se indican en la Figura 3.13. Se rellena el tubo con hormigón por uno de sus bocas hasta que quede enrasada su otra boca sin compactación. Se deja fraguar el hormigón durante unas horas (normalmente, entre 3 y 6). Se abre el tubo, se cortan discos de 10 cm de espesor en distintas secciones del tubo y se determina el contenido de árido grueso presente en cada sección por lavado, tamizado del mortero (hasta las fracciones de 5 mm) y secado.

La relación de segregación (denominada por RS), definida por el cociente entre el contenido de árido grueso evaluado en el hormigón y el contenido teórico según la dosificación, debe ser igual o superior a 0,90 para un HAC que presente buena estabilidad.

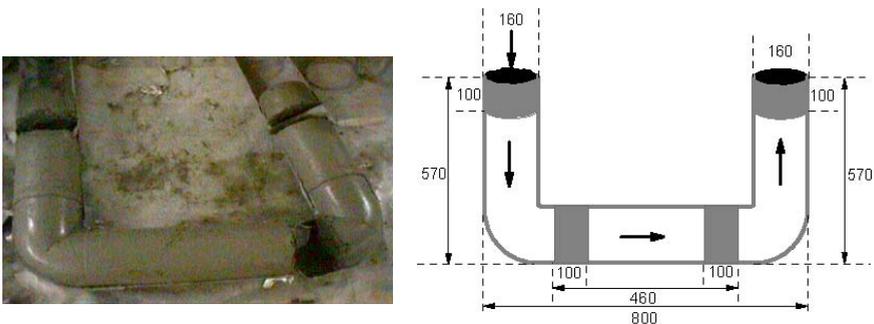


Figura 3.13 - Ensayo del Tubo-U (Gomes, 2002)

### 3.10.4 Resistencia a penetración

Se utilizó la resistencia a penetración de la superficie del hormigón fresco para evaluar la resistencia a segregación del árido grueso en el HAC. Tanigawa et al. (1996) evaluaron el uso de anillos, esferas y cilindros para determinar la forma que mejor permite cuantificar

la resistencia a la segregación. Concluyeron que el anillo es lo que da mejores resultados.

También, en el método propuesto por Bui et al. (2002) se determina la penetración de un anillo con diámetro interno de 75 mm, espesor de 1 mm y peso de 54 gramos en el hormigón. Valores de penetración igual o menores que 8 mm indican una buena resistencia a la segregación.

### **3.10.5 Índice Visual de Estabilidad**

Reconociendo la dificultad de determinar rápidamente el grado de segregación en una mezcla, se propuso un índice de estabilidad basado en la observación de la superficie del hormigón en la propia cuba de la amasadora, en el cubilote después de la descarga del hormigón, o en el hormigón resultante del ensayo de extensión de flujo (Daczko, 2002).

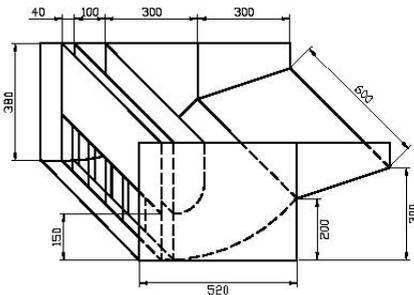
Dicho índice puede tener valores de 0 a 3, en incrementos de 0,5. El valor 0 indica la ausencia de signos de segregación. El valor 1 indica la presencia de una ligera exudación y burbujas de aire en la superficie, pero sin la aureola de mortero o acumulación de áridos en el ensayo de la extensión de flujo. El valor 2 indica la presencia de una aureola de mortero con ancho menor que 10 mm y/o la acumulación de árido grueso en el ensayo de la extensión de flujo. Finalmente, el valor 3 indica una clara evidencia de segregación, acumulación de áridos y la presencia de una gruesa capa de pasta sobre la superficie.

Un HAC debería tener un índice igual o menor que 1 para considerar que tiene buena resistencia a la segregación. Aunque se obtuvo una buena correlación entre el valor del índice de estabilidad visual y los resultados del ensayo de columna, la determinación del índice no es objetiva.

### 3.11 CONTROL DE RECEPCIÓN DEL HORMIGÓN EN LA OBRA

Para controlar el hormigón suministrado por camión a la obra, Ouchi et al. (1996) desarrollaron un ensayo en el cual se utiliza un aparato que consiste de una caja con barras de armadura colocadas verticalmente en su interior (Figura 3.11). Se coloca este aparato entre el camión y la bomba en la obra, y se hace pasar todo el volumen del hormigón a través del mismo. Si se bloquea el hormigón, se rechaza el resto del material del camión.

Este aparato fue utilizado por primera vez en la construcción de un depósito de gas en Japón, como único método de control del hormigón fresco en la obra (Okamura et al., 2000).



(a) Dimensiones y configuración (b) Utilización en obra

**Figura 3.11 - Aparato para el ensayo del control de recepción (Ouchi, 1999)**

## **3.12 SELECCIÓN DE ENSAYOS A ESTUDIAR**

### **3.12.1 Consideraciones generales**

El estudio realizado puso de manifiesto que los ensayos de caracterización de la autocompactabilidad del hormigón son numerosos y están fundamentados en una base esencialmente empírica. Ello evidencia la necesidad de profundizar en aspectos referentes a la selección o priorización del tipo o tipos de ensayo más representativos, la sistematización y normalización de procedimientos de ensayo, y el desarrollo de criterios de validación o de aceptación-rechazo en un ámbito general, tanto en la etapa de diseño del material, como para recepción y control en obra del hormigón.

Respecto a lo que puede suponer una priorización o elección de ensayos no existe consenso entre los distintos investigadores que trabajan en este tema. Así, Yurugi y Sakai (1998) en el marco del sistema de aseguramiento de calidad para hormigones altamente fluidos, como es el HAC, proponen el empleo del ensayo del embudo-V para controlar la resistencia a segregación del hormigón. Conjuntamente, especifican el uso del ensayo de extensión de flujo. Esta misma opción es la recomendada por EFNARC (2002), considerando alternativamente el uso combinado de los ensayos de extensión de flujo y anillo de barras.

Bartos y Grauers (1999) recomiendan el uso del ensayo Orimet combinado con el anillo de barras para el control del hormigón en la obra, por entender que son procedimientos simples, fiables, y racionales. Además esta combinación permitiría valorar los tres principales aspectos de la autocompactabilidad: fluidez, resistencia a segregación y habilidad de pasar sin bloqueo.

AFGC (2000) recomienda un único ensayo, que es el de la extensión de flujo, para la aceptación-rechazo del hormigón en obra.

En este supuesto de utilizar un único ensayo de control, Gomes (2002) recomienda que sea el ensayo de caja en L, al resultar ser éste más exigente que otros ensayos como el de extensión de flujo o el embudo-V.

Por otra parte, los valores considerados en cada ensayo para validar la autocompactabilidad se mueven usualmente en rangos amplios. En este sentido, una vía a considerar sería la clasificación del HAC en distintos tipos según en que zona del rango de resultados se encuentren las características evaluadas. También, en esta misma línea de consideraciones, puede plantearse un rango óptimo en los valores de los parámetros teniendo en cuenta el tipo de aplicación a la que va a ser destinado (Bury y Bühler, 2002).

### **3.12.2 Selección propuesta**

Para realizar esta propuesta se ha tenido en cuenta que los ensayos seleccionados deberían ser capaces de ofrecer una determinación rápida y fiable de las propiedades fundamentales del HAC, tanto en el laboratorio como en obra. El equipamiento necesario debería ser robusto, fiable, manejable y económico. El procedimiento debería poder ser llevado a cabo por un solo operador y los principales resultados, que deberían poder ser interpretados con una experiencia mínima, tendrían que proporcionar una buena definición o especificación de las diferentes mezclas de HAC (Bartos, 2000).

Para que la trabajabilidad de un HAC quede bien definida, los ensayos tienen que evaluar sus tres propiedades fundamentales: capacidad de relleno, habilidad de paso y resistencia a la segregación.

Del estudio realizado se desprende que resulta imposible reducir la caracterización a un solo ensayo. En especial si tenemos en cuenta que siempre que hagamos pasar el hormigón a través de armaduras, el material que atraviesa el obstáculo puede no ser representativo de la mezcla original. En este caso, cualquier medida sobre la fluidez resultaría difícil de interpretar, sobre todo a la hora de comparar entre distintas mezclas, o de clasificarlas.

En consecuencia será necesario utilizar al menos dos ensayos: uno para definir el hormigón en términos de fluidez y capacidad de relleno, y otro para evaluar su habilidad de paso.

Respecto a la resistencia a la segregación, los métodos específicos que la cuantifican hacen muy dificultosa su aplicación en obra. Sin embargo, este parámetro resulta imprescindible para el control de recepción, por lo que se ha tenido presente a la hora de realizar la selección de ensayos, eligiendo métodos que permitan una buena valoración visual de la misma, o que, en cualquier caso, permitan detectar cualquier defecto grave de segregación.

### *3.12.2.1 Fluidez y capacidad de relleno*

A la hora de evaluar la fluidez y la capacidad de relleno observamos que el ensayo de extensión de flujo es el más generalmente aceptado, y además, el único que permite valorar la deformabilidad en la dirección horizontal. Otros ensayos en los que el hormigón fluye

horizontalmente, como la caja en L, permiten evaluar el flujo en esta dirección pero, debido a que el espacio está restringido, no permiten observar la capacidad total de deformación.

Todo esto, unido a la facilidad de realización, y a la sencillez del equipamiento necesario, hace que el ensayo de extensión de flujo sea fundamental para la evaluación de la trabajabilidad del hormigón, en especial en situaciones en las que, por las características de la aplicación, el hormigón deba recorrer una distancia significativa en la dirección horizontal, desde el punto de vertido, para rellenar todo el encofrado.

Sin embargo, hay aplicaciones en las que el flujo horizontal no es tan importante, como en aquellas en las que se rellenan elementos verticales. En este caso, podría resultar más apropiado observar el comportamiento del flujo en esta dirección, para lo cual resulta sencillo y muy eficiente el uso del embudo-V. El de sección rectangular está más extendido y resulta más fácil de fabricar, el cual también es el exigido por la norma española (UNE 83364:2007).

Estos dos ensayos (extensión de flujo y embudo-V) permiten una buena valoración cualitativa de la segregación, bien observando el aspecto de la masa de hormigón, o el flujo del mismo, respectivamente. Ambos permitirían detectar rápidamente cualquier defecto grave de segregación.

En cuanto al ensayo de Orimet, que está basado en los mismos fundamentos que el embudo-V, quedaría descartado frente a éste por la mayor complejidad del aparato. Además, el hecho de que esté patentado encarece su obtención.

### 3.12.2.2 *Habilidad de paso*

Para evaluar la habilidad de paso del hormigón destacan, por su mayor aceptación y simplicidad, la caja en L, la caja en U y el anillo de barras.

Otros ensayos, como el del recipiente, o el del tamiz vertical, permiten también una buena observación del comportamiento del hormigón a la hora de atravesar obstáculos de armadura, pero la gran cantidad de tiempo y material que requieren, además de su mayor complejidad, hacen que no resulten apropiados para su uso generalizado.

La caja en L presenta ventajas en algunos aspectos respecto a la caja en U. En primer lugar, y por la propia configuración del aparato, la caja en L permite visualizar más claramente lo que ocurre entre las armaduras. También, por el mismo motivo, permite observar el material a lo largo del canal, pudiendo realizar así una mejor valoración de la segregación. En segundo lugar, permite obtener más fácilmente una idea de la fluidez (con las restricciones mencionadas anteriormente), pues para medir el tiempo de la caja en U resulta difícil determinar con exactitud el momento en que la masa de hormigón se detiene.

En algunas ocasiones, sin embargo, se requiere del HAC que fluya en dirección contraria a la gravedad, para lo cual la caja en L no ofrece ninguna medida. En este caso puede resultar especialmente apropiado el uso de la caja en U, que resulta más restrictiva en este aspecto. La de base plana es más sencilla de fabricar que la de base circular, y además resulta más exigente debido a la presencia de las dos esquinas.

Si bien cualquiera de los dos ensayos anteriores podría ser utilizado en obra para valorar la habilidad de paso, el ensayo de extensión con anillo de barras destaca por su simplicidad, lo que facilitaría su utilización. Esta combinación de ensayos permite una muy buena observación visual de la resistencia al bloqueo, y también a la segregación. Sin embargo, el hecho de que las alturas de hormigón que se alcanzan a un lado y otro de las barras sean muy pequeñas (del orden de los 25 mm), hace que resulte poco preciso, por lo que su uso para la caracterización o clasificación de mezclas no parece adecuado. En cualquier caso, sí que resultaría adecuado para el control de recepción en obra.

### *3.12.2.3 Conclusiones*

En las Tablas 3.1 y 3.1 bis se recogen, para la selección de ensayos propuesta, los parámetros que puede evaluar cada ensayo, tanto cuantitativa como cualitativamente, y en que grado.

Se incluyen además las principales características de los mismos en cuanto a los requisitos para su ejecución, considerando:

- tiempo necesario para realizar el ensayo (incluyendo la preparación, el llenado, la toma de medidas y la limpieza),
- cantidad de muestra necesaria,
- número mínimo de operarios y
- valoración cualitativa del grado de dificultad (considerando también la manejabilidad del equipo, la posibilidad de error...).

Finalmente se añaden algunas observaciones complementarias a tener en cuenta a la hora de interpretar correctamente los resultados obtenidos con cada ensayo.

Tal y como ya se había considerado, ninguno de los ensayos puede caracterizar bien, por si solo, todos los aspectos fundamentales de la trabajabilidad del HAC. Por lo tanto, será necesario elegir siempre un grupo de ensayos (al menos 2), que permitan en su conjunto una buena evaluación de las tres características principales.

A la hora de elegir entre las diferentes combinaciones posibles, es muy importante tener en cuenta las necesidades de la aplicación a la que va a ser destinada la mezcla. De este modo se pueden seleccionar los ensayos que mejor simulen el comportamiento real que tendrá el HAC. De igual manera, el rango óptimo de valores de los diferentes parámetros deberá ser más o menos restrictivo en función de las exigencias de esta aplicación.

MÉTODO		PROPIEDAD				
		Extensión de Flujo	Embudo-V	Caja en L	Caja en U	Extensión con Anillo
Fluidez y Capacidad de Relleno		✓✓	✓	✓	✓	✓
Habilidad de Paso		XX	X	✓✓	✓✓	✓
Segregación			✓ 	X 	X	
Ejecución	Cantidad de Hormigón (l)	5,5	9,6	12	19	5,5
	Tiempo aprox. (min)	2	2	5	6	3
	Nº mínimo de operadores	2	1	2	1	2
	Grado de Dificultad	Bajo	Bajo	Medio – Alto	Alto	Medio

✓ Adecuado

X No adecuado

 Permite buena valoración visual

**Tabla 3.1 – Sugerencias de adecuación de los ensayos (Parte 1)**

PROPIEDAD \ MÉTODO		Extensión de Flujo	Embudo-V	Caja en L	Caja en U	Extensión con Anillo
		Principales Inconvenientes	No permite valoración del flujo en sentido contrario a la gravedad	No permite valoración de la deformabilidad en dirección horizontal ni contraria a la gravedad	Resulta difícil interpretar la medida de la fluidez cuando existe bloqueo	No permite valorar la fluidez ni observar lo que ocurre entre las armaduras
Principales Ventajas	Único ensayo que permite valorarla deformabilidad en dirección horizontal	Único sensible cuantitativa-mente a la segregación	Permite una valoración global (pero no independiente) de todas las propiedades	Único ensayo que permite valorar el flujo en sentido contrario a la gravedad	Valoración visual muy buena	
Aplicaciones más adecuadas	Imprescindible en las aplicaciones en las que el hormigón deba recorrer cierta distancia en la dirección horizontal desde el punto de vertido	Aplicaciones en las que el hormigón deba fluir principalmente en dirección vertical	Muy útil para la caracterización, sobre todo en laboratorio (fase de diseño de la mezcla)	Aplicaciones en las que el hormigón deba fluir en sentido contrario a la gravedad	Muy útil para el control de recepción y la evaluación visual de la resistencia al bloqueo, sobre todo en obra	

Tabla 3.1 bis – Sugerencias de adecuación de los ensayos (Parte 2)

Teniendo en cuenta las observaciones indicadas en las Tablas 3.1 y 3.1 bis pueden obtenerse algunas combinaciones adecuadas en función de la aplicación, como las que se indican, a modo de ejemplo, en la Tabla 3.2.

<b>MÉTODO</b> <b>PROPIEDAD</b>	Extensión de Flujo	Embudo-V	Caja en L	Caja en U	Extensión con Anillo
Losas y otros elementos horizontales (en obra)	✓				✓
Pilares y otros elementos verticales (en obra)		✓			✓
Diseño de mezclas (en laboratorio)	✓		✓		
Aplicaciones con flujo en sentido contrario a la gravedad	✓ *	✓ *		✓	

\* Se elegirá extensión de flujo o embudo-V en función de las demás características de la aplicación

**Tabla 3.2 – Posibles combinaciones en función de la aplicación**

En cualquier caso, otras combinaciones son posibles siempre que la selección cumpla los dos requisitos siguientes:

- 1.-Permitir una buena evaluación de las 3 propiedades fundamentales que caracterizan al HAC en estado fresco (fluidez o capacidad de relleno, habilidad de paso y resistencia a la segregación).
- 2.-Adecuarse a las necesidades de la aplicación.



# **CAPÍTULO 4**

**Dosificaciones con**

**Áridos de la Región de Murcia**



## **4.1 FASE 1: ESTUDIO DE LA DOSIFICACIÓN, INFLUENCIA DE LOS ADITIVOS QUÍMICOS Y PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO. (Dic 2005-Jul 2006)**

### **4.1.1 Objetivos de la fase:**

#### *4.1.1.1 Estudio de la dosificación.*

La dosificación tiene por objeto determinar las proporciones de los distintos componentes para obtener hormigones que satisfagan las demandas tanto en estado fresco como en estado endurecido. El proceso de la dosificación es complejo y no existe un método generalizado debido a la influencia tanto de los materiales como a la exigencia de los sistemas de producción, transporte y colocación.

En esta fase se pretende obtener dosificaciones de hormigón autocompactante a partir de los materiales disponibles en el área de la Región de Murcia con distintas relaciones agua/cemento, distintos tipos de cemento, y otras variables de modo que se establezcan procesos de dosificación lo más generales posibles.

Durante este proceso se estudiarán los distintos métodos de control del HAC en estado fresco propuesto por distintos autores, analizando su validez y proponiendo modificaciones si se considerara necesario.

#### *4.1.1.2 Estudio del comportamiento en estado fresco.*

Esta fase del proyecto se solapa con la anterior aunque tiene una mayor continuidad, y tiene como principal objetivo estudiar el comportamiento en estado fresco del hormigón, es decir, cuáles son las variables que permiten caracterizar a un hormigón fresco de modo que pueda ser denominado autocompactante, así como estudiar la retracción del hormigón en estado fresco y durante el proceso de fraguado.

En esta fase se comparan los resultados obtenidos con los presentados por diversos autores así como los conocidos para hormigones tradicionales, de modo que se establezcan las oportunas relaciones y conclusiones de las propiedades del hormigón realizado. Al tiempo se estudian los diversos ensayos propuestos para estimar las propiedades del HAC en estado fresco de modo que se estandaricen los valores de aceptación y se estudien si son pertinentes modificaciones en los mismos.

De igual forma y ante la posible importancia de la retracción del HAC se estudiará esta en estado fresco y durante la fase de fraguado inicial.

#### *4.1.1.3 Estudio de la influencia de los aditivos químicos.*

La elevada demanda de fluidez del HAC hace obligatorio el empleo de aditivos superplastificantes a los cuales se añaden en ocasiones aditivos cohesionantes con el objeto de obtener un hormigón con una adecuada fluidez y estabilidad en estado fresco.

La modificación en las propiedades del hormigón debido al empleo del aditivo deben ser estudiadas por lo que se hacen necesarios la realización de ensayos previos para la determinación de la influencia de los aditivos, estableciendo al tiempo las dosificaciones óptimas del aditivo respecto al tipo de cemento empleado, contenido de áridos, de agua, etc.

#### **4.1.2 Ensayos preliminares**

Para conocer la respuesta de los materiales, se decide realizar una serie de ensayos preliminares con diferentes dosificaciones obtenidas basándose en los criterios más generalizados que se indican en la bibliografía disponible. Un resumen de los mismos ha sido recogido en la Tabla 4.1.

Componente	Autor	Mínimo	Máximo
Contenido de finos < 150 $\mu\text{m}$ (cemento + adiciones)	EFNARC	400kg/m <sup>3</sup>	600kg/m <sup>3</sup>
Relación agua/finos en volumen	Okamura, 1997	0,90	1,05
	EFNARC, 2001	0,85	1,10
Relación árido grueso / árido total	Okamura, 1997		< 50%
Tamaño máximo del árido	Gomes et al., 2001		20 mm
Contenido de cemento	EFNARC, 2002	350kg/m <sup>3</sup>	500kg/m <sup>3</sup>
	EHE	250 kg/m <sup>3</sup>	400 kg/m <sup>3</sup>
Relación agua /cemento (en peso)	Según la instrucción EHE		
Relación agua/material cementante (cemento+adiciones)	Okamura, 1997		0,40
	Gomes et al., 2001	0,30	0,40
Contenido de agua	Gomes et al., 2001	160 l/m <sup>3</sup>	200 l/m <sup>3</sup>
Dosificación superplastificante	Bettor, 2000	1,2 %	2 %

Tabla 4.1 – Criterios generales de diseño para HAC

En primer lugar se va a proceder a estudiar la dosificación de un HAC, para ello se estudia el comportamiento en estado fresco del HAC y de la pasta de mortero. Para estimar las propiedades del hormigón en estado fresco se realiza el ensayo de slump flow (Fig. 4.1). El

procedimiento de ensayo consiste en colocar el cono de Abrams en el centro de una superficie lisa. El cono se rellena con el HAC sin ningún método de compactación hasta enrasar con la cara superior. Posteriormente se levanta lentamente y se mide el tiempo que tarda la torta en recorrer un diámetro de 50 cm (T50) y el diámetro final alcanzado (Df). Para que el hormigón pueda considerarse como autocompactante, el valor del T50 debe oscilar entre 2 y 5 segundos. El valor del diámetro final debe oscilar entre 600 y 750 mm.

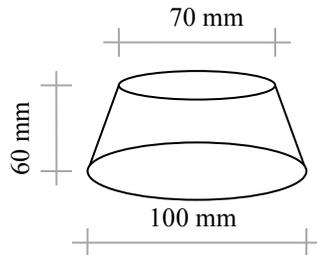


**Figura 4.1 - Imagen del ensayo de slump flow**

Para ensayar la pasta cementante se realizan ensayos del mini-cono. En este caso existen dos tipos de ensayos recogidos en la bibliografía:

- a. Mini-cono de Kantro (1980).

Procedimiento recomendado por Ouchi (1996) y por Okamura (1997), aunque éstos lo emplean combinado con otros ensayos.



**Figura 4.2 - Mini cono de Kantro**

El ensayo del mini-cono de Kantro (1980), es de procedimiento similar al del *slump flow* aunque empleando un cono de menor tamaño (Fig. 4.2). El parámetro a medir es,  $\Gamma_m$  (ec. 1) que es el que permite determinar si la fluidez es la adecuada.

$$\Gamma_m = \frac{(d_1 d_2 - d_0^2)}{d_0^2} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde:

$\Gamma_m$ , deformabilidad de la pasta.

$d_1, d_2$ , diámetros finales del ensayo del mini cono (mm)

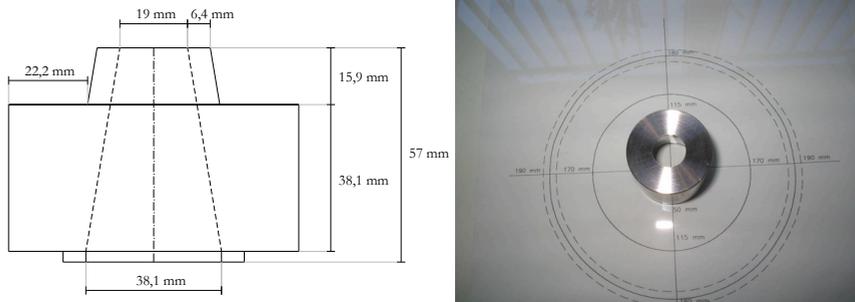
$d_0$  menor diámetro del mini-cono (mm)

En general, la dosificación adoptada para el mortero es adecuada si el valor de  $\Gamma_m$  oscila entre 3 y 7, con un diámetro final entre 240 mm y 260 mm.

b. Mini-cono

El ensayo del mini-cono sugerido por Gomes (2002) se emplea para estudiar las propiedades de las pastas destinadas a HAC. En

este caso el procedimiento es igual al anterior, pero se registra el tiempo que tarda en recorrer un diámetro de 115 mm y el diámetro final alcanzado. El primer valor debe oscilar entre 2 y 3,5 segundos y el segundo rondar los  $180 \pm 10$  mm.



**Figura 4.3 - Esquema y foto del ensayo de mini-cono empleado por Gomes**

Otro ensayo empleado para conocer el contenido adecuado de superplastificantes es el ensayo del cono de Marsh (Fig. 4.4), consiste en rellenar un cono con 1 litro de pasta. Posteriormente, se abre la parte inferior y se mide el tiempo que tardan 500 ml en fluir. Es aconsejable registrar la medida y humedad ambiental en el momento del ensayo. Debiendo repetirse para diferentes relaciones finos/cemento y contenido de superplastificante.



**Figura 4.4 - Ensayo del cono de Marsh**

Por último, indicar que para obtener la granulometría más compacta posible se procede de la siguiente forma. Se mezclan en un recipiente una determinada granulometría, hasta conseguir homogeneidad. Posteriormente se rellena un molde de 300 x 150 mm<sup>2</sup> (volumen de 5,298 dm<sup>3</sup>), en cuatro capas. Esta mezcla se compacta mediante picado con una barra de extremo redondeado de 16 mm de diámetro. La compactación de cada una de las capas se realiza con 25 golpes, hasta enrasado. Posteriormente la mezcla se pesa. La operación debe repetirse con diferentes relaciones arena/grava.

#### **4.1.2.1 Método de dosificación:**

La literatura científica disponible propone múltiples métodos, aunque la mayor parte de ellos, parten del propuesto desde la

Universidad de Tokio por Okamura y Ozawa en 1995. Este método, aconsejado por la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE) estudia el hormigón como un material bifásico compuesto por una pasta cementante (cemento y adiciones) y un esqueleto granular (áridos).

La pasta debe ser capaz de proporcionar la fluidez suficiente para garantizar que el hormigón sea capaz de ponerse en obra sin necesidad de medios auxiliares (extendido y vibrado). Además, debe proporcionar la viscosidad que garantice la estabilidad de la masa en estado fresco. Para ello se busca un contenido óptimo de cemento, adiciones, filler y superplastificante.

El esqueleto granular, se estudia de modo que la relación arena/grava proporcione la máxima compacidad con el menor volumen de huecos. Esto permite reducir el contenido de pasta, y conduce a un hormigón con menor porosidad y menor retracción (Goltermann et al., 1997).

De entre todos los métodos se decide emplear el propuesto por Gomes (2002) y Gettu (2003). Este método consiste en realizar los siguientes pasos:

1. Obtención de la pasta. Para ello se ensayan pastas con distinta relación superplastificante/cemento mediante el ensayo del cono de Marsh (Fig. 4). Los resultados se representan en una gráfica, donde se puede apreciar que para un contenido de superplastificantes (sp) el tiempo de vaciado no mejora significativamente. El contenido óptimo de sp, es aquél que produce la máxima fluidez con el mínimo contenido, y está definido por un ángulo de  $140^{\circ} \pm 10^{\circ}$ . La relación sp/c óptima difiere en con la relación finos/cemento (f/c), por lo que el ensayo debe repetirse. Para fijar la relación f/c óptima se realizan

ensayos de mini-cono, considerando que una extensión de la torta de  $180\pm 10$  mm y un valor de  $T_{115}$  entre 2 y 3,5 segundos es válido.

2. El esqueleto granular se optimiza rellenando un recipiente de un volumen conocido (unos 5 litros) con diferentes proporciones grava/arena. La relación que proporcione la máxima densidad aparente se corresponde con el mínimo volumen de huecos.
3. Conocida la composición de la pasta y de los áridos se realizan diversos ensayos con distinto contenido en pasta hasta cumplir con los requisitos reológicos exigidos al HAC.

#### 4.1.2.2 *Materiales*

Se han adoptado dos tipos de cemento y una relación agua / cemento de entre 0,50 a 0,60. Se han empleado CEM II/A-S 42,5 N/SR y un CEM II / BM (S-V) 42,5. Ambos son fabricados por Holcim, en Lorca (Murcia). El primero es un cemento Portland resistente a los sulfatos, mientras el segundo es un cemento mixto cuyas características están recogidas en las Tablas 4.2, 4.3 y 4.4.

Composición (%)					Ensayos Físicos								
Clinker	Yeso	Cenizas Volantes	Escoria	C. minor	R 63 $\mu$	R 45 $\mu$	Blaine cm <sup>2</sup> /g	H <sub>2</sub> O	IF	FF			
79	4	0	14	3	1,9	4,8	3796	27,8	260	310			
Análisis Químico (%)											Comp. Potencial Clinker Según UNE 80304		
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pérd. Fuego	C <sub>3</sub> A	C <sub>3</sub> A+C <sub>4</sub> AF
22,1	4,7	3,7	61,2	1,9	2,4	0,51	--	0,057	0,32	0,12	2,5	1,7	13,9

**Tabla 4.2 - Características y composición del cemento CEM II/A-S 42,5 N/SR**

Composición (%)					Ensayos Físicos						
Clinker	Yeso	Cenizas Volantes	Escoria	C. minor	R 63 $\mu$	R 45 $\mu$	Blaine cm <sup>2</sup> /g	H2O	IF	FF	
63	6	7	22	2	2,1	7,0	4176	33,6	260	310	
Análisis Químico (%)											
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl-	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pérd. Fuego
25,2	7,6	2,2	52,9	4,1	3,0	0,88	0,17	0,050	0,44	0,17	2,1

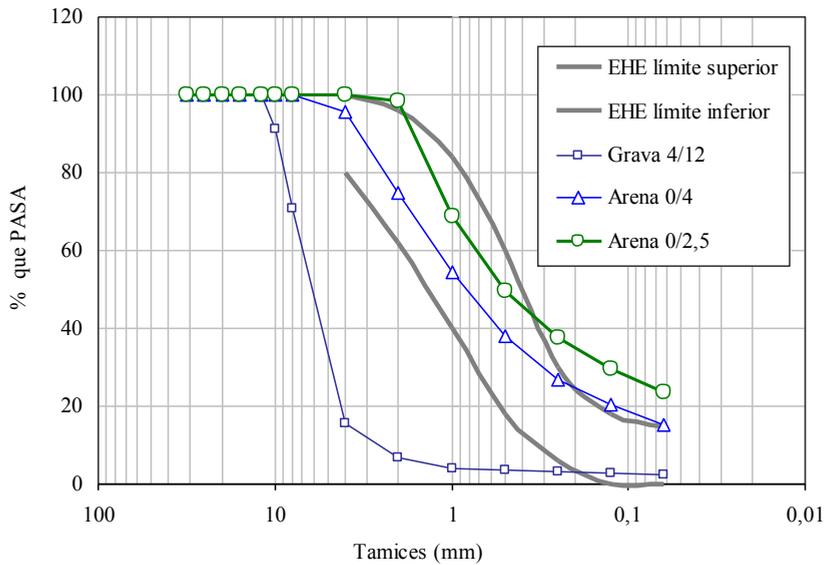
Tabla 4.3 - Características y composición del cemento CEM II/B-M (SV) 42,5 N

CEM II/B-M (S-V) 42,5 N				II/A-S 42,5 N/SR			
RC 1D	RC 2D	RC 7D	RC 28 D	RC 1D	RC 2D	RC 7D	RC 28 D
14,7	25,4	41,7	57,9	14,1	26,2	43,4	57,0

**Tabla 4.4 - Resistencia de los cementos**

Se emplea agua común de la red de suministro urbano de Molina de Segura (Murcia).

Se utilizan áridos de machaqueo calizos procedentes de la cantera de Fortuna propiedad de Holcim Áridos, S.L. De esta cantera se han seleccionado dos tipos de arenas, una fina 0/2,5 y otra gruesa 0/4, y una grava 4/12, cuya granulometría se recoge en la Figura 4.5.



**Figura 4.5 - Curvas granulométricas de los áridos empleados**

Para la fabricación de HAC se han empleado aditivos basados en la tecnología de los éter-policarboxílicos. Se han probado los aditivos Glenium C303SCC, ACE 325 SY 518 y PL-PF/C-1B/4. Su dosificación se ha ajustado de modo que el hormigón autocompactante resultante tuviera la viscosidad y fluidez adecuada de acuerdo con los criterios especificados por la EFNARC (2002) que se corresponde con los más generalizados en la literatura disponible.

#### 4.1.2.3 *Campaña preliminar de ensayos*

A Continuación se ofrece un resumen de los datos más significativos obtenidos en la campaña preliminar de ensayos. En primer lugar se decide intentar fabricar un HAC a partir de los límites establecidos en la Tabla 4.1. Así, a partir de las dosificaciones consultadas en la bibliografía se deciden ensayar, tomando como dosificación de partida la establecida en la Tabla 4.5.

<b>agua/cemento</b>		0,50
<b>Materiales (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento</b>	350
	<b>Agua</b>	175
	<b>Grava (4/12,5)</b>	750,1
	<b>Arena gruesa (0/4)</b>	461,4
	<b>Arena Fina (0/2)</b>	692,1
<b>Aditivo químico (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>C 303 SCC / ACE 325</b>	(*)
<b>Tipo de cemento</b>		II / A-S 42,5 N/SR

(\*)El contenido de aditivo no está marcado en la tabla estableciéndose un contenido inicial de 1,4% del peso del cemento, y subiendo hasta un valor del 1,6%.

**Tabla 4.5 - Dosificaciones iniciales a ensayar para 1000 litros**

En esta primera serie de ensayos se observa que el superplastificante Glenium C303SCC permite un control efectivo de la masa en estado fresco, mientras el aditivo ACE 325, da lugar a una elevada segregación y exudación, sin que el hormigón en estado fresco mantenga la cohesión adecuada. Igualmente se observa que es necesario incrementar el contenido de finos de la dosificación inicial con el objeto de controlar de una manera más adecuada la cohesión.

Se decide modificar la dosificación incorporando finos y cenizas para mejorar su comportamiento en estado fresco. Los resultados mejoran claramente aunque sin embargo, muestran una viscosidad muy elevada. Por ello, se modifica el contenido de áridos estableciendo la dosificación expuesta en la Tabla 4.6.

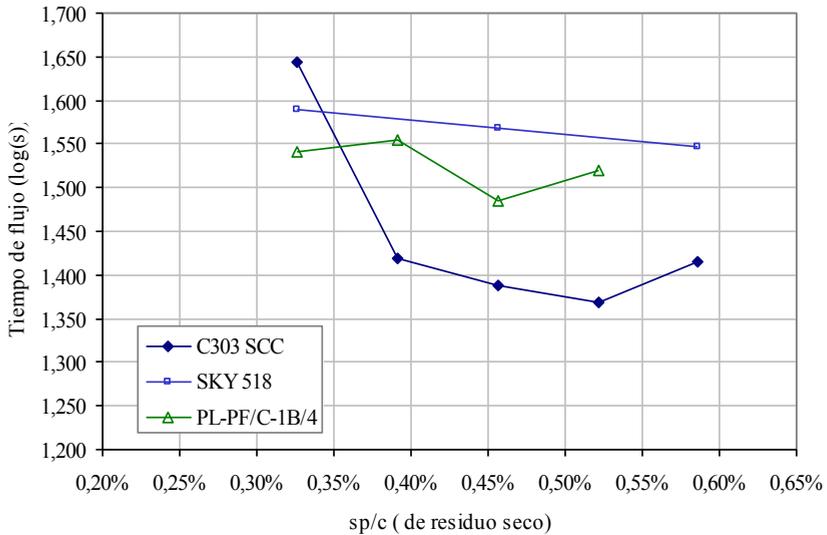
<b>agua/cemento</b>		0,52
<b>Materiales (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cemento</b>	350
	<b>Agua</b>	182
	<b>Grava (4/12,5)</b>	729,61
	<b>Arena gruesa (0/4)</b>	431,96
	<b>Arena Fina(0/2)</b>	596,52
	<b>Cenizas</b>	100
<b>Aditivo químico (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>C 303 SCC</b>	1,4 %
<b>Tipo de cemento</b>		II / A-S 42,5 N/SR

**Tabla 4.6 - Dosificaciones iniciales a ensayar para 1000 litros**

Esta dosificación, y variantes realizadas en torno a la misma, presenta un comportamiento adecuado, aunque con una tensión umbral de corte relativamente baja (diámetro final entorno a 65 cm) y una viscosidad elevada.

Los resultados muestran que el hormigón no logra ser autocompactante, aunque no dejan claro los factores que influyen en ello. Para conocer la influencia del superplastificante, de los finos y de la relación agua/cemento se deciden llevar a cabo ensayos sobre la pasta cementante.

En primer lugar, para conocer la eficacia del superplastificante se realizan ensayos del cono de Marsh con la dosificación de la Tabla 4.6, obteniendo los resultados reflejados en la gráfica de la Figura 4.6.



**Figura 4.6 - Resultados del ensayo del cono de Marsh**

Los ensayos realizados mediante el cono de Marsh, permiten obtener el punto de saturación, que indica el contenido de superplastificante (sp) por encima del cual la fluidez deja de aumentar de manera significativa (Agulló, 1999). Este punto, de contenido óptimo de superplastificantes, puede ser definido por el ángulo de  $140 \pm 10^\circ$  que forma la representación gráfica de la relación sp/c (%) con el tiempo de flujo en log(s) (Aïtchim et Ak, 1994; Gettu et Al, 1997; Gomes, 2003).

Los resultados obtenidos muestran que los aditivos SY 518 y PL-PF/C-1B/4 no mejoran de manera significativa la fluidez de la mezcla, y están saturados para contenidos de superplastificante muy bajos (por debajo del 1,4 %). Por otra parte, el aditivo C303 SCC, muestra claramente un punto de saturación, cuando se alcanza un contenido de superplastificante superior a 1,63 % del contenido de cemento, para la relación finos/cemento (f/c) igual a 0,30.

Esto es concordante con el aspecto de los hormigones fabricados en los ensayos previos, donde se observó que, contenidos de superplastificante superiores al 1,50% de cemento no incrementaban el diámetro final de la torta para relaciones f/c entre 0,3 y 0,4. No obstante, para extrapolar los datos obtenidos, se deberían repetir los ensayos para diferentes relaciones f/c, y ajustar más la cantidad óptima de sp, pues los datos registrados hasta el momento apuntan a un contenido de saturación algo más bajo.

Posteriormente se ensayó un nuevo aditivo, resultado de la modificación del C303, con el objetivo de disminuir el contenido de finos que hay que adicionar al HAC facilitando así su producción.

El ensayo empleado para validar la eficiencia fue el mini-cono de Kantro, procedimiento recomendado por Ouchi (1996) y por Okamura (1997), aunque éstos lo emplean combinado con el mini embudo. Se recomienda emplear en próximas ocasiones el ensayo del mini cono sugerido por Gomes (2002) para estudiar las propiedades de las pastas destinadas a HAC.

Los resultados obtenidos del ensayo están recogidos en la Tabla 4.7, y aunque no son concluyentes, se observa que a pesar de la mejora en la cohesión la pasta muestra aún segregación e inestabilidad, por lo que se decide encargar a Basf una mejora en el producto.

% Aditivo	a/c	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	$\Gamma_m$
1	0,50	30,0	30,5	1,6
2	0,50	40,0	42,0	5,0
2	0,50	40,5	41,5	2,4

**Tabla 4.7 - Resultados del ensayo de mini-cono**

Tras la campaña preliminar de ensayos se puede observar que:

1. Con los áridos ensayados el aditivo debe contener cohesionante, no observándose mejoras adicionales si se emplea el sp combinado con otros aditivos.
2. Las dosificaciones realizadas que contienen más de 500 kg/m<sup>3</sup> de finos (cemento+filler+adiciones), una relación a/f entre 0,90 y 1,10, y un volumen de arena en el mortero que supera ligeramente el 40%, presenta propiedades autocompactantes, aunque con una viscosidad excesiva, que sin embargo no garantiza la estabilidad de la masa, lo cual puede ser debido a la naturaleza del superplastificante.
3. Las dosificaciones ensayadas han mostrado, que es necesario incorporar una mayor cantidad de arena gruesa, aunque debido al poco fino aportado de manera natural por los áridos, el contenido de ésta se limita a un máximo que ronda el 45 % del contenido de arenas.
4. El ensayo del cono de Kantro (1980) proporciona resultados cualitativos, aunque no cuantitativos a la hora de fijar el contenido de finos.

Para intentar disminuir la tensión umbral de corte, manteniendo una viscosidad elevada que impida la segregación, se decide establecer la dosificación mediante el método de Gomes-Gettu.

#### 4.1.2.4 Resultados experimentales

Conocido el comportamiento de los materiales para fabricar un HAC, se deciden realizar los ensayos del cono de Marsh y de mini-cono, fijando como condiciones de partida:

- a. relación agua/cemento igual a 0,50.
- b. aditivo C303 SCC suministrado por Basf.
- c. dosificación con un contenido de cemento que ronde los 300 kg/m<sup>3</sup> ± 20 kg/m<sup>3</sup>.

En las Tablas 4.8 y 4.9 se recogen los resultados de los ensayos realizados para CEM II / A-S 42,5 N/SR y CEM II / BM (S-V) 42,5 respectivamente.

a/c	f/c	CEM	Sp/c (%)	Diámetro final mini cono (mm)	T <sub>115</sub> mini cono (segundos)
0,50	0,8	1250	1,30 %	139	1,85
		1250	1,40 %	158,00	1,17
		1250	1,50 %	177,00	1,095
	0,9	1250	1,40 %	140	1,955
		1250	1,60 %	170,00	1,6
		1250	1,70 %	185,00	1,4
	1,0	1250	1,30 %	124,5	2,575
		1250	1,40 %	148,00	1,935
		1250	1,50 %	160,00	1,755
		1250	1,60 %	172,50	1,33
		1250	1,70 %	180,00	1,345

Tabla 4.8 - Resumen de resultados para el CEM II / BM (S-V) 42,5 N

a/c	f/c	CEM	Sp/c (%)	Diámetro final mini cono (mm)	T <sub>115</sub> mini cono (segundos)
<b>0,50</b>	0,15	1250	1,10 %	222,2	1
		1250	1,20 %	230,00	0,4
		1250	1,30 %	221,00	0,35
	0,3	1250	1,10 %	210	0,54
		1250	1,20 %	212,50	0,7
		1250	1,30 %	220,00	0,4
	0,6	1250	1,10 %	162,5	0,6
		1250	1,20 %	194,00	0,2
		1250	1,30 %	208,00	0,26
	1	1250	1,10 %	132,5	1,74
		1250	1,20 %	157,50	1,23
		1250	1,30 %	178,00	0,8
	1,2	1250	1,30 %	163,5	0,95
		1250	1,40 %	177,50	1,315
		1250	1,50 %	187,50	1,485
	1,3	1250	1,40 %	157,5	2,435
		1250	1,50 %	167,00	1,74
		1250	1,60 %	180,00	1,365
	1,4	1250	1,40 %	155	2,88
		1250	1,50 %	178,50	1,61
		1250	1,60 %	180,00	1,61
	1,5	1250	1,50 %	142,00	2,44
		1250	1,70 %	163,00	2,085

**Tabla 4.9 - Resumen de resultados para el CEM II / A-S 42,5 N/SR**

Los resultados de los ensayos de máxima compacidad han sido los expuestos en la Tabla 4.10.

<b>Muestra</b>	<b>A<sub>fino</sub> +A<sub>grueso</sub></b>	<b>P<sub>TOTAL</sub> (g)</b>
1	65%+35%	10604
2	60%+40%	10727
3	55%+45%	10686
4	50%+50%	10640
5	45%+55%	10636
6	40%+60%	10599
7	35%+65%	10444
8	30%+70%	10326

**Tabla 4.10 - Resultados de los ensayos de compacidad**

Por último, indicar que también se han realizado ensayos de saturación del cono de Marsh obteniendo los siguientes resultados:

a/c	f/c	CEM	Sp/c (%)	Tiempo cono de Marsh (segundos)
0,50	0,0	1250	1,00	4,29
		1250	1,20	5,07
		1250	1,40	4,45
	0,8	1250	1,20	26,11
		1250	1,30	21,73
		1250	1,48	21,30
		1250	1,60	19,75
		1250	2,00	18,09
	0,9	1250	1,30	47,09
		1250	1,50	40,57
		1250	1,70	35,89
		1250	2,00	31,44

**Tabla 4.11 - Resultados del ensayo del cono de Marsh para CEM II / BM (S-V) 42,5 N**

#### 4.1.2.5 *Discusión de resultados*

##### A) Pasta cementante

Si se analizan los resultados expuestos en las Tablas 4.8 y 4.9 puede observarse, que a medida que se incrementa la relación finos/cemento el diámetro final tiende a disminuir, es decir disminuye la tensión umbral de corte, lo que es indicativo de una menor fluidez (Figura 4.7). Igualmente se aprecia (Figura 4.8) que a medida que se incrementa la relación f/c el tiempo que tarda la torta en alcanzar un diámetro de 115 mm es mayor. Es decir, a mayor contenido en finos mayor viscosidad.

En cualquier caso, un incremento en el contenido de superplastificante, produce un mayor diámetro final, es decir, se produce un aumento de la tensión umbral de corte. Se observa que este aumento se modifica para cada relación finos/cemento. Del mismo modo, se observa que a medida que se incrementa el contenido de superplastificantes el  $T_{115}$  es menor, aunque su disminución es menos significativa que en el caso anterior. Esto se debe a que son los finos los que controlan principalmente la viscosidad, mientras que la fluidez está controlada por el contenido de superplastificantes. No obstante, hay que señalar que en ambos parámetros influyen de forma significativa la relación agua/cemento y el tipo de cemento.

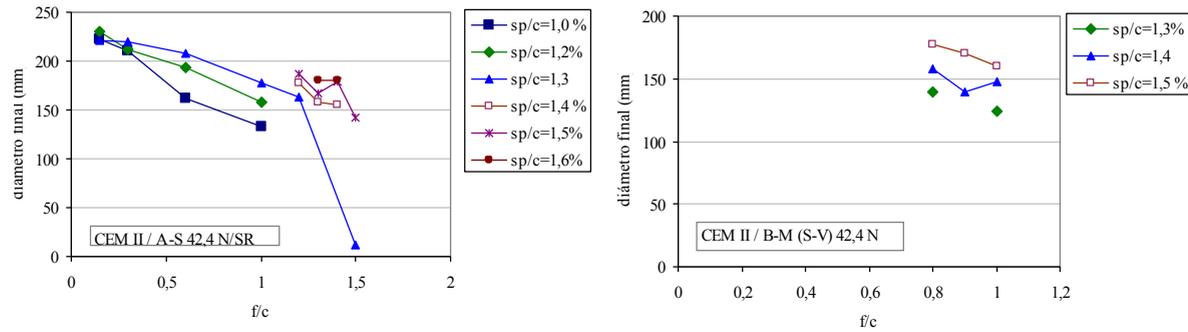


Figura 4.7- Relación diámetro final / ( $f/c$ ) para las pastas ensayadas

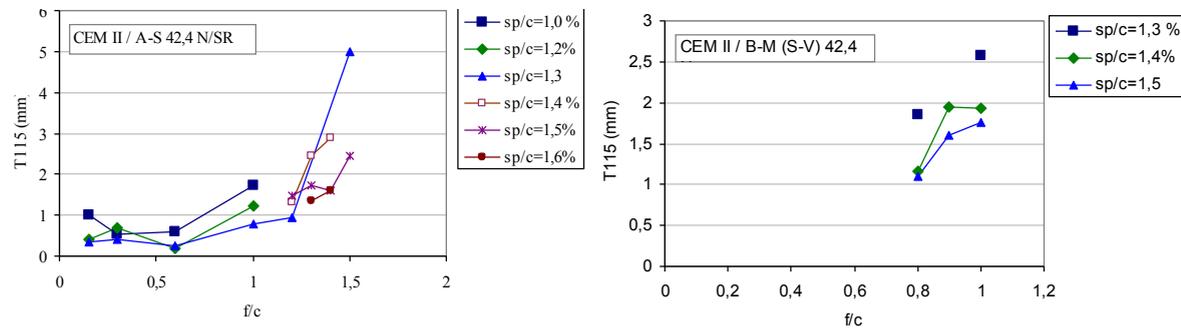


Figura 4.8 - Relación tiempo al alcanzar un diámetro de 115 mm / ( $f/c$ ) para las pastas ensayadas

Con respecto a los márgenes de aceptación, se aprecia que ninguno de los dos cementos ensayados proporciona resultados satisfactorios (Figuras 4.9 y 4.10). Si bien existen valores próximos con los cuales se puede establecer algunas dosificaciones.

Así en para el CEM II / A-S 42,5 N/SR, la relación finos/cemento igual a 1,5 con un contenido de superplastificante del 1,5% alcanza un diámetro final de 163 mm con un T115 de 2,09 segundos. En general se observa que es necesario introducir una elevada cantidad de finos para alcanzar la viscosidad deseada lo que dificulta la obtención de un diámetro final adecuado, pues como se ha comentado, éste depende de la fluidez que se controla en los HAC fundamentalmente mediante el contenido de superplastificantes. Debido a que el superplastificante tiene un punto de saturación muy bajo, su eficacia se ve limitada.

Es decir, con el CEM II / A-S 42,5 N/SR, se debe recurrir a emplear elevados contenidos de finos lo que genera una viscosidad elevada y obliga a disminuir la tensión umbral de corte, quedando como única alternativa un incremento en la relación a/c que no ha sido estudiada en estos ensayos. Otra posibilidad, es emplear cementos con una viscosidad baja, lo que obligaría a disminuir la fluidez (pequeño diámetro final en el ensayo de slump flow). En cualquier caso las posibilidades de cumplir con los parámetros fijados son escasas.

Por otra parte el CEM II / BM (S-V) 42,5 N si bien responde de una manera similar al anterior, parece verse influido en mayor manera por el superplastificante. Esto es posiblemente debido a su menor contenido en clinker, un 63% frente a un 79% el CEM II N/SR. Estudios realizados por Puertas et al. (2002), han mostrado que la eficiencia dispersante de los aditivos basados en policarboxilatos es mayor cuanto menor es el contenido en clinker de éstos, y mayor es la finura Blaine. En cualquier caso, se observa que el aditivo induce modificaciones en las

propiedades reológicas de la pasta de cemento y estas modificaciones están relacionadas con el tipo de cemento.

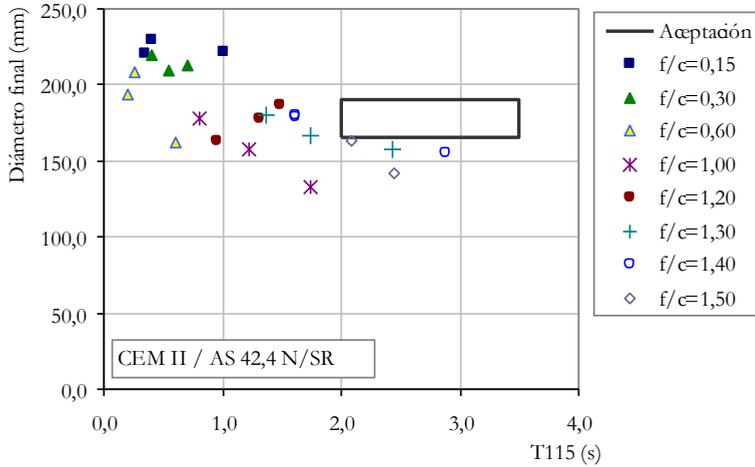


Figura 4.9 - Resultados del ensayo de mini-slump para el CEM II / A-S 42,5 N/SR

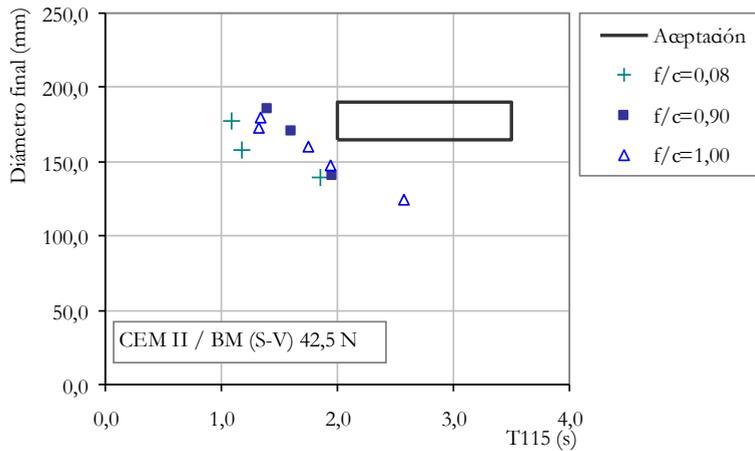
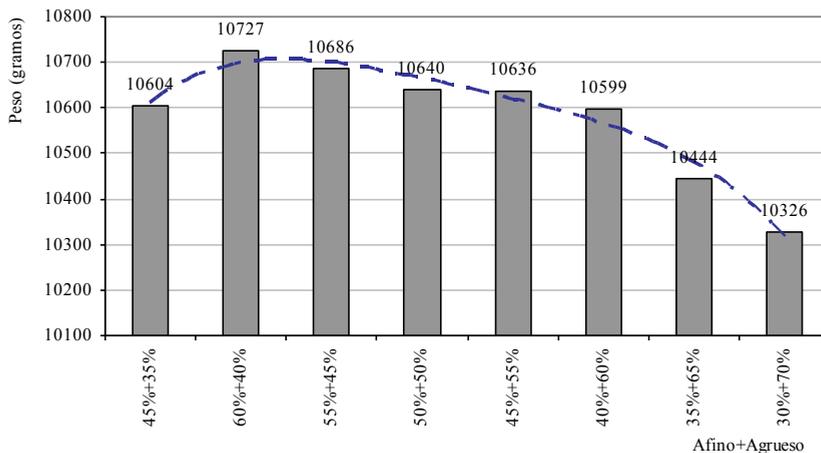


Figura 4.10 - Resultados del ensayo de mini-slump para el CEM II / BM (S-V) 42,5 N

### B) Esqueleto granular

Si se representan gráficamente los resultados expuestos en la Tabla 4.10 se observa (Figura 4.11) que se alcanza un máximo de compacidad para un contenido en áridos finos del 60%. Éste, será el esqueleto granular de mayor compacidad y por tanto el escogido para fijar la dosificación inicial.



**Figura 4.11 - Resultados de los ensayos de compacidad del esqueleto granular**

No obstante, en la gráfica de la Figura 4.11 la tendencia indica que la máxima compacidad se producirá para un contenido de arena de entre el 60% y el 55% del total.

### C) Ensayo del cono de Marsh

Se han realizado ensayos de saturación con CEM II /BM (S-V) 42,5 N que, aunque escasos en número, han permitido observar que el punto de saturación es mucho más elevado que el obtenido para los cementos SR. Este dato pone de manifiesto la importancia del tipo de cemento y tipo de aditivo en el comportamiento en estado fresco del HAC.

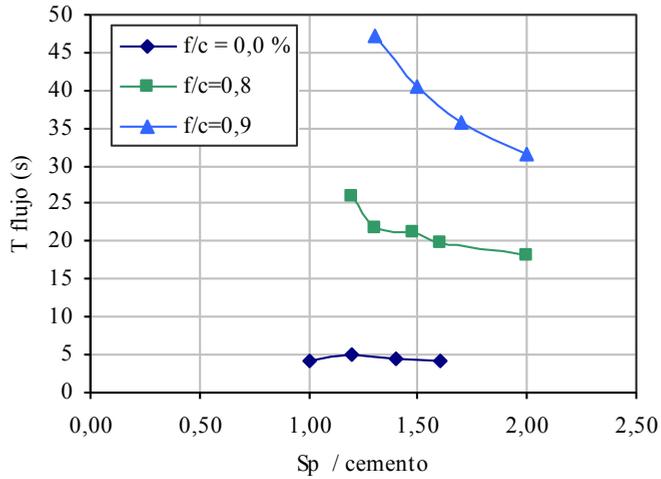


Figura 4.12 - Resultados de los ensayos de saturación

#### 4.1.2.6 Conclusiones de los resultados:

A tenor de los resultados anteriores, se propone ensayar algunas dosificaciones comprobando la posibilidad de generar un HAC a partir de un elevado contenido en finos con el objeto de verificar la precisión del método. Se debe considerar que si la tensión umbral de corte es baja para lograr un HAC, se debe emplear una viscosidad alta (Wallewick, 2003). Esto conduce a valores altos de T50 y diámetro final. Por el contrario, si la viscosidad plástica es baja, (valores de T50 bajos), se deben buscar valores de tensión umbral de corte altos (diámetro final bajo). Lo cual conduce a las siguientes conclusiones:

1. Los aditivos empleados no permiten fluidificar el hormigón con la eficacia deseada cuando se incorpora la cantidad de finos necesaria. Además, la elevada cantidad de finos necesaria para mantener estable a la mezcla hacen deseable el empleo de cohesionantes o bien el empleo de polvo y arenas más finos.
2. Con el cemento ensayado no se puede fabricar un HAC sin incrementar la cohesión de manera significativa, es decir sin aportar finos mediante adiciones hasta alcanzar cantidades cercanas a los 450 kg/m<sup>3</sup> e inferiores a 600 kg/m<sup>3</sup> (Gettu y Agulló).
3. Por otra parte, para mantener la estabilidad de la mezcla y evitar la segregación, se podría incrementar la pasta empleada dosificando en base a 900 litros.
4. Se hace deseable el ensayo con diferentes cementos para observar su comportamiento así como el empleo de diferentes aditivos para observar la evolución de los mismos. Pudiéndose igualmente incrementar el volumen de la pasta o mortero.

5. El proceso de fabricación debe cuidar un tiempo de amasado con el superplastificante de entre 10 y 15 minutos.

### **4.1.3 Dosificaciones ensayadas:**

Ante las dificultades anteriores se decide solicitar ayuda a los fabricantes de aditivos (BASF). Tras enviar muestras de los materiales empleados, los técnicos Francesc Servós y Peré Borradas, llegan a conclusiones similares a las nuestras. Así apuntan que con el tipo de cemento y árido empleado, es necesario:

1. La incorporación de un aditivo cohesionante que permitiera incrementar el superfluidificante.
2. Aportar finos a la mezcla
3. Incrementar el tiempo de amasado.

En base a estas observaciones, sugieren el empleo un polímero de alto peso molecular, que unido a la aportación de un contenido de finos elevado, (cerca de 240 kg/m<sup>3</sup>), permiten incrementar el efecto del superplastificante al tiempo que incrementa la viscosidad de la mezcla lo que permite disminuir la tendencia a la segregación.

Esta propuesta es aceptada por el equipo investigador y se realizan exitosamente las siguientes dosificaciones:

Tipo de hormigón		Hormigón Autocompactante			
Cantera		Fortuna			
Dosificaciones		A SR 0,60F	A SR 0,50F	A-BM 0,60F	A-BM 0,50F
Agua/cemento		0,60	0,50	0,60	0,50
Materiales kg/m <sup>3</sup>	Cemento	300	300	300	300
	Agua	180,90	150	180,90	150
	Grava (4-12)	557	557	557	557
	Arena Fina (0/2)	390	389,9	390	389,9
	Arena Gruesa (0/4)	764	768,5	764	768,5
	Finos	238	238	238	234,4
Aditivos kg/m <sup>3</sup>	Aditivo Sp	3,0 %	4,0 %	3,0 %	4,7 %
	Cohesionante	1,3 %	1,3 %	1,3 %	1,0 %
Tipo de cemento		SR	SR	BM	BM

**Tabla 4.12.1 - Dosificaciones realizadas con éxito cantera de Fortuna**

Tipo de hormigón		Hormigón Autocompactante			
Cantera		Santa Cruz			
Dosificaciones		A SR 0,60SC	A SR 0,50SC	A-BM 0,60SC	A-BM 0,50SC
Agua/cemento		0,60	0,50	0,60	0,50
Materiales kg/m <sup>3</sup>	Cemento	300	330	300	330
	Agua	181,50	168,3	181,50	168,3
	Grava (4-12)	682,03	685,36	682,03	685,36
	Arena Fina (0/2)	443,32	445,48	443,32	445,48
	Arena Gruesa (0/4)	823,31	827,33	823,31	827,33
	Finos	0,0	0,0	0,0	0,0
Aditivos kg/m <sup>3</sup>	Aditivo Sp	3,5 %	3,5 %	3,5 %	3,5 %
	Cohesionante	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Tipo de cemento		SR	SR	SR	BM

Tabla 4.12.2 - Dosificaciones realizadas con éxito cantera de Santa Cruz

Tipo de hormigón		Hormigón Autocompactante			
Cantera		El Pajel			
Dosificaciones		A SR 0,60P	A SR 0,50P	A-BM 0,60P	A-BM 0,50P
Agua/cemento		0,605	0,50	0,605	0,50
Materiales kg/m <sup>3</sup>	Cemento	300	330	300	330
	Agua	181,50	168,3	181,50	168,3
	Grava (4-12)	629,53	650,36	629,53	650,36
	Arena Fina (0/2)	116,91	120,78	116,91	120,78
	Arena Gruesa (0/4)	1052,22	1087,03	1052,22	1087,03
	Finos	150	100	150	100
Aditivos kg/m <sup>3</sup>	Aditivo Sp	6 %	9 %	6 %	9 %
	Cohesionante	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Tipo de cemento		SR	SR	SR	BM

**Tabla 4.12.3 - Dosificaciones realizadas con éxito cantera de El Pajel**

Los resultados de los ensayos de control en estado fresco han sido los siguientes:

Dosificación	Slump flow	
	D <sub>f</sub> (mm)	T <sub>50</sub> (s)
A-SR 0,60F	735	3
A-SR 0,50F	650	6,2
A-BM 0,60F	680	3,14
A-BM 0,50F	720	5,02
A-SR 0,60SC	680	4
A-SR 0,50SC	775	7,4
A-BM 0,60SC	665	4,4
A-BM 0,50SC	760	7,5
A-SR 0,60P	715	5
A-SR 0,50P	680	6,75
A-BM 0,60P	705	2,46
A-BM 0,50P	685	5,06

**Tabla 4.13 - Propiedades del hormigón en estado fresco**

Puede observarse en la Tabla 4.13 que todos los HAC alcanzan un diámetro final en el ensayo de slump-flow superior a 650 mm. El valor de T<sub>50</sub> ronda entre 3 y 6 segundos, valores que se sitúan dentro de los márgenes indicados por la EFNARC para clasificarlos como HAC.



**Figura 4.13 - Imagen de los ensayos de escurrimiento**

En base a estas observaciones se deciden establecer las siguientes actuaciones:

1. Continuar la investigación, dosificación de nuevas canteras en base a los parámetros estudiados, teniendo en consideración los objetivos del proyecto de investigación recogidos en los puntos 1.1 Estudio de la dosificación, 1.2. Estudio del Comportamiento en Estado fresco y 1.3 Estudio de la influencia de los aditivos químicos, se incluyen en esta fase.

2. Establecimiento de la campaña experimental para la dosificación anterior, según los objetivos del punto 2 del proyecto de investigación (estudio de la presión de los encofrados) y el punto 3. Investigación del comportamiento en estado endurecido donde se recogían los siguientes apartados:

Resistencia a compresión

Resistencia a tracción

Durabilidad

3. Establecimiento de una campaña experimental para la realización de los ensayos de resistencia en piezas reales.
4. Realización del estado del arte sobre presión del hormigón en los encofrados.

Debido a este largo proceso de búsqueda de una dosificación patrón óptima, esta fase se ha alargado saliéndose de los plazos establecidos en la planificación inicial. No obstante, los resultados obtenidos con las canteras de Fortuna, Santa Cruz y el Pajel, han sido muy satisfactorios, y serán muy útiles para establecer la dosificación final de la cantera de Relosa, que actualmente se están sometiendo los datos obtenidos a estudio, acelerando de este modo el proceso de desarrollo en las distintas partes de esta fase en lo que a esta cantera se refiere.

## **4.2 FASE 2: ESTUDIO DE LA PRESIÓN EN LOS ENCOFRADOS. (Ago 2006-Nov 2006).**

### **4.2.1 Objetivos de la Fase.**

Hasta ahora la alta cohesión del hormigón daba lugar a empujes sobre los encofrados de valor inferior al hidrostático, sin embargo la alta fluidez del HAC modifica esta situación por lo que es importante conocer cual es la presión real a la que se ven sometidos los encofrados y como evoluciona con el tiempo, permitiendo comparar las tensiones que se generan durante las operaciones de vertido, colocación y vibrado de un HT con las que aparecen al emplear un HAC con el objeto de desarrollar procedimientos de colocación adecuados y modificar si fuese necesario el diseño de los encofrados.

Además esta alta fluidez induce a pensar en un escape de la lechada de cemento de la masa en estado fresco algo que puede evitar la alta cohesión del material empleado. No obstante es un aspecto que debe estudiarse con el objeto de establecer las pertinentes recomendaciones al diseño de cimbras y encofrados.

## 4.2.2 Introducción

Las investigaciones realizadas durante las últimas décadas en el campo del uso e influencias de los aditivos y las adiciones en el hormigón, han dado lugar a la aparición de hormigones con prestaciones específicas, conocidos como hormigones de elevadas prestaciones (HPC<sup>1</sup>).

Uno de los más recientes es, sin duda, el hormigón autocompactante (HAC), definido por Okamura (1997), como aquél que es capaz de fluir por su propio peso en el interior del encofrado, pasando entre las armaduras y a través de secciones estrechas, sin necesidad de compactación y sin presentar segregación<sup>2</sup> o exudación (Okamura, 1997).

Esto facilita la puesta en obra, reduciendo los medios necesarios, y haciendo posible un mejor acabado independientemente de la capacitación de los mismos, generando una mejora en las condiciones de trabajo y medioambientales, al eliminar la necesidad de vibrado.

Además, la posibilidad de emplear adiciones procedentes de subproductos industriales, tales como cenizas volantes, o escorias de alto horno molidas, hace posible la reutilización de recursos. De este modo se reduce el consumo de cemento, lo que rompe la cadena de consumo y contribuye a un desarrollo sostenible.

---

<sup>1</sup> A este tipo de hormigones se les conoce por su denominación anglosajona como *High Performance Concrete (HPC)*.

<sup>2</sup> Entendida ésta como una separación de los materiales (especialmente áridos gruesos y áridos finos) que constituyen el hormigón, de modo que su distribución no sea homogénea (Neville, 1996).

No obstante, la gran fluidez que presenta el hormigón en estado fresco puede modificar la presión que este ejerce sobre los encofrados, siendo quizás necesario modificar la tipología de los mismos.

### 4.2.3 Antecedentes

Los sistemas de encofrado en estructuras de hormigón pueden llegar a representar un porcentaje significativo del coste total, por lo que cualquier rebaja en su costo resulta de especial interés. Así, la reducción o el incremento de la presión lateral que ejercen los hormigones en estado fresco, especialmente los hormigones muy fluidos, como el autocompactante, deben ser estudiados.

En 1951, Rodin recopiló los datos publicados sobre la presión lateral del hormigón sobre los encofrados, encontrando que los factores más influyentes son los siguientes:

- método de consolidación (manual o vibración mecánica),
- temperatura del hormigón,
- tiempo transcurrido desde el hormigonado,
- dosificación empleada,
- consistencia y;
- tamaño y forma del encofrado.

En el mismo estudio Rodin, llegó a la conclusión que los encofrados pueden ser diseñados, considerando que el hormigón introduce una presión lateral igual a la hidrostática, es decir, como si se tratase de un fluido con una densidad igual a la del hormigón. Rodin propuso la expresión 1 para calcular la presión que se produce si el vibrado es manual y la expresión 2 si es mediante vibrador.

$$P_{\max} = 23,4 H_{\max} \quad (1)$$

$$P_{\max} = 17,2 H_{\max} \quad (2)$$

donde:

$P_{\max}$  máxima presión lateral (kPa)

$H_{\max}$  máxima altura del encofrado hormigonado (m), calculada a partir de la velocidad de puesta en obra  $R$  (m/h), calculada a partir de la expresión siguiente:

$$H_{\max} = 1,63 R^{1/3} \quad (3)$$

Más tarde, en 1958, el Comité 622 de la ACI propuso que la presión lateral se incrementaba con la profundidad hasta un valor límite ( $23,5H_{\max}$ ), que permanece constante hasta la zona inferior del encofrado (ec. 4, 5 y 6).

$$P_{\max} = 7,19 + \frac{785R}{17,78} + T \quad \text{para } R < 2,14 \text{ m/h} \quad (4)$$

$$P_{\max} = 7,19 + \frac{1155R}{17,78 + T} + \frac{244R}{17,78} + T$$

para  $2,14 \text{ m/h} < R < 3,00 \text{ m/h}$  (5)

$$P_{\max} = 23,5H \quad \text{para } R > 3,00 \text{ m/h} \quad (6)$$

En 1962 Ritchie, observó que la presión lateral debida a la vibración mecánica era mucho mayor en las mezclas pobres en cemento que en las ricas, y en 1965 la Asociación de Investigación e Información en la Industria Civil (CIRIA), tras una extensa campaña experimental, propusieron un método de diseño que al igual que el Comité 622 de la

ACI consideraba la presión es hidrostática hasta un valor  $P_{\max}$ , limitado por el menor de los dos siguientes valores: la rigidez del hormigón (ec. 7) y el efecto arco (ec. 8).

$$P_{\max} = 14,37 + 0,094 + 3,14R < 24H \quad (7)$$

$$P_{\max} = \frac{\gamma R t}{1 + c \left( \frac{t}{t_{\max}} \right)^4} + (4,6 - 1,89R) < 24H \quad (8)$$

Además encontraron que en las secciones estrechas el rozamiento con la pared limitaba la máxima presión ejercida, posiblemente debido a la forma y el tamaño de los encofrados (Ritchie, 1962).

Elwood y Straugham hallaron que la hidratación del cemento, como era de esperar, limita la presión en el encofrado un tiempo después de haber indiciado el hormigonado, observando que los aditivos retardantes del encofrado tienen una influencia limitada en la presión sobre el encofrado.

Olsen, en 1968, encontró que transcurrido poco tiempo desde el hormigonado, la tensión transversal depende principalmente de las fuerzas de cohesión en la pasta de cemento. A medida que transcurre un mayor tiempo, la pasta de cemento pierde plasticidad y la movilidad de los áridos disminuye, lo que incrementa el ángulo de rozamiento interno.

Gardner y Ho (1979), observaron que un incremento en la consistencia generaba un incremento en la presión lateral. El tamaño de los áridos y la resistencia del hormigón tenían una menor influencia en la presión lateral, mientras, que cualquier movimiento del encofrado

disminuía la presión considerablemente. Así Gardner (1980) concluyó que a mayor dimensión del encofrado, mayor presión lateral, aunque ésta es contenida por la armadura. De este modo, Gardner propuso la expresión siguiente:

$$P_{\max} = 24h_i + \frac{3000HP}{d} + \frac{d}{40} + \frac{400\sqrt{R}}{18+T} + \frac{s-75}{10} < 24h \quad (9)$$

Donde:

- P<sub>máx</sub> es la máxima presión lateral (kPa)
- h es la altura total del encofrado (m)
- h<sub>i</sub> es la profundidad a la cual se introduce el vibrador (no menor que 1m).
- d es la dimensión mínima del encofrado (mm)
- HP es la potencia en caballos del vibrador
- R es el ratio de puesta en obra (m/h)
- T es la temperatura del hormigón (°C)
- S es el valor del descenso en el cono de Abrams (mm)

Cuando en el hormigón se emplean adiciones que sustituyen parcialmente al cemento, como cenizas volantes o escoria granulada, la movilidad del hormigón se incrementa. Esto puede dar lugar a un incremento en la presión sobre el encofrado, que modifica la expresión anterior (9), debiéndose emplear entonces la siguiente (Gardner, 1984):

$$P_{\max} = 24h_i + \frac{3000HP}{d} + \frac{d}{40} + \frac{400\sqrt{R}}{18+T} \left( \frac{100}{100-\%F} \right) + \frac{s-75}{10} < 24h \quad (10)$$

F es el porcentaje de cenizas volantes o escoria molida

Gardner también estudió la influencia del empleo de superplastificantes para mejorar la trabajabilidad del hormigón en la presión lateral, llegando a la conclusión de que puede incrementarla.

Por ello, tanto en los hormigones fluidos como en el hormigón autocompactante (HAC), aunque han sido desarrollados para facilitar las operaciones de puesta en obra disminuyendo en el primer caso y eliminando en el segundo la necesidad de compactar, se produce un incremento en la presión lateral con respecto a los hormigones tradicionales (HT). Ello implica que los encofrados diseñados para estos hormigones deban ser diseñados considerando un incremento de la presión igual a la hidrostática, para situarse del lado de la seguridad, pues en estado fresco se comportan como un fluido, pudiéndose entonces calcular la presión máxima como:

$$P_{\max} = \rho g H \quad (11)$$

donde:

- ρ densidad del hormigón
- g aceleración de la gravedad
- H altura de la columna de hormigón

Ahora bien, a pesar de que la elevada fluidez del HAC da lugar a que la presión sobre los encofrados, ésta es similar a la hidrostática hasta una altura de 2,5 metros y menor para alturas mayores (Vanhove et al., 2001). Es decir, aunque la presión sobre los encofrados una vez vertido el material es superior a la de los hormigones tradicionales, experimentalmente se ha medido que la presión de los HAC es hasta un 30% menor que la ejercida durante el vibrado por los hormigones tradicionales, si el hormigonado se realiza por la parte inferior del encofrado, y hasta un 35 %, si se realiza por la parte superior (Asad et al., 2003).

Así, aunque durante los primeros minutos la presión ejercida por los HAC es del orden de hasta un 90% de la hidrostática, posteriormente ésta se reduce rápidamente debido al rápido desarrollo de la cohesión interna (fig. 14). La velocidad con la que disminuye la presión depende de la dosificación y de los componentes empleados. Durante la primera hora esta disminución se produce a un ritmo constante, pudiendo mantenerse niveles relativamente elevados de presión hasta 6 horas después de haber hormigonado, en especial si se emplean retardadores de fraguado.

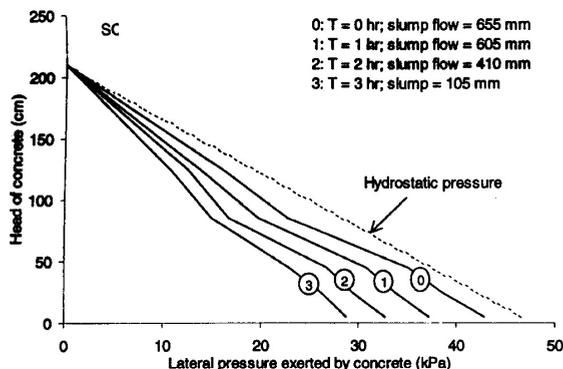


Figura 4.14 - Modificación de la presión en los encofrados con el tiempo Asad et al. (2003)

Este rápido alivio de la presión sobre los encofrados es debido a la tixotropía de los HAC (Billber y Österberg, 2001). Dicha propiedad permite el empleo de encofrados tradicionales, aunque aquéllos de madera contrachapada han mostrado acabados de mayor calidad que los de acero, debido al efecto absorbente (Borralleras, 2004)

La presión lateral que ejercen los HAC en estado fresco se aleja tanto más de la presión hidrostática cuanto menor es la fluidez del hormigón, es decir, a medida que éste pierde sus propiedades autocompactantes. Esto parece deberse a diversos factores como son la fricción interna, el efecto engranamiento de los áridos y, sobre todo, la mayor cohesión interna producida por los enlaces entre los áridos durante el proceso de hidratación de la pasta.

#### 4.2.4 Recopilación Datos Experimentales Otros Autores:

Inicialmente, estaba previsto realizar una medición empírica de la presión de un HAC en un encofrado vertical, teniendo en cuenta, tanto la altura de llenado como el tiempo transcurrido desde su vertido. En lugar de eso, y debido a la falta de medios, se ha optado por realizar una recopilación de los datos ya existentes de diversos autores.

##### 4.2.4.1 *Hormigón tradicional:*

Los datos experimentales han sido obtenidos de las siguientes publicaciones:

- [1.] Jackson (1962)
- [2.] Ritchie (1962a, b)
- [3.] Adam et al. (1965)
- [4.] Ore y Straugham (1968)
- [5.] Gardner y Ho (1979)
- [6.] Gardner y Quereshi (1979)
- [7.] Gardner (1980)
- [8.] Douglas et al. (1981)
- [9.] Gardner (1982)
- [10.] Habgood (1982)
- [11.] Harrison (1982)
- [12.] Harrison (1983c)
- [13.] Douglas et al.(1989)

- [14.] Johnston et al. (1989)
- [15.] Dunston et al. (1994)
- [16.] Arslan (2002)
- [17.] Billberg (2003)
- [18.] Leemann y Hoffmann (2003a)
- [19.] Arslan et al. (2005)
- [20.] O´Janpa III (2005)
- [21.] Assaad y Khayat (2006b)
- [22.] Dhir et al. (2009)

Para cada uno de los datos experimentales se resumen las siguientes variables:

Fuente

Velocidad de llenado "R" (m/hr)

Asiento en el cono de Abrams " $\alpha$ " (mm)

Altura de la pieza a realizar "H" (m)

Temperatura del hormigón "T" (°C)

Dimensión mínima de la sección transversal "d" (cm)

## Composición del cemento “C”

### Grupo A (Gr. A)

formado por los cementos Portland (CEM I) con cualquier aditivo a excepción de retardadores del fraguado, plastificantes o superplastificantes con el objetivo de aumentar la docilidad del hormigón sin modificar el contenido de agua, o sin aditivos.

### Grupo B (Gr. B)

formado por los cementos Portland (CEM I) con retardadores de fraguado, plastificantes o superplastificantes utilizados con el objetivo de aumentar la docilidad del hormigón sin modificar el contenido de agua.

También se encuentran dentro de este grupo los cementos Portland mixtos (CEM II) y los cementos de horno alto (CEM III) con cualquier aditivo a excepción de retardadores del fraguado, plastificantes o superplastificantes con el objetivo de aumentar la docilidad del hormigón sin modificar el contenido de agua, o sin aditivos.

### Grupo C (Gr. C)

formado por los cementos Portland mixtos (CEM II) y los cementos de horno alto (CEM III) con retardadores de fraguado, plastificantes o superplastificantes utilizados con el objetivo de

aumentar la docilidad del hormigón sin modificar el contenido de agua.

También se encuentran dentro de este grupo los cementos puzolánicos (CEM IV) y los cementos compuestos (CEM V) con cualquier aditivo o sin aditivos.

Tamaño de la sección transversal "ST"

Columnas una  $ST > 2m$ , la ortogonal  $ST \leq 2m$

Paredes ambas  $ST \leq 2m$

Máxima presión lateral "Pmax" (kPa)

Los datos que se encuentran entre paréntesis son estimaciones.

Fuente	R (m/hr)	$\alpha$ (mm)	H (m)	T (°C)	d (cm)	C	ST	Pmáx (kPa)
[1.]	0'6	114	2'4	17'8	40'6	Gr. A	Columna	20'9
[1.]	1'1	147	2'4	20'0	40'6	Gr. A	Columna	32'0
[1.]	1'7	127	2'4	17'2	40'6	Gr. A	Columna	43'4
[1.]	2'4	152	3'6	21'1	40'6	Gr. A	Columna	51'2
[1.]	2'7	139	3'6	21'1	40'6	Gr. A	Columna	56'0
[1.]	1'2	127	2'4	16'1	40'6	Gr. A	Columna	37'2
[1.]	1'2	114	2'4	7'8	40'6	Gr. A	Columna	44'9
[1.]	1'8	135	3'6	7'8	40'6	Gr. A	Columna	37'2
[1.]	1'8	127	3'6	4'4	40'6	Gr. A	Columna	20'8
[1.]	1'3	152	2'4	19'4	40'6	Gr. A	Columna	35'7
[1.]	1'8	127	3'6	7'8	40'6	Gr. A	Columna	33'4
[1.]	1'2	127	3'6	13'3	40'6	Gr. A	Columna	29'4
[1.]	1'8	135	3'6	13'3	40'6	Gr. A	Columna	30'6
[1.]	1'8	127	2'4	18'9	40'6	Gr. A	Columna	47'7
[1.]	1'3	127	2'4	28'3	40'6	Gr. A	Columna	28'2
[1.]	1'8	127	2'4	26'1	40'6	Gr. A	Columna	35'4
[1.]	1'3	152	2'4	22'2	40'6	Gr. A	Columna	36'2
[1.]	1'8	122	3'6	23'3	40'6	Gr. A	Columna	44'8
[1.]	2'4	135	3'6	26'1	40'6	Gr. A	Columna	41'3
[1.]	1'8	127	2'4	27'8	40'6	Gr. A	Columna	37'8
[1.]	0'6	127	2'4	27'8	40'6	Gr. A	Columna	15'6
[1.]	2'5	127	3'6	30'0	40'6	Gr. A	Columna	31'6
[2.]	1'2	(100)	2'5	(20'0)	15'2	Gr. A	Columna	22'7
[2.]	3'0	(100)	2'5	(20'0)	15'2	Gr. A	Columna	30'3
[2.]	6'0	(100)	2'5	(20'0)	15'2	Gr. A	Columna	32'4
[2.]	21'0	(100)	2'5	(20'0)	15'2	Gr. A	Columna	35'8
[2.]	3'0	(100)	2'5	(20'0)	15'2	Gr. A	Columna	26'9
[2.]	6'0	(100)	2'5	(20'0)	15'2	Gr. A	Columna	28'9
[2.]	1'2	(100)	2'5	(20'0)	15'2	Gr. A	Columna	28'3
[2.]	3'0	(100)	2'5	(20'0)	15'2	Gr. A	Columna	15'8
[2.]	6'0	(100)	2'5	(20'0)	15'2	Gr. A	Columna	24'1
[2.]	21'0	(100)	2'5	(20'0)	15'2	Gr. A	Columna	32'4
[2.]	3'0	(100)	2'5	(20'0)	15'2	Gr. A	Columna	13'1
[2.]	6'0	(100)	2'5	(20'0)	15'2	Gr. A	Columna	19'3
[3.]	2'0	68	3'0	7'2	28'0	Gr. A	Pared	33'3
[3.]	2'0	72	3'0	7'2	40'0	Gr. A	Pared	32'4
[3.]	1'0	141	3'0	16'4	20'0	Gr. A	Pared	30'4
[3.]	2'5	138	3'0	20'5	15'0	Gr. A	Pared	27'5
[4.]	1'5	76	3'0	20'6	30'0	Gr. A	Columna	35'4
[4.]	1'5	81	3'0	20'6	30'0	Gr. B	Columna	32'3
[4.]	1'5	96	3'0	20'0	30'0	Gr. C	Columna	43'1
[5.]	6'1	50	5'0	16'7	30'5	Gr. A	Columna	34'0
[5.]	45'8	100	5'0	21'1	30'5	Gr. A	Columna	45'5
[5.]	6'1	80	5'0	14'4	30'5	Gr. A	Columna	35'5
[5.]	45'8	80	5'0	12'8	30'5	Gr. A	Columna	44'5
[5.]	6'1	170	5'0	16'7	30'5	Gr. A	Columna	42'2
[5.]	45'8	60	5'0	11'1	30'5	Gr. A	Columna	43'6
[5.]	6'1	80	5'0	22'2	15'3	Gr. A	Columna	27'8
[5.]	6'1	100	5'0	21'7	45'7	Gr. A	Columna	43'6

Fuente	R (m/hr)	$\alpha$ (mm)	H (m)	T (°C)	d (cm)	C	ST	Pmáx (kPa)
[6.]	6'1	65	4'6	21'7	28'0	Gr. A	Columna	35'4
[6.]	6'1	65	4'6	23'3	28'0	Gr. A	Columna	38'3
[6.]	6'1	65	4'6	21'7	28'0	Gr. A	Columna	47'4
[6.]	6'1	65	4'6	25'6	28'0	Gr. A	Columna	34'7
[6.]	6'1	65	4'6	21'7	28'0	Gr. A	Columna	45'0
[6.]	6'1	65	4'6	23'9	28'0	Gr. A	Columna	45'5
[6.]	6'1	75	4'6	22'2	28'0	Gr. A	Columna	46'0
[6.]	6'1	70	4'6	20'0	28'0	Gr. A	Columna	46'7
[6.]	6'1	65	4'6	22'8	28'0	Gr. A	Columna	53'3
[6.]	6'1	75	4'6	18'3	28'0	Gr. A	Columna	62'3
[6.]	6'1	65	4'6	16'7	28'0	Gr. A	Columna	61'1
[6.]	6'1	75	4'6	12'8	28'0	Gr. A	Columna	82'1
[6.]	6'1	65	4'6	8'9	28'0	Gr. A	Columna	66'1
[6.]	6'1	75	4'6	12'2	28'0	Gr. B	Columna	98'2
[6.]	6'1	75	4'6	8'3	28'0	Gr. B	Columna	88'1
[6.]	6'1	60	4'6	18'9	28'0	Gr. A	Columna	47'9
[6.]	6'1	65	4'6	13'9	28'0	Gr. A	Columna	45'2
[7.]	6'1	75	4'6	18'0	28'0	Gr. A	Columna	76'6
[7.]	12'2	80	4'6	21'0	28'0	Gr. A	Columna	83'8
[7.]	6'1	70	4'6	14'0	28'0	Gr. A	Columna	38'4
[7.]	6'1	70	4'6	20'0	28'0	Gr. A	Columna	38'8
[7.]	6'1	75	4'6	19'5	28'0	Gr. A	Columna	77'8
[7.]	6'1	75	4'6	16'5	28'0	Gr. A	Columna	78'3
[7.]	3'0	70	4'6	16'0	28'0	Gr. A	Columna	58'7
[7.]	6'1	50	4'6	8'0	28'0	Gr. A	Columna	62'3
[7.]	5'5	55	4'6	29'0	28'0	Gr. A	Columna	47'2
[7.]	1'5	75	4'6	24'0	28'0	Gr. A	Columna	45'5
[7.]	3'0	80	4'6	22'0	28'0	Gr. A	Columna	58'7
[7.]	12'2	80	4'6	27'0	28'0	Gr. A	Columna	60'4
[7.]	1'5	80	4'6	28'0	28'0	Gr. A	Columna	34'2
[7.]	6'1	225	4'6	27'0	28'0	Gr. B	Columna	65'7
[7.]	12'2	235	4'6	28'0	28'0	Gr. B	Columna	63'9
[7.]	6'1	225	4'6	21'0	28'0	Gr. B	Columna	83'8
[7.]	6'1	190	4'6	27'5	28'0	Gr. A	Columna	75'4
[7.]	6'1	220	4'6	25'0	28'0	Gr. A	Columna	88'1
[7.]	6'1	80	4'6	22'0	28'0	Gr. A	Columna	59'9
[7.]	36'6	100	4'6	19'5	28'0	Gr. A	Columna	92'1
[7.]	6'1	115	4'6	8'0	28'0	Gr. A	Columna	86'2
[7.]	9'1	70	4'6	10'0	28'0	Gr. A	Columna	77'1
[7.]	9'8	90	4'6	10'0	28'0	Gr. A	Columna	82'6
[7.]	3'0	90	4'6	8'0	28'0	Gr. A	Columna	74'1
[7.]	6'1	75	4'6	7'3	28'0	Gr. A	Columna	77'8
[7.]	1'5	85	4'6	7'3	28'0	Gr. A	Columna	61'2
[7.]	6'1	75	4'6	4'5	28'0	Gr. A	Columna	77'8
[7.]	6'1	65	4'6	14'4	28'0	Gr. A	Columna	29'4
[8.]	6'4	102	4'2	22'8	51'0	Gr. A	Pared	76'6
[8.]	4'8	102	6'1	22'8	51'0	Gr. A	Pared	67'0
[8.]	3'9	89	6'1	22'8	51'0	Gr. A	Pared	52'7
[8.]	3'6	51	4'2	23'9	51'0	Gr. A	Pared	57'5

Fuente	R (m/hr)	$\alpha$ (mm)	H (m)	T (°C)	d (cm)	C	ST	Pmáx (kPa)
[8.]	3'9	51	5'5	23'9	51'0	Gr. A	Pared	57'5
[8.]	3'3	51	6'1	23'9	51'0	Gr. A	Pared	57'5
[9.]	6'0	89	4'5	22'2	28'0	Gr. B	Columna	54'6
[9.]	3'0	152	4'5	14'4	28'0	Gr. B	Columna	67'8
[9.]	6'0	76	4'5	17'2	28'0	Gr. B	Columna	71'8
[9.]	1'9	76	4'5	5'0	28'0	Gr. B	Columna	68'9
[9.]	6'0	64	4'5	27'2	28'0	Gr. C	Columna	82'8
[9.]	6'0	64	4'5	23'3	28'0	Gr. C	Columna	85'2
[9.]	6'0	76	4'5	16'1	28'0	Gr. B	Columna	65'1
[9.]	6'0	76	4'5	24'4	28'0	Gr. A	Columna	61'7
[9.]	6'0	84	4'5	18'9	28'0	Gr. A	Columna	81'8
[9.]	6'0	84	4'5	15'0	28'0	Gr. A	Columna	69'9
[9.]	1'9	84	4'5	22'2	28'0	Gr. B	Columna	49'8
[9.]	1'9	76	4'5	7'8	28'0	Gr. B	Columna	59'9
[9.]	6'0	89	4'5	7'8	28'0	Gr. B	Columna	77'1
[9.]	1'9	76	4'5	12'8	28'0	Gr. C	Columna	63'2
[9.]	6'0	84	4'5	11'7	28'0	Gr. C	Columna	68'5
[9.]	1'9	84	4'5	11'1	28'0	Gr. C	Columna	62'7
[9.]	6'0	102	4'5	12'2	28'0	Gr. C	Columna	75'6
[9.]	1'9	114	4'5	2'2	28'0	Gr. C	Columna	79'0
[10.]	2'6	76	4'5	10'0	---	Gr. A	Pared	58'0
[10.]	2'7	66	4'5	15'0	---	Gr. A	Pared	49'0
[10.]	6'9	71	4'5	13'9	---	Gr. A	Pared	72'0
[10.]	2'6	61	4'5	12'8	---	Gr. A	Pared	52'0
[10.]	2'6	41	4'5	13'9	---	Gr. A	Pared	53'0
[10.]	4'2	41	4'5	18'9	---	Gr. A	Pared	42'0
[10.]	3'9	71	4'5	17'8	---	Gr. A	Pared	55'0
[10.]	6'5	76	4'5	21'1	---	Gr. A	Pared	60'0
[10.]	2'6	76	4'5	22'2	---	Gr. A	Pared	55'0
[10.]	3'2	76	4'5	10'0	---	Gr. A	Pared	47'0
[10.]	1'3	76	4'5	17'8	---	Gr. A	Pared	30'0
[10.]	2'2	94	4'5	22'2	---	Gr. A	Pared	38'0
[10.]	1'1	76	4'5	25'0	---	Gr. A	Pared	35'0
[10.]	1'3	76	4'5	12'8	---	Gr. A	Pared	49'0
[10.]	1'3	89	4'5	16'1	---	Gr. A	Pared	40'0
[10.]	0'5	61	4'5	12'8	---	Gr. B	Pared	38'0
[10.]	0'5	61	4'5	12'8	---	Gr. B	Pared	30'0
[10.]	0'6	56	4'5	12'2	---	Gr. B	Pared	37'0
[10.]	0'6	56	4'5	12'2	---	Gr. B	Pared	37'0
[11.]	0'6	25	4'5	10'0	---	Gr. B	Pared	31'0
[11.]	1'0	25	4'5	5'0	---	Gr. B	Pared	40'0
[11.]	1'0	25	4'5	10'0	---	Gr. B	Pared	29'0
[11.]	1'0	25	4'5	16'0	---	Gr. B	Pared	37'0
[11.]	1'2	25	4'5	22'0	---	Gr. B	Pared	35'0
[11.]	0'6	25	4'5	5'0	---	Gr. B	Pared	27'0
[11.]	0'8	25	4'5	10'0	---	Gr. B	Pared	31'0
[11.]	0'8	25	4'5	20'0	---	Gr. B	Pared	32'0
[12.]	0'7	80	4'5	18'0	---	Gr. B	Pared	21'0
[12.]	1'0	100	4'5	10'0	---	Gr. B	Pared	43'0

Fuente	R (m/hr)	$\alpha$ (mm)	H (m)	T (°C)	d (cm)	C	ST	Pmáx (kPa)
[12.]	0'7	100	4'5	10'0	---	Gr. B	Pared	47'0
[12.]	1'3	100	4'5	13'0	---	Gr. B	Pared	55'0
[12.]	1'3	100	4'5	13'0	---	Gr. B	Pared	50'0
[12.]	1'4	100	4'5	20'0	---	Gr. C	Pared	66'0
[12.]	1'4	100	4'5	20'0	---	Gr. C	Pared	57'0
[12.]	1'6	100	4'5	20'0	---	Gr. A	Pared	52'0
[12.]	1'7	100	4'5	13'0	---	Gr. C	Pared	61'0
[13.]	3'0	46	4'8	23'9	30'0	Gr. B	Pared	33'3
[13.]	6'6	160	4'8	23'3	30'0	Gr. B	Pared	63'7
[13.]	14'1	89	4'8	25'6	30'0	Gr. B	Pared	67'5
[13.]	5'7	100	6'0	22'8	30'0	Gr. B	Pared	95'8
[13.]	2'7	100	6'0	24'4	30'0	Gr. B	Pared	71'8
[13.]	3'9	100	6'0	22'8	30'0	Gr. B	Pared	62'2
[13.]	3'3	100	6'0	23'9	30'0	Gr. B	Pared	62'2
[13.]	9'6	100	6'0	27'8	30'0	Gr. B	Pared	102'9
[13.]	5'4	100	6'0	27'8	30'0	Gr. B	Pared	40'7
[13.]	7'2	100	6'0	27'8	30'0	Gr. B	Pared	47'9
[13.]	5'1	145	4'8	24'4	30'0	Gr. C	Pared	52'7
[13.]	13'5	196	4'8	25'0	30'0	Gr. C	Pared	97'4
[13.]	9'6	175	4'8	22'2	30'0	Gr. C	Pared	84'7
[13.]	10'8	132	4'8	18'9	30'0	Gr. C	Pared	44'1
[13.]	9'9	147	4'8	22'8	30'0	Gr. C	Pared	66'1
[14.]	1'0	100	6'1	28'9	15'2	Gr. C	Pared	50'8
[14.]	1'9	112	6'1	21'1	12'2	Gr. C	Pared	42'7
[15.]	3'3	100	8'5	13'5	60'0	Gr. A	Pared	66'6
[15.]	1'6	100	8'1	17'2	60'0	Gr. A	Pared	54'8
[15.]	1'7	100	8'5	17'2	60'0	Gr. A	Pared	60'8
[16.]	1'0	100	2'0	22'0	15'0	Gr. A	Columna	21'9
[16.]	1'0	100	2'0	22'0	15'0	Gr. A	Columna	21'2
[16.]	1'0	100	2'0	22'0	15'0	Gr. A	Columna	26'0
[16.]	1'0	100	2'0	22'0	15'0	Gr. A	Columna	27'0
[16.]	1'0	100	2'0	22'0	15'0	Gr. A	Columna	20'3
[16.]	1'0	100	2'0	22'0	15'0	Gr. A	Columna	18'1
[16.]	1'0	100	2'0	22'0	15'0	Gr. A	Columna	15'6
[17.]	1'5	100	3'0	15'0	30'0	Gr. A	Pared	25'0
[18.]	7'1	(100)	2'7	23'0	20'0	Gr. B	Columna	35'0
[19.]	1'0	100	2'0	22'0	15'0	Gr. A	Columna	23'7
[19.]	1'0	100	2'0	22'0	15'0	Gr. A	Columna	25'1
[19.]	1'0	100	2'0	22'0	15'0	Gr. A	Columna	22'8
[20.]	24'4	216	3'7	16'7	91'0	Gr. B	Columna	73'9
[20.]	1'5	127	3'9	15'6	31'0	Gr. B	Pared	24'8
[20.]	27'4	89	3'0	12'5	20'0	Gr. B	Pared	50'1
[20.]	54'9	216	2'7	16'7	24'0	Gr. B	Pared	50'3
[20.]	14'9	213	3'0	14'0	21'0	Gr. B	Pared	46'7
[20.]	13'0	146	3'3	18'5	24'0	Gr. B	Pared	57'2
[20.]	12'2	152	3'0	20'0	24'0	Gr. B	Pared	51'2
[20.]	33'5	200	3'0	23'3	20'0	Gr. B	Pared	64'7
[20.]	36'6	114	3'0	18'9	22'0	Gr. B	Pared	39'9
[21.]	10'0	220	2'8	21'4	20'0	Gr. A	Columna	44'6

Fuente	R (m/hr)	$\alpha$ (mm)	H (m)	T (°C)	d (cm)	C	ST	Pmáx (kPa)
[21.]	10'0	225	2'8	21'0	20'0	Gr. C	Columna	51'2
[22.]	3'0	100	3'0	12'0	50'0	Gr. B	Columna	58'0
[22.]	3'0	110	3'0	7'0	50'0	Gr. C	Columna	58'0
[22.]	3'0	100	3'0	9'0	50'0	Gr. C	Columna	59'0
[22.]	3'0	120	3'0	10'0	50'0	Gr. B	Columna	52'0
[22.]	3'0	105	3'0	7'5	50'0	Gr. B	Columna	50'5
[22.]	3'0	100	8'0	21'0	50'0	Gr. A	Columna	70'0
[22.]	3'0	110	8'0	22'0	50'0	Gr. B	Columna	79'0
[22.]	3'0	120	8'0	22'0	50'0	Gr. C	Columna	75'0
[22.]	3'0	110	8'0	20'0	50'0	Gr. B	Columna	48'0
[22.]	3'0	100	8'0	19'5	50'0	Gr. B	Columna	57'0
[22.]	3'0	100	8'0	23'5	50'0	Gr. A	Columna	55'0
[22.]	3'0	200	8'0	20'5	50'0	Gr. A	Columna	74'0
[22.]	80'0	100	8'0	23'5	50'0	Gr. B	Columna	134'0
[22.]	80'0	200	8'0	20'5	50'0	Gr. B	Columna	137'0
[22.]	80'0	90	8'0	24'5	50'0	Gr. B	Columna	118'0
[22.]	80'0	170	8'0	20'5	50'0	Gr. B	Columna	134'0
[22.]	3'0	110	8'0	21'0	50'0	Gr. B	Pared	60'0
[22.]	3'0	200	8'0	20'5	50'0	Gr. A	Pared	64'0

**Tabla 4.14 – Recopilación para Hormigón Tradicional**

#### 4.2.4.2 *Hormigón Autocompactante:*

Los datos experimentales han sido obtenidos de las siguientes publicaciones:

- [1] Billberg (2003)
- [2] Khayat et al. (2005)
- [3] Assaad y Khayat (2005)
- [4] Assaad y Khayat (2006a)
- [5] Assaad y Khayat (2006b)
- [6] Khayat y Assaad (2006)
- [7] Omran (2009)

Para cada uno de los datos experimentales se establecen las mismas características que en el punto 4.2.4.1 a excepción del asiento en el cono de Abrams.

Fuente	R (m/hr)	H (m)	T (°C)	d (cm)	C	ST	Pmáx (kPa)
[1]	1'4	3'0	15'0	30	Gr. B	Pared	31'0
[1]	1'3	3'0	15'0	30	Gr. B	Pared	28'0
[1]	1'5	3'0	15'0	30	Gr. B	Pared	45'0
[1]	2'2	3'0	15'0	30	Gr. B	Pared	46'0
[1]	2'3	3'0	15'0	30	Gr. B	Pared	50'0
[2]	10'0	2'1	20'0	20	Gr. C	Columna	45'1
[2]	25'0	2'1	20'0	20	Gr. C	Columna	45'6
[2]	10'0	3'6	20'0	92	Gr. C	Columna	79'7
[3]	10'0	2'8	21'6	20	Gr. C	Columna	53'6
[3]	10'0	2'8	21'4	20	Gr. C	Columna	52'4
[3]	10'0	2'8	20'4	20	Gr. C	Columna	49'9
[3]	10'0	2'8	22'3	20	Gr. C	Columna	49'6
[3]	10'0	2'8	21'2	20	Gr. C	Columna	52'7
[3]	10'0	2'8	21'7	20	Gr. C	Columna	55'9
[3]	10'0	2'8	20'5	20	Gr. C	Columna	55'5
[4]	10'0	2'8	10'0	20	Gr. C	Columna	55'7
[4]	10'0	2'8	30'0	20	Gr. C	Columna	54'1
[4]	10'0	2'8	20'0	20	Gr. C	Columna	53'4
[4]	10'0	2'8	20'0	20	Gr. C	Columna	50'7
[4]	5'0	2'8	20'0	20	Gr. C	Columna	51'3
[4]	25'0	2'8	20'0	20	Gr. C	Columna	60'9
[5]	10'0	2'8	20'3	20	Gr. B	Columna	49'0
[5]	10'0	2'8	19'8	20	Gr. C	Columna	58'0
[6]	10'0	2'8	19'6	20	Gr. C	Columna	58'7
[6]	10'0	2'8	20'5	20	Gr. C	Columna	56'7
[6]	10'0	2'8	21'1	20	Gr. C	Columna	56'1
[6]	10'0	2'8	21'8	20	Gr. C	Columna	59'6
[6]	10'0	2'8	19'7	20	Gr. C	Columna	58'3
[6]	10'0	2'8	21'9	20	Gr. C	Columna	56'5
[6]	10'0	2'8	20'2	20	Gr. C	Columna	57'9
[6]	10'0	2'8	21'3	20	Gr. C	Columna	59'2
[6]	10'0	2'8	18'9	20	Gr. C	Columna	60'3
[6]	10'0	2'8	20'6	20	Gr. C	Columna	62'2
[7]	10'0	3'0	23'6	20	Gr. C	Columna	50'0
[7]	10'0	3'0	23'1	20	Gr. C	Columna	53'0
[7]	10'0	3'0	24'4	20	Gr. C	Columna	52'0

**Tabla 4.15 – Recopilación para Hormigón Autocompactante**

### **4.2.5 Conclusiones:**

Como se puede apreciar en los resultados de las Tablas 4.14 y 4.15, la presión lateral en el encofrado es superior en un HAC con respecto a un HT.

Aunque las tablas en cuestión arrojen datos esperados de antemano, se observa que la presión lateral difiere de la hidrostática. Por se debe seguir investigando en la línea prevista inicialmente y poder realizar un modelo empírico que permita calcular la presión ejercida por un HAC en un encofrado.

### **4.3 FASE 3: INVESTIGACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN ESTADO ENDURECIDO. (Dic 2006-Jul 2007).**

El inicio de esta fase estaba previsto para Diciembre de 2006, sin embargo, se han estado llevando a cabo ensayos de probetas endurecidas, solapándose esta fase con la fase 1. El fin de estos ensayos es determinar el comportamiento del HAC en este estado, determinando así, si son correctas o no las dosificaciones ensayadas.

A continuación se detallan los objetivos de esta fase, así como los ensayos realizados y los que están previstos realizarse.

#### **4.3.1 Objetivos de la Fase.**

Conocidas las dosificaciones y comportamiento en estado fresco del HAC se ha hecho necesario realizar un estudio de las propiedades en estado endurecido con el objeto de compararlas con las establecidas por los diversos códigos y autores para el hormigón tradicional y conocer así si es necesario establecer algunas exigencias o requisitos para su empleo. Las principales propiedades mecánicas a estudiar son:

1. Resistencia a compresión.
2. Curva tensión-deformación
3. Resistencia a tracción
4. Deformabilidad instantánea y diferida
5. Influencia de factores medioambientales y del proceso de ejecución

6. Propiedades adherentes
7. Durabilidad
8. Comportamiento térmico y resistencia al fuego
9. Características de acabado
10. Estudio de los estados límites últimos especialmente a esfuerzo cortante.
11. Estudio de los estados límites últimos de servicio.

El objeto de este estudio empírico, es la comparación entre las propiedades del HAC más relevantes para poder realizar una comparativa útil con el hormigón tradicional.

### 4.3.2 Campaña de ensayos

Se propone ensayar las propiedades establecidas en los apartados anteriores, de modo que las propiedades de ensayo y la edad se reseñan en la Tabla 4.1. En la Tabla 4.16 se establecen los ensayos a realizar.

Propiedad ensayada	Edad de los ensayos	
Resistencia a compresión	7d	28d
Resistencia a tracción	7d	28d

Tabla 4.16 - Campaña de ensayos



Figura 4.15 - Imagen de la amasadora empleada

Con estos ensayos las variables a estudiar pueden enunciarse de manera siguiente:

1. Influencia de los aditivos
  - Influencia del superplastificante
  - Influencia del cohesionante
2. Influencia del tipo de cemento
3. Influencia de la relación agua/cemento
4. Influencia del contenido de finos

### **4.3.3 RESULTADOS**

#### **4.3.3.1 *Materiales***

Se han fabricado cuatro tipos de hormigón: dos autocompactantes y dos hormigones tradicionales vibrados que actúan como hormigones de referencia. Para cada tipo de hormigón se han realizado 2 dosificaciones iniciales, empleando para ello dos relaciones agua/cemento (0,60 y 0,50) y dos clases de cemento Portland, con el objeto de estudiar los cementos más empleados en estructuras de edificación en la Región de Murcia (Tabla 4.15).

Los materiales empleados en este estudio han sido los cementos indicados en las Tablas 4.2, 4.3 y 4.4. Ambos han sido fabricados y ensayados según la normativa UNE-EN 197-1. Se utilizaron áridos de machaqueo calizos (limestone-crushed aggregates), empleándose dos tipos de arenas, una fina 0/2 y otra gruesa 0/4, y una grava 6/12.



Figura 4.16 - Imagen del laboratorio

Designación		A-SR 0,60	V-SR 0,60	A-BM	V-BM
agua/cemento		0,60	0,60	0,60	0,60
Materiales (kg/m <sup>3</sup> )	Cemento	300	300	300	300
	Agua	181	181	181	181
	Grava(6/12)	557	557	557	557
	Arena gruesa (0/4)	764	764	764	764
	Arena Fina(0/2)	390	390	390	390
	Filler	238	238	238	238
Aditivo químico ( % de Cemento)	C 303 SCC	3 %	--	3 %	4,7 %
	Rheomix 820 MA	1,3 %	--	1,3 %	1,0 %
	Complast MR286	--	0,5 %	--	0,5 %
Tipo de cemento		II/AS 42,5 /SR	II/AS 42,5 /SR	II/BM(SV) 42,5	II/BM(SV) 42,5

Tabla 4.17 - Dosificaciones iniciales a ensayar

#### 4.3.3.2 *Dosificaciones*

Se han realizado las amasadas correspondientes a las dosificaciones obtenidas con la Cantera de Santa Cruz (Tabla 4.12.2). De cada amasada se han rellenado 13 probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura para cada amasada. A la vista del comportamiento en estado fresco de los hormigones vibrados tradicionales<sup>3</sup>, (aquéllos etiquetados como V), se ha decidido repetir<sup>4</sup> la amasada V-SR sustituyendo los finos y el árido 0/2 por árido 0/4. De forma coherente, se decide realizar una amasada adicional de hormigón V-BM, siguiendo este criterio (Tablas All 3 y All 4).

En las amasadas de hormigón tradicional vibrado se emplea la cantidad de plastificante para obtener un asiento en el ensayo de cono de Abrams no inferior a 6 centímetros, siguiendo la recomendación establecida en el art. 30.6 de la EHE<sup>5</sup>.

#### 4.3.3.3 *Probetas, preparación y métodos de ensayo*

Las amasadas de HAC son vertidas al molde sin ningún tipo de compactación, mientras que en las de HT se aplica una compactación mediante picado. Tras el vertido, se procede al sellado de la probeta, y se conserva a temperatura ambiente durante 24 horas (18 a 22 °C).

---

<sup>3</sup> El alto contenido de finos daba lugar a una importante demanda de agua para la trabajabilidad requerida.

<sup>4</sup> Se decide ensayar la amasada ya realizada de hormigón V-SR de modo que podamos estudiar la influencia de los finos.

<sup>5</sup> El artículo 30.6 de EHE 98 indicaba que en el caso de hormigones para edificación, el asiento en el cono de Abrams no será inferior a 6cm.

Finalmente, se procede al traslado de las probetas a las cámaras de curado, donde permanecen a una temperatura de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  y una humedad superior al 95 % hasta el momento de realizar los ensayos.

Para obtener la resistencia a compresión se siguen las especificaciones de las normas españolas UNE 83304:84 concordantes con los criterios expresados por la Norma Internacional ISO 4012. La resistencia a tracción se obtiene mediante el ensayo de tracción indirecta, según la norma española UNE 83306:85, concordante con la Norma Internacional ISO 4108. El ensayo de resistencia a la penetración de agua se realiza siguiendo la norma española UNE 83309.

#### 4.3.3.4 Resultados experimentales

Los ensayos realizados sobre las probetas han sido dos: resistencia a compresión y resistencia a tracción. Los resultados de los ensayos se recogen en la Tabla 4.18, en donde se evaluó el comportamiento de las probetas ante estos ensayos.

Amasada	Resistencia a compresión (MPa)		Resistencia a tracción (MPa)	
	7 días	28 días	7 días	28 días
<b>A SR 0,6</b>	33,13	41,23	3,21	3,50
<b>A SR 0,5</b>	39,40	46,03	3,36	4,18
<b>A BM 0,6</b>	28,41	38,12	2,91	3,78
<b>A BM 0,5</b>	42,45	52,91	3,49	3,97
<b>V SR 0,6</b>	27,72	33,52	2,55	2,96
<b>V SR 0,5</b>	33,19	39,54	2,89	3,45
<b>V BM 0,6</b>	30,22	42,06	2,25	2,72
<b>V BM 0,5</b>	33,66	48,11	2,91	3,63

Tabla 4.18 - Resistencia a compresión y tracción.

Dado el limitado número de resultados analizados hasta la fecha, el análisis de los mismos no permite extraer conclusiones generales. No obstante, la opinión de la mayor parte de los miembros del proyecto de investigación, es ir realizando este análisis de manera progresiva con el objeto de poder enfocar la investigación.

#### A) Resistencia a compresión

Los resultados observados indican, como era de esperar, que la resistencia alcanzada a los 7 días es mayor en los hormigones fabricados con cemento SR que en los fabricados con cemento BM. Esta tendencia se muestra tanto en HAC como en HT.

Por otra parte indicar que la resistencia a compresión alcanzada a la edad de 7 días es similar en HAC y HT, con unas diferencias inferiores al 10% en la mayoría de los casos analizados.

Con respecto a la resistencia adquirida por HAC y HT, los resultados muestran, que para la misma relación agua/cemento, contenido y tipo de cemento, el HAC tiende a alcanzar una mayor resistencia a compresión en todas las edades ensayadas. Esta diferencia resistente entre HAC y HT tiende a ser menor cuando se emplea cemento BM. No obstante hay que indicar que las diferencias encontradas tienden a ser significativamente superiores a las referencias en la mayor parte de la bibliografía técnica disponible.

No obstante, hay que resaltar que las dosificaciones de HAC poseen un elevado contenido en finos, en aditivos y se ha empleado un bajo volumen en áridos gruesos. Contenidos que también se alejan de la mayor parte de las dosificaciones referenciadas en la bibliografía técnica.

## B) Resistencia a tracción

Con respecto a la resistencia a tracción, los resultados muestran que para la relación a/c igual a 0,6 las mezclas tienden a alcanzar una mayor resistencia. Esta tendencia se invierte al emplear una relación a/c igual a 0,5. Sin embargo, las diferencias registradas entre amasadas son pequeñas (inferiores al 10%) y por tanto no significativas.

En el HAC no hay diferencias en cuanto al tipo de cemento empleado, o éstas son poco significativas. Mientras, los HT fabricados con cemento SR tienden a alcanzar una mayor resistencia a tracción.

En cualquier caso los HAC tienden a alcanzar una mayor resistencia a tracción que el HT, tendiendo a disminuir al reducir la relación agua/cemento o al emplear cemento SR.

## C) Conclusiones de los resultados

Los motivos para estas diferencias pueden ser varios. En cualquier caso, llama la atención en la dosificación finalmente realizada el elevado contenido de aditivos superplastificantes, el empleo de aditivos cohesionantes, y el pequeño contenido de áridos gruesos.

Por ello, se recomienda en la realización de futuros ensayos intentar minimizar el contenido de aditivos así como de finos e incrementar el contenido de áridos gruesos. También a la luz de las diferencias registradas entre HAC y HT, se recomienda, no sólo cuidar el proceso de fabricación, transporte y almacenado de probetas, sino también estudiar la posible decantación de áridos gruesos y la realización de ensayos de durabilidad en ambos hormigones.

#### **4.3.4 Campaña Experimental de Ensayos en Piezas Reales.**

En base a los resultados se propone la siguiente campaña experimental sobre piezas reales. El objeto de este diseño es el acopio y provisión de los materiales y medios necesarios para llevarla a cabo

Se pretende estudiar el comportamiento mecánico del hormigón autocompactante obtenido en elementos estructurales. Dada la dificultad de ensayar modelos a escala real, por la no disponibilidad de medios, hemos diseñado un modelo a escala reducida de vigas, del cual vamos a ensayar elementos con hormigón tradicional y con hormigón autocompactante, con el objetivo de comparar resultados.

Estas vigas son de sección rectangular y con la mínima densidad de armadura posible en cada caso, con el objetivo de garantizar un correcto hormigonado.

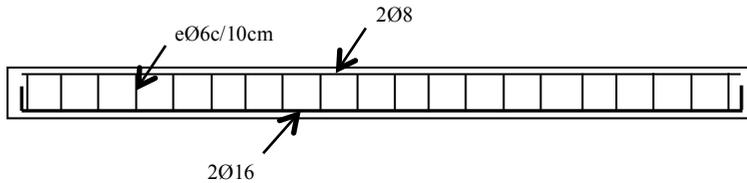
##### **4.3.4.1 Vigas**

Se fabricaron 12 vigas de sección rectangular, 15x20 cm<sup>2</sup> y longitud 2 m. La mitad con hormigón autocompactante y la otra mitad con hormigón tradicional. Para todas las vigas se empleó acero B500S como armadura pasiva. Al no disponer de distintos métodos de ensayo a la hora de aplicar la carga sobre las vigas, se decidió armar las vigas de forma distinta para obtener resultados a los esfuerzos de flexión y cortante, tal y como se muestra en la Figura 4.17, pues sólo se pudo aplicar una carga puntual en el centro de la luz como muestra la Figura 4.19.



Figura 4.17 – Diferente tipo de armado en las vigas.

Vigas tipo A (3 uds). Hormigón autocompactante ( $f_{ck} = 30$  MPa.)



Vigas tipo B (3 uds). Hormigón tradicional. ( $f_{ck} = 30$  MPa.)

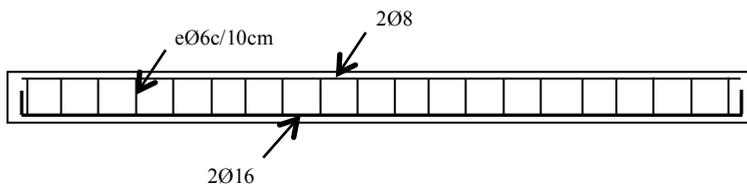
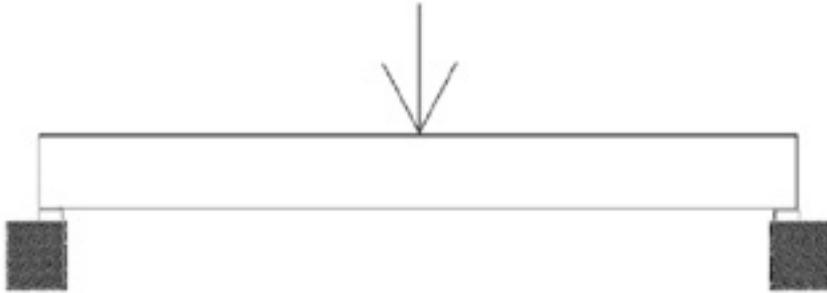


Figura 4.18 – Vigas a ensayar

#### 4.3.4.2 Ensayos

Como se ha comentado anteriormente, no fue posible ejecutar los ensayos de manera diferente y se optó por aplicar una carga puntual en el centro de la luz como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 4.19 – Esquema del ensayo.**

Se hicieron dos subgrupos de Vigas dentro de las distintas dosificaciones. En el primero de ellos, las vigas se armaron para que rompieran a cortante, y en el segundo, se armaron para que rompieran a flexión, variando la longitud de solapo de las armaduras en el centro de las vigas, para observar su influencia en el comportamiento de las éstas. Estos datos se recogen en la Tabla 4.19.

VIGA \ ARMADURA	Cortante	Flexión
	Tipo 1	✓
Tipo 2.1	-	✓ Ls 60cm
Tipo 2.2	-	✓ Ls 45cm
Tipo 2.3	-	✓ Ls 25cm

Tabla 4.19 – Modelos de Vigas a ensayar.

#### 4.3.4.3 Dosificaciones empleadas

La dosificación de HAC empleada fue la A-SR 0,60F descrita en la Tabla 4.12.1, en la que se empleó el Cemento Cem II/A-S 42,5 SR. En la Tabla 4.20 podemos ver la comparativa con el hormigón tradicional, que también se realizó con el mismo cemento.

Cantera		Fortuna	
Tipo de Hormigón		HAC	HT
Agua/cemento		0,60	0,60
Materiales kg/m <sup>3</sup>	Cemento	300	300
	Agua	180,90	180
	Grava (4-12)	557	557
	Arena Fina (0/2)	390	390
	Arena Gruesa (0/4)	764	768
	Finos	238	238
Aditivos kg/m <sup>3</sup>	Aditivo Sp	3,0 %	-
	Cohesionante	1,3 %	-
	Complast MR286	-	150 g

Tabla 4.20 – Dosificaciones utilizadas en las vigas.

#### 4.3.4.4 Resultados de ensayos a Flexión

Los resultados de los ensayos a flexión están recogidos en la Tabla 4.21 y comparados en la Tabla 4.22, mientras que en la Figura 4.20, se pueden observar imágenes de los ensayos.

CARGA		HAC		HT	
		1ª Fisura	Rotura	1ª Fisura	Rotura
VIGA	Tipo 2.1	4100 kg	5300 kg	5000 kg	5400 kg
	Tipo 2.1	4200 kg	6100 kg	4300 kg	4300 kg
	Tipo 2.2	4500 kg	4700 kg	4300 kg	4500 kg
	Tipo 2.3	3500 kg	3500 kg	2900 kg	2900 kg

Tabla 4.21 – Resultados de ensayos a Flexión.

Ls (cm)	Carga media de Rotura	Pérdida de Resistencia (%)	1ª Fisura (% respecto carga de rotura viga)
60	X	-	80
45	0,78 X	22	97
25	0,57 X	43	100

Tabla 4.22 – Comparativa de Resultados de ensayos a Flexión.



Figura 4.20 – Imágenes de los ensayos.

#### 4.3.4.5 Resultados de ensayos a Cortante

Los resultados de los ensayos a flexión están recogidos en la Tabla 4.23.

		HAC		HT	
		1ª Fisura	Rotura	1ª Fisura	Rotura
VIGA	CARGA				
	Tipo 1	8000 kg	8000 kg	7400 kg	7400 kg
	Tipo 1	8500 kg	8500 kg	8000 kg	8000 kg

Tabla 4.23 – Comparativa de Resultados de ensayos a Flexión.

#### 4.3.4.6 Conclusiones

De los resultados se desprende que el comportamiento del HAC es similar al del HT (Hormigón Tradicional).

Así mismo, se observa en la Tabla 4.20 las consecuencias de reducir las longitudes de solape de las armaduras. Si bien es cierto que en la Viga Tipo 2.2 de HAC la carga de primera fisura es mayor que en

las dos Vigas Tipo 2.1 de HAC, también se observa que ésta está muy cerca de la carga de rotura. Del mismo modo, podemos desestimar el resultado, por considerarse un comportamiento de la Viga Tipo 2.1 de HT anormal para la armadura que tenía, ya que la Viga colapsó con la carga de primera fisura.

#### **4.4 FASE 4: ESTABLECIMIENTO DE PROCESOS DE PRODUCCIÓN, TRANSPORTE Y PUESTA EN OBRA.**

Esta fase se pudo desarrollar tras tener la experiencia de cómo se comporta el HAC en diferentes amasadas y en las que se han tenido en cuenta para su valoración todos los parámetros y actuaciones que influyen en la puesta en obra del hormigón, como son:

- Condiciones de transporte:

El transporte del hormigón autocompactante no difiere del hormigón tradicional, pues también se realiza mediante camión hormigonera. Teniendo en cuenta esto, cualquier central hormigonera puede proceder a su fabricación, ya sea por vía seca (amasado en camión hormigonera) o por vía húmeda (amasado con amasadora centralizada).

- Facilidad de puesta en obra:

Con el desarrollo de este proyecto, se dedujo algo que posteriormente se pudo comprobar, que la colocación en obra del hormigón autocompactante resulta más sencilla que la del hormigón tradicional teniendo en cuenta ciertos factores que juegan en su contra:

- No puede cesar el suministro de hormigón, pues de ello depende la buena ejecución de la estructura. Este factor se ve acentuado en el caso de un bombeo, que en caso de cese o fallo de suministro, se corre el riesgo de que el hormigón se compacte en el interior de la máquina.

- Este hormigón es mucho más sensible que el hormigón tradicional a los cambios de los materiales, pues la más mínima variación de los mismos, influiría en sus propiedades de fluidez y de autocompactación. Este factor dificulta mucho la posibilidad de tener una dosificación patrón capaz de ser invariable, si no en su totalidad al menos prácticamente, en el tiempo. Motivo por el cual se recomienda utilizar agentes modificadores de la viscosidad, que permitan mitigar las pequeñas variaciones que se puedan encontrar en el día a día de una central hormigonera, y así disponer de una dosificación más estable.
  - Bien es cierto, que el ahorro en mano de obra es muy elevado en la colocación, pero al coste de necesitar encofrados capaces de soportar una mayor presión, como se ha visto en el punto en cuestión.
  - Por último la necesidad de una mano de obra cualificada, capaz de sensibilizarse con este material, y con el trato que ha de dársele en la obra. Este trato no es otro que el de no adulterar bajo ningún concepto el hormigón en la obra, hecho que sería letal para la estructura.
- Tiempo de trabajo del hormigón:
- Se ha comprobado, que mientras el hormigón se esté amasando, no se ve alterado su comportamiento durante el

transcurso del tiempo. Evidentemente, siempre dentro de unos límites, que podrían establecerse entre una hora y quince minutos, y una hora y media. Este factor depende en gran medida de los aditivos que se utilicen a la hora de realizar la mezcla, pues ellos son los determinantes en establecer el tiempo del que disponemos para colocar el hormigón.

- Influencias climáticas:

No difieren mucho de las que se producen el hormigón tradicional, pues aunque tenga propiedades adicionales, no deja de ser un material análogo al que siempre estamos acostumbrados a utilizar. Es decir, tanto el calor como el frío, al igual que en el hormigón tradicional, pueden derivar en problemas de ejecución, a pesar de que estemos hablando de un hormigón de altas prestaciones.

- Ensayos de caracterización en obra:

Consiste en realizar los ensayos de caracterización de hormigón autocompactante en la propia obra. El problema de estos ensayos, es que son necesarios en la mayoría de los casos dos operarios en lugar de uno, como hemos visto en el capítulo 3 de este proyecto. Además, las condiciones de nivelación del terreno, son mucho más determinantes que en el hormigón tradicional para correcta ejecución de estos ensayos.

## 4.5 CONCLUSIONES FINALES.

El diseño de la mezcla del autocompactante debe confirmar que se logra una gran fluidez sin indicios de segregación o exudación de la mezcla. Es importante tener presente que los aditivos superplastificantes de última generación incrementan su efecto a través de un mezclado eficaz del hormigón, por ello se hace aconsejable efectuar pruebas con los equipos de fabricación que se adoptarán para la ejecución de las obras.

La colocación del hormigón autocompactante debe estar asociada a un proceso continuo de suministro y vaciado de hormigón, ya que a diferencia de un hormigón tradicional que se compacta por vibrado de inmersión, la calidad de las juntas entre capas de hormigón vaciado depende directamente de la capacidad del autocompactante para mantener su fluidez a lo largo del tiempo, puesto que la unión entre capas sólo puede ser asegurada por la compactación que imprime únicamente el peso propio del material y no podrán ser mitigadas por vibración, como ocurre en un hormigón tradicional.

El uso del hormigón autocompactante implica un cambio de concepto de todos los profesionales involucrados en su utilización, es primordial tener presente que el éxito en la calidad de la terminación de una estructura construida con autocompactante exige asegurar un hormigonado continuo y un adecuado control en terreno de la mezcla para asegurar su fluidez. Para ello, es necesario programar los recursos de transporte y colocación del hormigón para evitar tiempos de espera entre capas superiores a una hora como límite.



# **ANEJO 1**

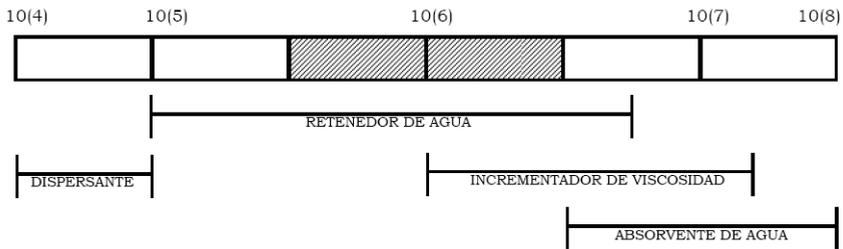
## **Funcionamiento de los Aditivos Cohesionantes**



Con el objetivo de obtener diferentes tipos de reología, con la total estabilidad del sistema y con moderados cambios de la viscosidad se estudia la reología de HAC. Estos efectos se han conseguido vincular a las necesidades de los HAC mediante la combinación de un superfluidificante (BASE PCE) y P.O.E. en una primera etapa y posteriormente con la combinación de diferentes cantidades de Superfluidificante – P.O.E. y N.S.F., diseñándose diferentes combinaciones para obtener la reología y viscosidad adecuada para cada necesidad en función de la consistencia composición granulométrica y relación A/C. El estudio se ha realizado sobre pastas de cemento (grouts) tomando como referencia el BETTOGROUT 50 – morteros autonivelantes utilizando los materiales existentes en una planta de hormigón preparado o de mortero ensilado en seco – y como última aplicación ha sido sobre hormigón autocompactante, utilizando igualmente los materiales existentes en una planta de hormigón preparado, diseñando las composiciones más adecuadas, teniendo en cuenta que los aditivos para hormigón autocompactante serán líquidos y el resto en estado sólido.

## I. 1 INTRODUCCIÓN

La utilización del P.O.E. es conocida fundamentalmente como aditivo “ANTI WASHOUT” para la estabilización de sistemas con base cementicia reduciendo el riesgo de segregación dando homogeneidad a todos los componentes de la masa durante el transporte, colocación y consolidación hasta el momento del endurecimiento. El sistema de actuación del polióxido de etileno combinado con un polímero (P.C.E.) es efectivo controlando la exudación; las moléculas de largas cadenas que el polímero adhiere alrededor de las moléculas de agua, absorben y fijan parte del agua de amasado. Esta retención de agua incrementa la viscosidad en el material con base cementicia. Las moléculas adyacentes de las cadenas del polímero desarrollan unas fuerzas físicas del atracción, bloqueando las migraciones del agua provocando las formaciones de un viscoso gel; este efecto variará en función del peso molecular del P.O.E. pudiéndose obtener diferentes efectos combinados también en función de la dosificación y tipo de cemento.



**Figura Al.1 - Influencia del peso molecular del aditivo en el comportamiento del aditivo**

En los ensayos sobre pasta de cemento hemos utilizado tres tipos de productos y finalmente se ha escogido el P.O.E. con peso molecular de 4.000.000 para obtener los efectos combinados de retención de agua e incrementar moderadamente la viscosidad que conjuntamente con P.C.E. se obtiene alta fluidez con relaciones a/c bajas evitando la exudación, absorbiendo y fijando parte del agua de la mezcla, dando una masa pseudoplástica, facilitando la estabilidad de las partículas sólidas lo cual también facilita el mezclado y el bombeo de mezclas altamente fluidas-líquidas con adecuada resistencia a la segregación-exudación; estas características son utilizables en lechadas de cemento, morteros autonivelantes – grouts – hormigones autonivelantes/autocompactantes, hormigones bajo agua y hormigones proyectados. En la combinación P.O.E. y P.C.E. como superfluidificante reductor de agua también se ha podido observar que debido a la retención de agua (cohesión de la masa) los acabados superficiales de los morteros y hormigones se van mejorando respecto a masas confeccionadas con superfluidificantes convencionales, dando una mejor microestructura aumentando la adherencia de las armaduras.



# **ANEJO 2**

## **Ensayos de Hormigón**

### **Autocompactante 2006**



## II.1 Actividades realizadas en las instalaciones de Holcim Hormigones S.A. en Molina de Segura (Murcia)

### II.1.1 Primera campaña de realización probetas

Realización de 26 probetas cilíndricas ( $\varnothing=15\text{cm}$  y  $h=30\text{cm}$ ) con Cemento SR y árido de la cantera de Fortuna (13 de hormigón autocompactante y 13 de hormigón tradicional).

Materiales		HAC		HV	
		m <sup>3</sup>	Ensayo	m <sup>3</sup>	Ensayo
a/c		0,6	0,6	0,6	0,6
Cemento II/A-S 42,5/SR		300 kg	21,43 kg	300 kg	23,08 kg
Agua		180 kg	12,57 kg	180 kg	13,92 kg
Grava (6-12)		557 kg	39,79 kg	557 kg	42,85 kg
Arena Gruesa (0-4)		769 kg	54,93 kg	768 kg	59,12 kg
Arena Fina (0-2)		390 kg	27,88 kg	390 kg	30 kg
Filler		238 kg	17 kg	238 kg	18,31 kg
Aditivos	C 303 SCC	3400 g (3%)	642,86 g	--	--
	Rheomix 820MA	3900 g (1,3%)	278,57 g	--	--
	Complast MR286	--	--	1949,74 g	150 g

Tabla All. 1 - Dosificaciones realizadas el día 3 de julio de 2006

## **Ensayos en estado fresco:**

### **Hormigón Autocompactante SR-0,6:**

#### **Slump Flow:**

Prueba 1:

Tiempo: 4,9 seg.

Diámetros: 67cm y 72cm en dirección ortogonal.

Diámetro medio: 69,5cm

Prueba 2:

Tiempo: 3,0seg.

Diámetros: 73cm y 74cm en dirección ortogonal.

Diámetro medio: 73,5cm

### **Hormigón Tradicional SR-0,6:**

#### **Cono de Abrams:**

Ensayo de cono de Abrams según EHE, alcanzando un descenso de 20cm (Consistencia Líquida).

## II.1.2 Segunda campaña de realización probetas

Realización de 13 probetas de hormigón autocompactante cilíndricas ( $\varnothing=15\text{cm}$  y  $h=30\text{cm}$ ) con Cemento BM y árido de la cantera de Fortuna.

Materiales		HAC	
		m <sup>3</sup>	Ensayo
a/c		0,6	0,6
Cemento II/BM (SV) 42,5		300 kg	23,08 kg
Agua		180 kg	13,92 kg
Grava (6-12)		557 kg	42,85 kg
Arena Gruesa (0-4)		763,9 kg	58,77 kg
Arena Fina (0-2)		389,9 kg	30 kg
Filler		234,4 kg	18,03 kg
Aditivos	C 303 SCC	8994,8 gr (3%)	692 gr
	Rheomix 820MA	1884,7 gr (0,63%)	145 gr

Tabla All. 2 - Dosificaciones realizadas el día 4 de julio de 2006

### Ensayos en estado fresco:

#### Slump Flow:

Prueba 1:

Tiempo: 3,14 seg.

Diámetros: 67 cm y 69 cm en dirección ortogonal.

Diámetro medio: 68 cm

### II.1.3 Tercera campaña de realización probetas

Realización de 39 probetas cilíndricas ( $\varnothing=15\text{cm}$  y  $h=30\text{cm}$ ) con Cemento SR y árido de la cantera de Fortuna, (13 de hormigón autocompactante y 26 de hormigón tradicional). Se realizan 26 probetas de hormigón tradicional con el objeto de repetir las probetas realizadas el 3/7/2006.

Materiales		HAC		HVr		HVr(*)	
		m <sup>3</sup>	Ensayo	m <sup>3</sup>	Ensayo	m <sup>3</sup>	Ensayo
a/c		0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
Cemento II/AS 42,5/SR		300 kg	23,08 kg	300 kg	23,08 kg	300 kg	23,08 kg
Agua		150 kg	11,54 kg	150 kg	11,54 kg	180 kg	13,92 kg
Grava (6-12)		557 kg	42,85 kg	556,7 kg	42,83 kg	556,7 kg	42,83 kg
Arena Gruesa (0-4)		768,5 kg	59,12 kg	1400,2 kg	107,72 kg	1400,2 kg	107,72 kg
Arena Fina (0-2)		389,9 kg	30 kg	--	--	--	--
Filler		238 kg	18,31 kg	--	--	--	--
Aditivos	C 303 SCC	11998,4 g	923,08 g	--	--	--	--
	Rheomix 820MA	3899,5 g	300,00 g	--	--	--	--
	Complast MR286		--	4900,3 g	377 g	3002,6 g	231 g

(\*) Se han sustituido las cantidades de arena fina (0-2) y la de finos, por arena (0-4).

Tabla AII. 3 - Dosificaciones realizadas el día 10 de julio de 2006

**Ensayos en estado fresco:****Hormigón Autocompactante SR-0,5:****Slump Flow:**

Tiempo: 6,20 seg.

Diámetros: 64 cm y 66 cm en dirección ortogonal.

Diámetro medio: 65 cm

**Hormigón Tradicional SR-0,5:****Cono de Abrams:**

Ensayo de cono de Abrams según EHE, alcanzando un descenso de 6cm (Consistencia Blanda).

**Hormigón Tradicional SR-0,6:****Cono de Abrams:**

Ensayo de cono de Abrams según EHE, alcanzando un descenso de 14cm (Consistencia Fluida).

## II.1.4 Cuarta campaña de realización probetas

Realización de 39 probetas cilíndricas ( $\varnothing=15\text{cm}$  y  $h=30\text{cm}$ ) con Cemento BM y árido de la cantera de Fortuna (13 de hormigón autocompactante y 26 de hormigón tradicional).

Materiales		HAC		HVr		HVr	
		m3	Ensayo	m3	Ensayo	m3	Ensayo
a/c		0,5	0,5	0,55	0,55	0,6	0,6
Cemento II/BM (SV) 42,5		300 kg	23,08 kg	300 kg	23,08 kg	300 kg	23,08 kg
Agua		150 kg	11,54 kg	165,7 kg	12,75 kg	180 kg	13,92 kg
Grava (6-12)		557 kg	42,85 kg	556,7 kg	42,83 kg	557 kg	42,83 kg
Arena Gruesa (0-4)		768,5 kg	59,12 kg	1400,2 kg	107,72 kg	1400,2 kg	107,72 kg
Arena Fina (0-2)		389,9 kg	30 kg	-----	-----	-----	-----
Filler		234,4 kg	18,03 kg	-----	-----	-----	-----
Aditivos	C 303 SCC	14078,2 g	1083,08 g	----	----	----	----
	Rheomix 820MA	3002,6 g	231,0 g	----	----	----	----
	Complast MR286		-----	6002,6 g	461,8 g	3603,1 g	277,2 g

Tabla AII. 4 - Dosificaciones realizadas el día 11 de julio de 2006

**Ensayos en estado fresco:****Hormigón Autocompactante BM-0,5:****Slump Flow:**

Tiempo: 5,02 seg.

Diámetros: 71,5 cm y 72,5 cm en dirección ortogonal.

Diámetro medio: 72 cm

**Hormigón Tradicional BM-0,55:****Cono de Abrams:**

Ensayo de cono de Abrams según EHE, alcanzando un descenso de 5cm (Consistencia Plástica- Blanda).

**Hormigón Tradicional BM-0,6:****Cono de Abrams:**

Ensayo de cono de Abrams según EHE, alcanzando un descenso de 6cm (Consistencia Blanda).

## II.2 Actividades realizadas en el Laboratorio Regional

### II.2.1 Campaña de roturas

10/07/2006				
Probeta	Compresión		Tracción	
	A-SR-Fc	V-SR-Fc	A-SR-Fct	V-SR-Fct
1	32,80	35,96	3,14	3,36
2	33,46	36,74	3,29	2,41

Tabla All. 5 - Rotura a 7 días de las probetas realizadas el día 03/07/2006 (MPa)

11/07/2006		
Probeta	Compresión	Tracción
	A-BM Fc	A-BM-Fct
1	28,75	2,83
2	28,08	3,00

Tabla All. 6 - Rotura a 7 días de las probetas realizadas el día 04/07/2006 (MPa)

17/07/2006						
Probeta	Compresión			Tracción		
	A-SR-Fc-2	V-SR-Fc-2	V-SR-Fc-1	A-SR-Fct-2	V-SR-Fct-2	V-SR-Fct-1
1	38,35	32,24	27,41	3,07	3,00	2,96
2	38,46	32,13	28,02	3,65	2,77	2,14

Tabla All. 7 - Rotura a 7 días de las probetas realizadas el día 10/07/2006 (MPa)

18/07/2006						
Probeta	Compresión			Tracción		
	A-BM-Fc-2	V-BM-Fc-2	V-BM-Fc	A-BM-Fct-2	V-BM-Fct-2	V-BM-Fct
1	41,51	33,35	29,91	3,68	2,73	2,04
2	43,40	33,96	30,52	3,30	3,08	2,46

Tabla All. 8 - Rotura a 7 días de las probetas realizadas el día 11/07/2006 (MPa)

31/07/2006				
Probeta	Compresión		Tracción	
	A-SR-Fc	V-SR-Fc	A-SR-Fct	V-SR-Fct
1	41,62	45,62	3,69	3,77
2	40,84	44,56	3,32	2,90

Tabla AII. 9 - Rotura a 28 días de las probetas realizadas el día 03/07/2006 (MPa)

01/08/2006		
Probeta	Compresión	Tracción
	A-BM-Fc	A-BM-Fct
1	38,12	4,08
2	38,12	3,48

Tabla AII. 10 - Rotura a 28 días de las probetas realizadas el día 04/07/2006 (MPa)

07/08/2006						
Probeta	Compresión			Tracción		
	A-SR-Fc-2	V-SR-Fc-2	V-SR-Fc-1	A-SR-Fct-2	V-SR-Fct-2	V-SR-Fct-1
1	33,69	39,96	33,69	4,23	3,36	3,07
2	33,35	39,12	33,35	4,13	3,54	2,84

Tabla AII. 11 - Rotura a 28 días de las probetas realizadas el día 10/07/2006 (MPa)

08/08/2006						
Probeta	Compresión			Tracción		
	A-BM-Fc-2	V-BM-Fc-2	V-BM-Fc	A-BM-Fct-2	V-BM-Fct-2	V-BM-Fct
1	52,89	47,06	41,79	3,73	3,23	3,34
2	52,94	49,17	42,34	4,20	4,04	2,09

Tabla AII. 12 - Rotura a 28 días de las probetas realizadas el día 11/07/2006 (MPa)

**TABLA RESUMEN DE DOSIFICACIONES**

DESIGNACIÓN	HORMIGÓN <sup>(1)</sup>	CEMENTO <sup>(2)</sup>	a/c <sup>(3)</sup>	% ADITIVO		
				C 303 SCC	Rheomix 820 MA	Complast MR 286
A-SR	HAC	SR	0,6	3,00	1,30	
A-SR-2	HAC	SR	0,5	4,00	1,30	
A-BM	HAC	BM	0,6	3,00	0,63	
A-BM-2	HAC	BM	0,5	4,67	1,00	
V-SR	HV	SR	0,6	0,50		
V-SR-1	HV	SR	0,6			1,00
V-SR-2	HV	SR	0,5			1,60
V-BM	HV	BM	0,6			1,20
V-BM-2	HV	BM	0,55			2,00

- (1) HAC: Hormigón Autocompactante HV: Hormigón Tradicional
- (2) SR: Cemento II/AS 42,5/SR BM: Cemento II/BM (SV) 42,5
- (3) a/c: Relación Agua/Cemento

**Tabla All. 13 – Tabla Resumen de Dosificaciones**

## TABLA RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

DESIGNACIÓN	SLUMP FLOW	
	TIEMPO (seg)	DIÁMETRO (cm)
A-SR	4,90	69,5
	3,00	73,5
A-SR-2	6,20	65,0
A-BM	3,14	68,0
A-BM-2	5,02	72,0
DESIGNACIÓN	CONO DE ABRAMS	
	ASIENTO (cm)	CONSISTENCIA
V-SR	20,0	Líquida
V-SR-1	14,0	Fluida
V-SR-2	6,0	Blanda
V-BM	6,0	Blanda
V-BM-2	5,0	Plástica

**Tabla AII. 14 – Tabla Resumen de Resultados en Estado Fresco**



# **ANEJO 3**

**Referencias**

**Bibliográficas**



- AFGC (2000), *Betons Auto-Plaçants: Recommandations Provisoires*. Association Française de Génie Civil, 63 p.
- Ambroise, J. y Péra, J. (2001), Properties of Self-Levelling Concrete: Influence of a Viscosity Agent and Cement Content. *Proc. Fifth International CANMET/ACI Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, ACI SP 200, Ed. V. M. Malhotra, American Concrete Institute, EE.UU., pp. 367-380.
- Bartos, P.J.M. (2000 a), Key Properties of Fresh Self-compacting Concrete: A Case for Standardisation. *Proc. Seminar on Self-Compacting Concrete*, Malmö/Copenhagen, pp. 21-26.
- Bartos, P.J.M. (2000 b), *Measurement of key properties of self-compacting concrete*. CEN/STAR PNR Workshop, 6 p.  
[http://bativille.cstb.fr/CenStarWS/Measurement\\_key\\_properties.pdf](http://bativille.cstb.fr/CenStarWS/Measurement_key_properties.pdf)
- Bartos, P.J.M. y Grauers, M. (1999), Self-Compacting Concrete. *Concrete*, Vol. 33, nº 4, pp. 9-13.
- Beaupré, D., Lacombe, P. y Khayat, K.H. (1999), Laboratory Investigation of Rheological Properties and Scaling Resistance of Air Entrained Self-Consolidating Concrete. *Mater. Struct.*, Vol. 32, pp. 235-240.
- Billberg, P. (1999), *Self-Compacting Concrete for Civil Engineering Structures -The Swedish Experience*. CBI Report, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Estocolmo, Suecia, 80 p.
- Borralleras, P. (2003), Obras y realizaciones con hormigones autocompactantes. *Jornada Técnica sobre Hormigón Autocompactante: Un Hormigón para el Siglo XXI*,

Documentación Técnica, IECA Levante, Valencia, pp. 55-70.

- Brameshuber, W. y Uebachs, S. (2002), Self-Compacting Concrete - Application in Germany. *Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium on Utilization of High Strength / High Performance Concrete*, Eds. G.König, F.Dehn y T.Faust, Leipzig University, Alemania, Vol. 2, pp. 1503-1514.
- Bury, M.A. y Bühler, E. (2002), Methods and Techniques for Placing Self-Consolidating Concrete – An Overview of Field Experiences in North American Applications. *Proc. First North American Conf. on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete* (Rosemont, Illinois, EE.UU.), Center for Advanced Cement-Based Materials, Evanston, Ill., EE.UU., 7 p.
- Bui, V.K.; Montgomery, D.; Hinczak, I. y Turner, K. (2002), Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, no. 9, pp. 1489-1496.
- Daczko, J.A. (2002), Stability of Self-Consolidating Concrete, Assumed or Ensured? *Proc. First North American Conf. on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete* (Rosemont, Illinois, EE.UU.), Center for Advanced Cement-Based Materials, Evanston, Ill., EE.UU., 7 p.
- Domínguez, J. (2003), Utilización de los aditivos en el hormigón autocompactante.  
*Jornada Técnica sobre Hormigón Autocompactante: Un Hormigón para el Siglo XXI*, Documentación Técnica, IECA Levante, Valencia, pp. 9-14.
- Domone, P.L. y Chai, H.W. (1996), Design Testing of Self-Compacting Concrete. *Production Methods and Workability of Concrete*, Eds. P.J.M.Bartos, D.L.Marrs y D.J.Cleand, E&FN Spon, Londres, pp.

223-252.

EFNARC (2002), *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. EFNARC, Farnham, Reino Unido, 32 p.

Gettu, R., Josa, A., Agulló, L., Gomes, P.C.C. y Izquierdo, J. (2002), Desarrollo de hormigones autocompactantes de alta resistencia con cenizas volantes: Hacia una tecnología del hormigón más sostenible. *Desarrollo sostenible del cemento y del hormigón*, Ed. R. Gettu, CIMNE, Barcelona, pp. 27-42.

Gettu, R., García, T., Bernad, C. y Collie, H. (2003), Utilización del Hormigón Autocompactante en elementos prefabricados. *Cemento-Hormigón*, 14 p.

Gettu, R. y Agulló, L. (2004) Estado del arte del hormigón autocompactante y su caracterización. Parte I. *Cemento-Hormigón*, Nº 861, pp. 36-53.

Gomes, P.C.C., Gettu, R., Agulló, L. y Bernad, C. (2001), Experimental Optimization of High-Strength Self-Compacting Concrete. *Proc. Second International Symposium on Self-Compacting Concrete* (Tokyo), Eds. K.Ozawa and M.Ouchi, COMS Engng. Corp., Kochi, Japón, pp. 377-386.

Gomes, P.C.C. (2002), *Optimization and Characterization of High-Strength Self-Compacting Concrete*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 139 p.

Gomes, P.C.C., Gettu, R., Agulló, L. y Bernad, C. (2002), Diseño de hormigones autocompactantes de alta resistencia - Procedimiento para su dosificación y métodos de caracterización. *Cemento-Hormigón*, nº 832, pp. 30-42.

Groth, P. y Nemegeer, D. (1999), The Use of Steel Fibers in Self-

Compacting Concrete. *Proc. 1<sup>st</sup> Intl. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete*, Eds. A.Skarendahl y Ö.Petersson, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan, Francia, pp. 497-507.

Grünewald, S. and Walraven, J.C. (2001), Self-compacting fiber reinforced concrete. *Heron*, 46 (3), pp. 201-206.

Hamada, D.; Sato, T.; Yamato, F. y Mizunuma, T. (2000), Development of New Superplastizicer and Its Application to Self-Compacting Concrete. *Proc. Sixth*

*Referencias bibliográficas*

*CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete* (Niza, Francia), ACI SP-195, Ed. V.M.Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, EE.UU., pp. 269-290.

Hayakawa, M., Matsuoka, Y. y Shindoh, T. (1993), Development and Application of Super-Workable Concrete. *Special Concretes: Workability and Mixing* (Proc. Intl. RILEM Workshop, Paisley, UK), Ed. P.J.M.Bartos, E&FN Spon, Londres, pp. 183-190.

Hibino, M. (2000), Effect of Viscosity Enhancing Agent on Self-Compactability of Fresh Concrete. *Proc. Sixth CANMET/ACI Intl. Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete* (Niza, Francia), ACI SP-195, Ed. V.M.Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, EE.UU., pp. 305-320.

JSCE-F503 (1990), Method of Test for the Slump Flow of Concrete. *Standards of Japan Society of Civil Engineers*.

Khayat, K.H. y Guizani, Z. (1997), Use of Viscosity-Modifying Admixture to Enhance Stability of Fluid Concrete. *ACI Mater. J.*, Vol. 94, nº 4, pp. 332-340.

- Khayat, K.H. (1999), Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete. *ACI Mater. J.*, Vol. 96, No. 3, pp. 346-353.
- Khayat, K. H., Bickley, J. and Lessard, M. (2000), Performance of Self-compacting concrete for casting basement and foundation walls. *ACI Materials Journal*, May-June 2000, pp. 374-380.
- Kim, J.-K., Han, S.H., Park, Y.D. y Noh, J.H. (1998) Material Properties of Self-Flowing Concrete. *J. Mater. in Civil Engng.*, Vol. 10, nº 4, pp. 244-249.
- Lacombe, P., Beaupré, D. y Pouliot, N. (1997), Rheology and Bonding Characteristics of Self-Levelling Concrete as a Repair Material. *Proc. Fifth CANMET/ACI Intl. Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete* (Roma), Supplementary Papers, pp. 163-184.
- McLeish, A. (1996), Flowable Concrete for Structural Repairs. *Production Methods and Workability of Concrete*, Eds. P.J.M.Bartos, D.L.Marrs y D.J.Cleand, E&FN Spon, Londres, pp. 515-522.
- Nagai, T., Kogima, T., y Miura, T. (1999), Application of High-Strength/Superworkable Concrete to Thin-Wall Prestressed Concrete Products. *Mag. Concr. Res.*, Vol. 51, nº 3, pp. 153-162.
- Nishizaki, T., Kamada, F., Chikamatsu, R. y Kawashima, H. (1999), Application of High-Strength Self-Compacting Concrete to Prestressed Concrete Outer Tank for LNG Storage. *Proc. 1<sup>st</sup> Intl. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete*, Eds. A.Skarendahl y Ö.Petersson, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan, Francia, pp. 629638.
- Okamura, H. (1997), Self-Compacting High-Performance Concrete.

*Concr. Intl.*, Vol. 19, nº 7, pp. 50-54.

Okamura, H. y Ouchi, M. (1999), *Self-Compacting Concrete. Development, Present Use and Future. Proc. 1<sup>st</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*(Stockholm, Sweden), Eds. A. Skarendahl and Ö.Petersson, RILEM Publications S.A.R.L., pp. 3-14.

Okamura, H., Ozawa, K. y Ouchi, M. (2000), *Self-Compacting Concrete. Structural Concrete*, Vol. 1, nº 1, pp. 3-17.

Otsuki, N., Hisada, M., Nagataki, S. y Kamada, T. (1996), An Experimental Study on the Fluidity of Antiwashout Underwater Concrete. *ACI Mater. J.*, Vol. 93, nº 1, pp. 20-25.

Ouchi, M., Ozawa, K. y Okamura, H. (1996), Development of a simple Self-Compactibility Testing Method for Acceptance at Job Site. *Proc. 1<sup>st</sup> International Conference on Concrete Structure*.

Ouchi, M., Hibino, M. y Okamura, H. (1997), Effect of Superplasticizer on Self-Compactability of Fresh Concrete. *Transportation Research Record*, paper 970284, nº 1574, pp. 37-40.

Ouchi, M. (1999), *Self-Compacting Concrete: Development, Applications and Investigations. Nordic Concrete Research*, nº 23, 5 p.  
<http://www.itn.is/ncr/publications/doc-23-3.pdf>

Ouchi, M. (2001), Current Conditions of Self-Compacting Concrete in Japan. *Proc. Second Intl. Symp. on Self Compacting Concrete* (Tokyo), Eds. K.Ozawa y M.Ouchi, COMS Engineering Corp., Kochi, Japón, pp. 63-68.

Ozawa, K., Maekawa, K. y Okamura, H. (1990), High Performance Concrete with High Filling Capacity. *Admixtures for Concrete: Improvement of Properties* (Proc. Intl. RILEM Conf.), Ed. E.

- Vázquez, Chapman and Hall, Londres, pp. 51-63.
- Ozawa, K., Sakata, N. y Okamura, H. (1994), Evaluation of Self Compactability of Fresh Concrete, Using the Funnel Test. *Proc. Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 23, nº 490, pp. 71-80.
- Ozawa K. et al. (1999), Proceedings of the International Workshop on Self-Compacting Concrete, Kochi, Japan, March 1999. Concrete Engineering Series, No. 30, Japan Society of Civil Engineers, March 1999. <http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/scc-net/>
- Pacios, A. (2003) El hormigón autocompactante: Tecnología sostenible en la industria de la construcción del siglo XXI. *Jornada Técnica sobre Hormigón Autocompactante: Un Hormigón para el Siglo XXI*, Documentación Técnica, IECA Levante, Valencia, pp. 27-34.
- Petersson, Ö., Billberg, P. y Van, B.K. (1996), A Model for Self-Compacting Concrete. *Production Methods and Workability of Concrete*, Eds. P.J.M.Bartos, D.L.Marrs y D.J.Cleand, E&FN Spon, Londres, pp. 483-492.
- Puerta, F. (2002), El hormigón autocompactante del arco mixto del puente de la Ronda de la Hispanidad sobre el río Ebro en Zaragoza. *Puentes y Estructuras de Edificación* (Comunicaciones del Congreso ACHE, Madrid), Vol. 1, Asoc. Científica-Técnica de Hormigón Estructural, Madrid, pp. 33-39.
- Rols, S., Ambroise, J. y Péra, J. (1999), Effects of Different Viscosity Agents on the Properties of Self-Levelling Concrete. *Cem. Concr. Res.*, Vol. 29, pp. 261-266.

#### *Referencias bibliográficas*

- Rooney, M.J. y Bartos, P.J.M. (2001), Development of the Settlement Column Segregation Test for Fresh Self-Compacting Concrete

(SCC). *Proc. Second Intl. Symp. on Self Compacting Concrete* (Tokyo), Eds. K.Ozawa y M.Ouchi, COMS Engineering Corp., Kochi, Japón, pp. 109-116.

Rooney, M.J. (2002), *Assessment of the Properties of Fresh Self-Compacting Concrete With Reference to Aggregate Segregation*. Tesis Doctoral, University of Paisley, Scotland, United Kingdom.

Sakata, N., Maruyama, K. y Minami, M. (1996), Basic Properties and Effects of Welan Gum on Self-Consolidating Concrete. *Production Methods and Workability of Concrete*, Eds. P.J.M.Bartos, D.L.Marrs y D.J.Cleand, E&FN Spon, Londres, pp. 237-253.

Sakata, K., Ayano, T. y Takemura, I. (1997), Effect of an Admixture on Properties of Self-Compacting High-Performance Concrete. *Proc. Fifth CANMET/ACI Intl. Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete* (Roma), Supplementary Papers, pp. 297-309.

Schlagbaum, T. (2002), Economic Impact of Self-Consolidating Concrete (SCC) in Ready-Mixed Concrete. *Proc. First North American Conf. on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete* (Rosemont, Illinois, EE.UU.), Center for Advanced Cement-Based Materials, Evanston, Ill., EE.UU., 7 p.

Sedran, T. (1995), Les bétons autonivelants (BAN). Synthèse bibliographique. *Bulletin des Lab. des Ponts et Chaussées*, Vol. 196, pp. 53-60.

Sedran, T., De Larrard, F., Hourst, F. y Contamines, C. (1996), Mix Design of Self-Compacting Concrete. *Production Methods and Workability of Concrete*, Eds. P.J.M.Bartos, D.L.Marrs y D.J.Cleand, E&FN Spon, Londres, pp. 439-450.

- Sedran, T. y De Larrard, F. (1999), Optimization of Self-Compacting Concrete Thanks to Packing Model. *Proc. 1<sup>st</sup> Intl. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete*, Eds. A.Skarendahl y Ö.Petersson, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan, Francia, pp. 321332.
- Seto, K., Okada, K., Yanai, S. y Nobuta, Y. (1997), Development and Applications of Self-Compacting Concrete. *Proc. Intl. Conf. on Engineering Materials* (Ottawa, Canadá), Eds. A.Al-Manaseer, S.Nagataki y R.C.Joshi, CSCE/JSCE, Ottawa/Tokyo, Vol. I, pp. 413-429.
- Santilli, A. (2010), Empuje lateral del hormigón fresco sobre elementos de encofrado vertical: estudio experimental y desarrollo de un modelo empírico. Tesis Doctoral, Universidad de San Sebastián, España, pp 223-232.
- Skarendahl, Å. y Petersson, Ö., Eds. (2000), *Self-Compacting Concrete. State-of-the-Art Report of RILEM TC 174-SCC, Report 23*, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan, Francia, 154 p.
- Skarendahl, Å. (2002), Aceptación en el mercado del hormigón autocompactante. La experiencia sueca. *Cemento-Hormigón*, nº 840, pp. 39-48.
- Soriano, M., Zerbino, R., Giaccio, G., Barragán, B. and Gettu, R. (2003), Development and characterization of steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Proc. Intl. Conf. on Recent Trends in Concrete Technology and Structures*, Eds. D.L. VenkateshBabu, R. Gettu and R. Krishnamoorthy, Kumaraguru College of Technology, Coimbatore, India, pp. 316-322.
- Su, N., Hsu, K.-C. y Chai, H.-W. (2001), A Simple Mix Design Method for Self-Compacting Concrete. *Cem. Concr. Res.*, Vol. 31, pp. 1799-1807.

- Subramanian, S. y Chattopadhyay (2002), Experiments for Mix Proportioning of Self-Compacting Concrete. *Indian Concr. J*, Vol. 76, nº 1, pp. 13-20.
- Takeuchi, H., Higuchi, M. y Nanni, A. (1994), Application of "Flowable" Concrete in a Tunnel Lining. *Concr. Intl.*, Vol. 16, nº 4, pp. 26-29.
- Tanaka, M., Mori, K., Shindoh, T. y Sakamoto, J. (2001), Application of Self-Compacting Concrete to Steel Segments of Multi-Micro Shield Tunnelling Method. *Proc. Second Intl. Symp. on Self Compacting Concrete* (Tokyo), Eds. K.Ozawa y M.Ouchi, COMS Engineering Corp., Kochi, Japón, pp. 615-660.
- Tanigawa, Y., Mori, H. y Wakabayashi, S. (1996), Study on Evaluation of Consistency of High-Fluidity Concrete by Ring Penetration Test and Cylinder Penetration Test. *Japan Cement Association Proc. of Cement & Concrete*, nº 50, pp. 672-677.
- Taniguchi, H., Harada, K. Y Ushijima, S. (1994), Study on Properties of fluidity of Mortar and Concrete for Super Workable Concrete. *Proc. Japan Cement Association*, nº 48, pp. 750-755.
- Tomosawa, F., Masuda, Y., Izumi, I. y Hayakawa, M. (1999), AIJ Recommended Practice for High-Fluidity Concrete for Building Construction. *Proc. 1<sup>st</sup> Intl. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete*, Eds. A.Skarendahl y Ö.Petersson, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan, Francia, pp. 778-786.
- Tviksta, L.-G. (2000), *Guidelines, Report of Task 9: End Product, Rational Production and Improved Working Environment through using Self Compacting Concrete*. Brite EuRam project BRPR-CT96-0366, 48 p., <http://scc.ce.luth.se/>

- Walraven, J. (2001), State of the Art of Self Compacting Concrete in The Netherlands. *Proc. Second Intl. Symp. on Self Compacting Concrete* (Tokyo), Eds. K.Ozawa y M.Ouchi, COMS Engineering Corp., Kochi, Japón, pp. 13-24.
- Yurugi, M., Sakata, N. y Sakai, G. (1995), Viscosity Agent and Mineral Admixtures for Highly Fluidized Concrete. *Proc. Intl. Conf. on Concrete Under Severe Conditions*, Eds. K.Sakai, N.Banthia y O.E.Gjrv, E&FN Spon, Londres, pp. 995-1004.
- Yurugi, M. y Sakai, G. (1998), A Proven QA System for Flowable Concrete. *Concr. Intl.*, Vol. 20, n 10, pp. 44-48.