



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DE
PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD E INFLUENCIA DE LA
COMPOSICIÓN EN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y
MECÁNICAS DE LOS HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES**

AUTOR:

JONHSON WILKER RIGUEIRA VICTOR

DIRECTOR:

Dr. PEDRO SERNA ROS

COMITÉ EVALUADOR EXTERNO:

Dr. Ravindra Gettu
Dr. Manuel Fernández Cánovas
Dr. Luis Agulló Fité

TRIBUNAL DE TESIS:

Dr. Manuel Fernández Cánovas
Dr. Jorge Juan Payá Bernabeu
Dr. Luis Agulló Fité
Dr. Bryan Erick Barragán
Dr. Antonia Pacios Álvarez

VALENCIA, OCTUBRE DE 2007

Aos meus Pais
Moacyr e Marcia

A minha irmã
Rocksana

Aos meus Padrinhos
Alain e Carminha

Aos meus tios
Lourenço e Sandra

Aos meus avós
José e Elza

A minha esposa
Tatiana

A vida é um caminho cheio de obstáculos que devemos superar.
Cada obstáculo superado representa uma vitória que compartilhamos com aqueles que
estiveram ao nosso lado e que também são vitoriosos.
Hoje, supero mais um obstáculo e, a vocês quero dedicar esta conquista.
Muito obrigado por estar sempre ao meu lado.

AGRADECIMIENTOS

La realización de una tesis doctoral es una tarea compleja y, sin duda, imposible de ser desarrollada por una única persona. A lo largo de este trabajo he contado con el apoyo y colaboración de muchas personas, seguramente muchas más de las que podré nombrar en este texto. A todas ellas quiero dejar registrado mi gratitud. Muchas gracias por haberme enseñado, compartido, apoyado o simplemente por haber estado a mi lado.

En especial quiero dar las gracias a mi director Pedro Serna Ros y a mi eterna tutora M^a José Pelufo Carbonell, quienes más allá de lo profesional, se han preocupado por mí y mucho más que amigos, han sido mi referencia en España.

A mis compañeros de la universidad, Juan Navarro, M. Carmen Castro, M. Covadonga, Luis Pallarés, José Luis Bonet, Ángela Barrera, por la compañía durante los congresos, Andrés Caro, Samuel Arango y Emilio Taengua, por el apoyo en las tareas de laboratorio y en la redacción de artículos, y especialmente a mi compañero de despacho y amigo D. Cesar Arbeláez que por más de un verano estuvo a mi lado en el laboratorio.

A todos los profesores del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil que han participado y colaborado en mi formación como doctor.

A las secretarías del departamento Ana Escurriola, M. Carmen Gil, Ginesa, Ginesa Serrano y Beatriz Sancho, por realizar las tareas administrativas.

Al personal técnico del laboratorio de materiales del Departamento de Ingeniería de la Construcción, Pascual Hernández, Juan Franqueza, Juan Monzó, Javier Bardisa, Vicente Miguel y Paco Martorell por su ayuda a lo largo de la fase experimental de este trabajo.

A las empresas Basf, Sika, Prevalsa, Lafarge, Graveras Castellana y Soinval por suministrar los materiales que han hecho posible la realización de esta tesis, y muy especialmente a la empresa ISOCRON que además de suministrar material, han financiado mi primera beca para empezar la investigación sobre los hormigones autocompactantes.

Al Ministerio de Ciencia y Tecnología, Generalitat Valenciana, Universidad Politécnica de Valencia y al Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), por haber aportado los medios económicos necesarios en el desarrollo de este trabajo.

Sobretudo quiero dar las gracias a mi esposa Tatiana Souza Antunes Ribeiro, por su amor, su compañerismo y por enseñarme el significado de las palabras “Fortaleza” y “Superación”.

RESUMEN

Se define el Hormigón Autocompactante (HAC) como un hormigón muy fluido, que se compacta bajo su propio peso, capaz de rellenar todos los rincones del encofrado, pasando entre las armaduras, y presentando suficiente cohesión para evitar que se produzca la segregación del árido grueso o el sangrado. Así se consigue una puesta en obra fácil, pudiendo aplicarse en situaciones antes imposibles.

La idea original de este tipo de hormigón fue propuesta por Okamura (1986) con la intención de solucionar los problemas de durabilidad en las estructuras de hormigón armado, que se habían detectado y que se atribuían a una disminución en los niveles de calidad de mano de obra especializada para la ejecución de los procesos de compactación. El objetivo era crear un producto que garantizase la compactación, sin que el factor humano fuera una variable capaz de afectar al producto final.

El estudio y utilización de los hormigones autocompactantes (HAC) han tenido una tendencia creciente desde la propuesta inicial. Mayor rapidez y menor demanda de personal en el proceso del hormigonado, la posibilidad de fabricar elementos de formas muy difíciles o muy armadas y el ahorro energético unido a la mejora de las condiciones de trabajo debido a la reducción del ruido en el proceso de compactación son algunas de las ventajas de su utilización.

En este sentido, se ha dado inicio a la investigación de los hormigones autocompactantes en el Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia realizando una revisión de la literatura científica sobre toda la materia, centrándose, sobretudo en los métodos de dosificación y ensayos utilizados para caracterizar este tipo de hormigón en estado fresco y endurecido.

Con la intención de sacar más rendimiento a la hora de dosificar los hormigones autocompactantes se ha propuesto la utilización de modelos de ensayo en tamaño reducido para realizar los ajustes de dosificación y caracterización de estos hormigones.

Se ha estudiado y caracterizado la influencia de los aditivos en el comportamiento reológico de las pastas de cemento utilizadas en la fabricación de los hormigones autocompactantes.

Se ha estudiado la adherencia de los hormigones autocompactantes en armaduras activas determinando las longitudes de transmisión y anclaje. Se han comparado los resultados con los de hormigones tradicionales de referencia.

Se ha estudiado la sensibilidad de las dosificaciones de los hormigones autocompactantes realizando variaciones en las pesadas de los materiales. Se utilizó un programa estadístico para analizar los resultados obtenidos en laboratorio.

Por último se ha diseñado y aplicado el hormigón autocompactante utilizado en la construcción de las pilas del puente de la Ronda Norte de Valencia.

RESUM

Es defineix el Formigó Autocompactable (en anglés, SCC) com un formigó molt fluid, que es compacta pel seu propi pes, capaç de replenar tots els racons de l'encofrat, passant entre les armadures, i presentant prou cohesió com per evitar que es produeisca la segregació de l'àrid gros o el sagnat. Així s'aconsegueix una posada en obra fàcil, podent ser aplicat en situacions fins ara impossibles.

La idea original d'aquest tipus de formigó fou proposada per Okamura (1986) amb la intenció de solucionar els problemes de durabilitat a les estructures de formigó armat que s'havien detectat i que s'atribuïen a un decreixement en els nivells de qualitat de la mà d'obra especialitzada per a l'execució dels processos de compactació. L'objectiu era crear un producte que garantira la compactació sense que el factor humà fóra una variable capaç d'afectar el producte final.

L'estudi i utilització dels formigons autocompactables (SCC) ha tingut una tendència creixent des de la proposta inicial. Major rapidesa i menor demanda de personal per al procés de formigonat, la possibilitat de fabricar elements de formes molt difícils o molt armades i l'estalvi energètic, tot unit a la millora de les condicions de treball per la reducció del soroll en compactació, són alguns dels avantatges del seu ús.

En aquest sentit, s'ha donat començament a la investigació dels formigons autocompactables al Departament d'Enginyeria de la Construcció i Projectes d'Enginyeria Civil de la Universitat Politècnica de València, realitzant una revisió de la literatura científica sobre tota la matèria, centrant-ho, sobretot, als mètodes de dosificació i assajos que es fan servir per tal de caracteritzar aquest tipus de formigó en estat fresc i endurit.

Amb la intenció de traure més rendiment a l'hora de dosificar els formigons autocompactables s'ha proposat la utilització de models d'assaig a tamany reduït per ajustar les dosificacions i la caracterització d'aquests formigons.

S'ha caracteritzat i estudiat la influència dels additius en el comportament reològic de les pastes de ciment utilitzades en la fabricació dels formigons autocompactables.

S'ha estudiat l'adherència dels formigons autocompactables en armadures actives determinant les longituds de transmissió i ancoratge. S'han comparat els resultats amb els de formigons tradicionals de referència.

S'ha estudiat la sensibilitat de les dosificacions de formigons autocompactables, realitzant variacions en el pesatge dels materials. Ha estat utilitzat un programa estadístic per analitzar els resultats obtinguts en laboratori.

Per últim, s'ha dissenyat i aplicat el formigó autocompactable utilitzat en la construcció de les piles del pont de la Ronda Nord de València.

ABSTRACT

Self compacting concrete (SCC) is a very fluid concrete that compacts under its own weight. This concrete is able to fill all formwork corners by passing through reinforcement bars. It should present enough cohesion to prevent segregation of gravel or bleeding. Thus the concrete can be easily placed and it is suitable to be used in situations which were previously impossible to execute using traditional concrete.

The original idea for the creation of this concrete was suggested by Okamura (1986) to overcome problems related to durability of reinforced concrete structures as a result of the decrease of the quality of the specialized workers for the execution of the compaction processes. The aim was to create a product that could guarantee the compaction without having the human factor as a variable capable of affecting the quality of the final product.

The study and use of self-compacting concrete have been increasing since its initial proposal. Some advantages of its use rely on the faster placement and lower demand of workers in the cast process, the possibility to produce elements of difficult forms or highly reinforced, and the amount of energy spared, associated with the improvement of the work conditions due to the reduction of the noise in compaction.

Therefore the “Departamento de Ingeniería de la Construcción y PIC” from “Universidad Politécnica de Valencia” has started to develop a research program on self compacting concrete. A literature revision on this subject has been done, focusing mainly in the dosage methods and the tests used to characterize this kind of concrete in fresh and hardened state.

Aiming the gain in efficiency when designing self-compacting concrete, the use of reduced size models was proposed to fit the dosages and characterize these concretes.

The influence of the admixtures in the rheological behaviour of the cement pastes used on the production of self-compacting concrete were studied and characterized.

The adherence of self-compacting concrete on active reinforcement was studied by determining the transmission and anchoring length. The results were compared with the ones from traditional concretes of reference.

The robustness of the self-compacting concrete dosages was studied, varying the materials weights. Statistical software was used in the analysis of the results obtained from laboratory tests.

At last, a self compacting concrete was designed and applied in the construction of the columns of the North Round cross road in Valencia.

CONTENIDO DEL DOCUMENTO

Con el fin de orientar el lector esta tesis ha sido dividida en 9 capítulos que se describen a continuación:

El capítulo 1 presenta una breve introducción de la materia y se plantean los objetivos generales y específicos de este trabajo.

En el capítulo 2 se presenta un estudio sobre el estado del arte de los hormigones autocompactantes. Se reunió toda la información, posible, redactada desde que fue propuesto por el profesor Okamura a finales de los 80. Se da una atención especial a los métodos de dosificación y ensayos de caracterización del hormigón en estado fresco. Se comparan los métodos de dosificación y de ensayo utilizados por distintos autores en diferentes países.

El capítulo 3 es, el más extenso de la tesis. En él se presentan los materiales y sus características, la metodología, los criterios y los procedimientos de los ensayos utilizados. Se describen los equipos empleados, sus principales características y, en su caso, la forma de presentación de los resultados.

Los ensayos constituyen una parte importante en este capítulo. Por un lado, se presenta los procedimientos de los ensayos normalizados para la caracterización de pastas, morteros, hormigones y sus materiales constituyentes siguiendo las normas UNE, UNE-EN o ASTM en cada caso. Por otro lado se describen los casos en los cuales se ha alterado algún equipo o procedimiento de ensayo para su adaptación al hormigón autocompactante o a las condiciones de laboratorio impuestas.

Asimismo, se hace una aportación al ámbito del hormigón autocompactante. Se propone la utilización de modelos de ensayo en tamaño reducido para ajustes de dosificación y caracterización de los hormigones autocompactantes. Esta propuesta se justifica debido a que el tamaño de los ensayos normalmente utilizados suele exigir un volumen importante de hormigón, con lo cual la definición completa de una dosificación se hace muy laboriosa. Por otra parte, reduciendo las dimensiones de los ensayos se pretende sacar más rendimiento del proceso, bien aumentando el número de ensayos o bien ampliando el número de variables estudiadas y, por lo tanto, se conocerá con más detalle las ventajas o inconvenientes de distintas dosificaciones.

Se comprueba su validez ensayando hormigones autocompactantes de distintas características y comparando los resultados con otros, obtenidos por medio de los ensayos de tamaño estándar.

Finalmente se desarrolla una breve descripción del método de ensayo ECADA utilizado para estudiar el comportamiento adherente de armaduras activas respecto a transmisión de esfuerzos y anclaje en los hormigones.

El capítulo 4 presenta la descripción del programa experimental realizado hasta esta etapa, sus resultados y discusión de los mismos.

Debido a que los aditivos son imprescindibles a la hora de fabricar los hormigones autocompactantes y a que estos son muy sensibles a variaciones en cantidades o tipos de aditivos se decidió hacer un estudio más profundo de estos materiales. Por ello en la quinta parte de esta tesis se caracterizaron varios aditivos utilizando ensayos como el de residuo sólido, termogravimetría y espectrometría (infrarroja y RMN). Se comprueba la efectividad de algunos aditivos, seleccionados, analizando su influencia en el comportamiento reológico de las pastas de cemento utilizando un viscosímetro rotacional.

La tendencia general a la utilización de granulometrías finas y más precisamente a la inclusión de altos contenidos en finos a la hora de dosificar los hormigones autocompactantes puede dar lugar a hormigones con volúmenes de pasta bastante superiores a los hormigones tradicionales. De esta forma, se generan dudas sobre cómo la dosificación de un hormigón autocompactante puede afectar el comportamiento mecánico del hormigón y a propiedades como, por ejemplo, la adherencia. Por ello en el capítulo 6 se realiza un estudio de la adherencia de los hormigones autocompactantes en armaduras activas. Se determinan las longitudes de transmisión y anclaje de distintos hormigones autocompactantes y se comparan con los resultados de hormigones tradicionales de referencia.

Debido a la alta sensibilidad que suele presentar los hormigones autocompactantes el capítulo 7 está dedicado al estudio de su robustez. Se realizaron ensayos donde partiendo de una dosificación padrón se variaban las pesadas de los materiales dentro de los límites establecidos por la Instrucción Española del hormigón Estructural (EHE) y el

American Concrete Institute (ACI). El cambio de comportamiento del hormigón tanto en estado fresco como en estado endurecido se detectó en los resultados de los ensayos realizados. A su vez, estos resultados se analizaron utilizando un programa estadístico capaz de detectar las variables más influyentes y el nivel de influencia con que cada una de ellas afectaba el comportamiento del hormigón.

Además en esta parte se incluye un estudio de caso con datos reales suministrados por dos plantas de hormigón den la Comunidad Valenciana.

El capítulo 8 presenta detalladamente la utilización del hormigón autocompactante utilizado en la construcción de las pilas del puente de la Ronda Norte de Valencia realizado entre los días 23/06/06 y 25/07/06. Dicha obra tuvo la participación del departamento de Ing. de la construcción y P.I.C. de esta universidad desde la elección de la dosificación utilizada hasta la conclusión de la misma incluyendo el seguimiento del vertido de cada uno de los camiones hormigonera, 54 en total.

Finalmente el capítulo 9 se presentan las conclusiones, generales y específicas, obtenidas a lo largo de este trabajo. Además se presentan recomendaciones para la realización de futuros trabajos de investigación.

ÍNDICE

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Resumen	III
Resum	V
Abstract	VII
Contenido del documento	IX
CAPÍTULO 1 – OBJETIVOS	1
CAPÍTULO 2 – ESTADO DEL ARTE DE LOS HORMIGONES AUTOCOMPACTABLES (HAC)	5
2.1 Introducción	5
2.2 Conceptos específicos relacionados con los HAC	10
2.2.1 Introducción	10
2.2.2 Comportamiento reológico	11
2.2.3 Determinación de las propiedades reológicas del HAC	13
2.3 Caracterización de los HAC en estado fresco	20
2.3.1 Introducción	20
2.3.2 Ensayo del escurrimiento (UNE 83361:2007)	21
2.3.3 Escurrimiento con el anillo japonés (UNE 83362:2007)	23
2.3.4 Embudo en V (UNE 83364:2007)	25
2.3.5 Caja en L (UNE 83363:2007)	28
2.3.6 Caja en U	30
2.3.7 Otros ensayos	31
2.3.8 Ensayos para analizar la segregación de los HAC	34
2.3.9 Criterios de clasificación y aceptación de HAC	37

2.3.10	Comparación de las características reológicas y tecnológicas del HAC	39
2.4	Materiales empleados para fabricar HAC	41
2.4.1	Introducción	41
2.4.2	Cemento	41
2.4.3	Áridos	42
2.4.4	Finos: Adiciones y Filleres	43
2.4.5	Aditivos	45
2.5	Métodos de dosificación de los HAC	47
2.5.1	Introducción	47
2.5.2	Ensayos previos sobre pastas y morteros	48
2.5.3	Método general para la dosificación del HAC	50
2.5.4	Otras propuestas de dosificación basadas el método general	52
2.5.5	Método CBI (Swedish Cement and Concrete Research Institute)	53
2.5.6	Método LCPC(Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)	56
2.5.7	Método UPC (Universidad Politécnica de Cataluña)	58
2.5.8	Método EFNARC	59
2.5.9	Método ACI (American Concrete Institute)	63
2.6	Consideraciones finales	64
CAPÍTULO 3 – MATERIALES, METODOLOGÍA, CRITERIOS DE ENSAYO Y PROCEDIMIENTOS		67
3.1	Introducción	67
3.2	Materiales	69
3.2.1	Cementos	69
3.2.2	Adiciones	70

3.2.3	Áridos	71
3.2.4	Aditivos	73
3.2.5	Armaduras	75
3.3	Relación de ensayos normalizados utilizados para la caracterización de pastas, morteros y hormigones o sus materiales constituyentes	76
3.3.1	Ensayos de caracterización de componentes	76
3.3.1.1	Resistencia mecánica de cementos (UNE-EN-196-1)	76
3.3.1.2	Determinación del extracto seco convencional de los aditivos (UNE-EN 480-8)	76
3.3.1.3	Determinación del contenido de agua (h) de los áridos (UNE 83-133-90)	76
3.3.1.4	Determinación de la granulometría de los áridos (UNE-EN 933-1)	77
3.2.2	Determinación de la densidad de conjunto de los áridos (ASTM C29/CM29)	78
3.3.3	Otros ensayos para caracterización de áridos	78
3.3.4	Ensayos sobre pastas morteros y hormigones	78
3.3.4.1	Determinación de la fluidez de una pasta mediante el Cono de Marsh (UNE-EN 455)	78
3.3.4.2	Determinación de la consistencia del hormigón (UNE-EN 12350-2)	80
3.3.4.3	Caracterización de la fluidez de los HAC (UNE 83361:2007)	80
3.3.4.4	Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Anillo japonés (UNE 83362:2007)	81
3.3.4.5	Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Caja L (UNE 83363:2007)	81
3.3.4.6	Determinación del tiempo de flujo (UNE 83364:2007)	81
3.3.4.7	Determinación de las características mecánicas de los hormigones	82

3.3.4.7.1	Fabricación, curado y refrentado de probetas	82
3.3.4.7.2	Rotura a compresión simple (UNE EN 12390-3:2003)	85
3.3.4.7.3	Ensayo de tracción indirecta (UNE-EN 12390-6:2001)	85
3.3.4.7.4	Ensayo de permeabilidad (UNE-EN 12390-8:2001)	86
3.4	Ensayos específicos para la caracterización de materiales componentes, pasta y hormigón	87
3.4.1	Granulometría de los finos empleados	87
3.4.2	Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)	88
3.4.3	Termogravimetría TGA850	89
3.4.4	Características reológicas de pastas para hormigón	90
3.4.5	Ensayos para determinar el nivel de segregación en HAC	92
3.5	Procedimiento operatorio para la obtención de composiciones granulares óptimas	93
3.6	Procedimiento operatorio para la fabricación de los HAC	95
3.6.1	Procedimiento de Amasado Hormigonera A	96
3.6.2	Procedimiento de Amasado Hormigonera B	97
3.6.3	Procedimiento para el ajuste de los tiempos de amasado	98
3.6.4	Control de humedad en los áridos durante la fabricación del hormigón	100
3.7	Métodos de ensayo en modelos reducidos para dosificar y caracterizar HAC	102
3.7.1	Introducción	102
3.7.2	Modelos reducidos - propuesta	103
3.7.2.1	Ensayo de Ecurrimiento reducido	103
3.7.2.2	Embudo en V reducido	104

3.7.2.3	Caja en L reducida	107
3.7.3	Comparación de resultados entre ensayos estándar y reducido	109
3.8	Ensayo de adherencia de armaduras activas al hormigón	114
3.8.1	El método de ensayo ECADA	114
3.8.2	Procedimiento operativo	116
CAPÍTULO 4 – SOBRE LA COMPOSICIÓN DE LOS HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES		119
4.1	Introducción	119
4.2	Estudios sobre la composición de las pastas	120
4.3	Estudio de la estructura granular de los HAC	124
4.3.1	Planteamiento del estudio	124
4.3.2	Caracterización de los HAC	126
4.4	Parámetros para la dosificación de los HAC	130
4.5	Sobre la sensibilidad de los HAC frente a cambios en su estructura granular	134
4.6	Optimización de composición de los áridos en un HAC	141
4.7	Extrapolación de los criterios a las dosificaciones de hormigones con áridos de tamaño máximo superior a 12 mm	145
CAPÍTULO 5 – CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y EFECTIVIDAD DE LOS ADITIVOS UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE LOS HAC		147
5.1	Introducción y objetivos	147
5.2	Planteamiento del estudio	149
5.2.1	Ensayos de caracterización de los aditivos	149
5.2.2	Determinación de la efectividad de los aditivos	150
5.3	Resultados	153

5.3.1	Preselección de los aditivos	153
5.3.2	Estudios de efectividad de los aditivos seleccionados por medio del Cono de Marsh	154
5.3.3	Caracterización físico-química de los aditivos empleados	156
5.3.4	Influencia en el comportamiento reológico de las pastas (Viscosímetro):	158
5.4	Consideraciones finales	161
CAPÍTULO 6 – ESTUDIO DE LA ADHERENCIA DE LOS HAC EN ARMADURAS ACTIVAS		163
6.1	Introducción y objetivos	163
6.2	Dosificaciones estudiadas y caracterización del hormigón	165
6.3	Resultados	168
6.4	Consideraciones finales	172
CAPÍTULO 7 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE LOS HAC		175
7.1	Introducción	175
7.2	Normativa sobre tolerancias de pesado de materiales en la producción del hormigón	177
7.3	Definición de las dosificaciones de referencia	178
7.4	Planteamiento del estudio de sensibilidad. Diseño estadístico del experimento	185
7.5	Variabes respuesta y programa de ensayos	191
7.6	Resultados	195
7.6.1	Análisis estadístico de errores en la producción en plantas de hormigón preparado	195
7.6.2	Análisis estadístico e interpretación de los resultados experimentales de Robustez.	196

7.6.2.1	Análisis de varianza sobre las dosificaciones de referencia.	197
7.6.2.2	Análisis estadísticos de resultados de las dosificaciones HAC1 y HAC2	199
7.6.2.3	Análisis de resultados de las series HAC3 y HAC4	206
7.7	Consideraciones finales	209
CAPÍTULO 8 – APLICACIÓN: DOSIFICACIÓN Y CONTROL DE EJECUCIÓN DEL HAC EN LA CONSTRUCCIÓN DE LAS PILAS DEL PUENTE EN LA RONDA NORTE DE VALENCIA		211
8.1	Introducción	211
8.2	Descripción de la obra	212
8.3	Justificación de la dosificación de hormigón empleada	214
8.3.1	Ideas iniciales	214
8.3.2	Ensayos previos en obra	216
8.3.3	Propuestas para la optimización de la dosificación, definición de la dosificación definitiva	219
8.4	Propuesta de criterios de recepción y aceptación del hormigón	221
8.5	Aspectos relacionados con el calor de hidratación	226
8.6	Presión prevista sobre el encofrado	227
8.7.	Planteamiento del proceso de hormigonado	230
8.7.1.	Inclusión de vibradores de superficie	230
8.7.2.	Criterios de Vertido del hormigón	232
8.7.3.	Curado y desencofrado	233
8.8.	Seguimiento de la fabricación de las pilas y de su control de calidad	234
8.9	Control de resistencias	239
8.10.	Consideraciones finales	240

CAPÍTULO 9 – CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	243
9.1. Introducción	243
9.2 Conclusiones	244
9.3 Futuras líneas de investigación	255
BIBLIOGRAFIA	257
ANEXOS	
A I RESULTADOS PARAMETRO P	
A II DISEÑO DE EXPERIMENTOS SENSIBILIDAD	
A III RESULTADOS ENSAYOS DE SENSIBILIDAD	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABLAS	

CAPÍTULO 1

OBJETIVOS

Este trabajo se inició con la idea de introducir el estudio de los hormigones autocompactantes en el Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia, puesto que dicho departamento no presentaba precedentes de investigación sobre la materia.

En este sentido, algunos de los objetivos específicos han sido propuestos durante el propio desarrollo de esta investigación. A continuación se describen los objetivos específicos de esta tesis

- Realizar un profundo estudio bibliográfico y actualizar del estado de conocimiento de los hormigones autocompactantes.

Identificar las propuestas, métodos y procedimientos de dosificación utilizados para la obtención de estos hormigones.

Identificar los métodos y procedimientos de ensayos utilizados para la caracterización de los hormigones autocompactantes en estado fresco y endurecido.

- Desarrollar un amplio programa experimental que permita, en un primer momento, tomar contacto con el material ajustando dosificaciones encontradas en la bibliografía a los materiales disponibles en la región de Valencia.

Proponer la utilización de modelos de ensayo en tamaño reducido para realizar los ajustes de dosificación y caracterización de estos hormigones consiguiendo así un mayor rendimiento en este proceso.

Analizar la influencia de la composición granulométrica en el comportamiento del hormigón, haciendo especial hincapié en lo que dice respecto a los materiales finos, con granulometría inferior a 125 μm .

Posteriormente, proponer dosificaciones de hormigones autocompactantes que presenten distintas características reológicas y mecánicas de manera que estos sean capaces de cubrir una amplia gama de autocompactabilidad y de niveles de resistencia.

- Realizar una caracterización fisicoquímica de los aditivos y analizar la influencia de los mismos en el comportamiento reológico de las pastas utilizadas en la fabricación de los hormigones autocompactantes.
- Analizar el comportamiento adherente de los hormigones autocompactantes en armaduras activas.

Determinar las longitudes de transmisión y anclaje de hormigones que presenten distintos niveles de relación a/c , contenido en cemento y distintas granulometrías, incluyendo los materiales finos.

- Analizar la sensibilidad de las dosificaciones de los hormigones autocompactantes en función de los errores que puedan ocurrir en las pesadas de los materiales a la hora de fabricar el hormigón.

Como referencia se considerarán los límites contemplados por la (EHE) y por el (ACI) y los datos suministrados por dos plantas de hormigón ubicadas en la Comunidad Valencia.

- Partiendo de unos parámetros establecidos en proyecto, proponer una dosificación de hormigón autocompactante con las características adecuadas para su aplicación a escala real.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE DE LOS HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES

2.1 INTRODUCCIÓN

El Hormigón Autocompactante (HAC) es un hormigón muy fluido, que se compacta bajo su propio peso sin necesidad de energía externa. Es capaz de rellenar todos los rincones del encofrado, pasando entre las armaduras, sin que se produzca el efecto tamiz, y presenta suficiente cohesión para evitar que se produzca la segregación del árido grueso o la exudación. Así se consigue una puesta en obra fácil, pudiendo aplicarse en situaciones imposibles para un hormigón tradicional.

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

Los HAC incluyen en su tecnología los últimos avances en productos para hormigón especialmente a nivel de aditivos (súper plastificantes de nuevas generaciones o cohesionantes), y en algunos casos en adiciones minerales, activas o no.

Gracias a estos productos y a una concepción especialmente cuidada de su dosificación se consigue una serie de características que los hacen especialmente interesantes desde el punto de vista de su aplicación, tanto en hormigones de obra como en prefabricación.

El proceso de endurecimiento de los HAC es idéntico al de los hormigones tradicionales.

La durabilidad, en general, no se ve afectada ya que la evolución de la porosidad y la permeabilidad tampoco cambiarán. Sin embargo algunos autores defienden que las bajas relaciones a/c y el alto contenido en finos hacen con que la mezcla sea menos porosa y consecuentemente más resistente a las agresiones del ambiente.

La idea original de este tipo de hormigón fue propuesta por Okamura (1986) con la intención de solucionar los problemas de durabilidad en las estructuras de hormigón armado, que se habían detectado y que se atribuían a una disminución en los niveles de calidad de mano de obra especializada para la ejecución de los procesos de compactación. El objetivo era crear un producto que garantizase la compactación, sin que el factor humano fuera una variable capaz de afectar al producto final.

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

La primera obra donde se empleó un HAC fue realizada en Japón en 1988 utilizando materiales existentes en el mercado (Okamura y Ouchi 1999). Este hormigón funcionó satisfactoriamente desde el punto de vista de la retracción, calor de hidratación, densidad después del endurecimiento y otras propiedades.

La primera ponencia, en congresos, sobre el hormigón autocompactante, fue realizada por Ozawa, en la Segunda Conferencia del Pacífico y Este de Asia de Ingeniería Estructural y Construcción (EASEC-2), en enero de 1989. La presentación realizada por Ozawa en la Conferencia Internacional de CANMET y ACI, en Estambul, en mayo de 1992, aceleró la difusión del concepto en todo el mundo.

Después del seminario ACI sobre el hormigón de alto rendimiento, cuyo anfitrión fue el profesor Paul Zia, en Bangkok, en noviembre de 1994, el hormigón autocompactante se convirtió en el tema común de mayor interés en todo el mundo, para investigadores e ingenieros interesados en la durabilidad del hormigón y en un sistema racional de construcción.

Inicialmente los HAC fueron tratados simplemente como un hormigón especial de alto desempeño (Ozawa, Maelawa y Okamura 1992), y su utilización se restringía a las grandes empresas de construcción japonesa. A partir de estas fechas algunos comités como el JCA (Japan Cement Association), el JCI (Japan Concrete Institute) el JSCE (Japan Society of Civil Engineers), y el comité RILEM empezaron a realizar una serie de actividades con el objetivo de fomentar el desarrollo de los HAC. Entre estas actividades cabe destacar la publicación en 1997 del “State of the Art of RILEM Technical Committee 174-SCC” editado por Skarendahl y Petersson. Este libro hace una recopilación sobre los trabajos realizados hasta el momento donde se plantean conceptos relacionados con la reología, la capacidad de paso, la trabajabilidad, resistencia a la segregación, los tipos de finos o las propuestas de dosificación, y sus evoluciones, así como los métodos de ensayos mas utilizados.

En 1996, la conferencia realizada por Okamura, en la Convención del ACI, en Nueva Orleans, fomentó el interés por el HAC en Norteamérica. En septiembre de 1999 se realizó el primer congreso internacional sobre los HAC en Estocolmo, contando con la participación de delegados de 13 países, con Japón y Suecia como mayores colaboradores. Los principales temas analizados estaban relacionados con los materiales, la dosificación, las propiedades y principalmente con las aplicaciones de los HAC.

Dos años mas tarde, en el segundo congreso internacional (RILEM) realizado en Tokio, se pudo observar un gran aumento del interés y de la utilización de los HAC. Mas de un 25% de los trabajos presentados estaban relacionados con aplicaciones en construcciones civiles y de edificación.

En agosto de 2003, tubo lugar en Islandia el tercer congreso internacional(RILEM), en él se puso de manifiesto la creciente tendencia a la utilización de los HAC además de una clara preocupación sobre el comportamiento del hormigón, su reología y sus propiedades mecánicas.

Finalmente en el último congreso RILEM realizado en Chicago en el 2005 se pudo observar que el desarrollo y la utilización del HAC siguen una tendencia creciente. Asimismo, el bajo índice de trabajos escritos sobre dosificación es un indicativo de que el HAC ya no es un secreto y de que los investigadores siguen centrando cada vez mas sus investigaciones en el comportamiento reológico y en las propiedades mecánicas de estos hormigones.

En Europa, en 1997, varias empresas y universidades dieron inicio al proyecto “BriteEuram BE96-3801 - Rational Production and Improved Working Environment Trough Using Self Compacting Concrete”. Dicho proyecto tenia como principales objetivos desarrollar la tecnología para la fabricación de los HAC e introducir esta tecnología en la producción, transporte y ejecución a grand escala.

Finalizado en el año de 2000 este proyecto generó un documento bastante completo que aporta información sobre distintos aspectos del hormigón, en estado fresco y endurecido.

Además, en Europa, se han formado comisiones para establecer parámetros fijos para los HAC entre ellas se destaca la comisión europea conocida como GROWTH Project – GR 2-2000-30024 con participación de Alemania, Suecia, Holanda, Inglaterra, Dinamarca, Islandia, Francia y Bélgica. Sus objetivos se orientan hacia la normalización de los HAC identificando sus principales características, de manera que se pueda reproducir el mismo hormigón en distintos países.

Asimismo ya existen varias guías como la “The European guidelines for Self-Compacting Concrete; Specification, Production and Use” preparada por el “Self-Compacting Concrete European Group” fundado en enero del 2004. La “Betons Auto-Plaçants; Recommandations provisoires”, preparada por la “Association Française de Génie Civil” en el 2000. La “Self-Compacting Concrete, Recommendations for Use”

Report N° 10 de la Swedish Concrete Association's Comité, 2002. La "Guía Práctica para la Utilización del Hormigón Autocompactante" del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), 2005. O mas recientemente la "Self-Consolidating Concrete (ACI237R-07) presentado por el American Concrete Institute en el 2007.

Estos documentos presentan información general a cerca de los autocompactantes y son bastante útiles para las empresas o investigadores que están empezando a tomar contacto con los HAC.

En Particular, la guía Europea presenta un alto nivel de detalles en cuanto a dosificación, ensayos y clasificación del hormigón en función de sus propiedades en estado fresco.

En España, AENOR ha adaptado las normas de ensayos para caracterizar el comportamiento de los HAC en estado fresco. Además, el borrador de la futura instrucción Española de hormigón estructural incluye un anejo específico para la utilización de los HAC.

2.2 CONCEPTOS ESPECIFICOS RELACIONADOS CON LOS HAC

2.2.1 Introducción

Los HAC se incluyen entre los de hormigones especiales de altas prestaciones pensados y fabricados para cumplir determinados objetivos que están mas allá de las capacidades de los hormigones convencionales. Sus principales características se presentan en el estado fresco, y de acuerdo con las guías presentadas en el apartado anterior, estas características se dividen en tres bloques descritos a continuación:

- **Capacidad de paso:** Se define como la capacidad que el hormigón debe tener para pasar por sitios estrechos sin que el contacto entre los áridos cause el bloqueo de la mezcla. La obtención de esta propiedad se da incrementando la fluidez de la pasta con la utilización de superplastificantes, reduciendo el volumen de árido grueso de la mezcla y ajustando el diámetro máximo del árido en función de los espacios por donde el hormigón debe pasar. Así, la geometría de la pieza a hormigonar y la distribución de las armaduras son los principales factores a tenerse en cuenta.
- **Capacidad de llenado:** Es la capacidad que el hormigón debe tener a la hora de fluir dentro del encofrado rellenando todas las superficies. Por un lado esta propiedad garantiza la calidad del acabado, de manera que este presentará una superficie lisa, con color homogéneo y libre de coqueras. Por otra parte, las armaduras deben estar perfectamente recubiertas evitando la ocurrencia de bolsas de aire en la parte inferior de las mismas.
- **Resistencia a la segregación:** Esta propiedad está relacionada con la estabilidad del hormigón. En un HAC la mezcla debe permanecer homogénea durante y tras el proceso de hormigonado sin que ocurra separación de los áridos o exudación. Este factor influye directamente sobre las dos propiedades citadas anteriormente afectando la calidad final de la pieza hormigonada. En general se busca la estabilidad de la mezcla por medio de la inclusión de filleres o por la utilización de agentes modificadores de la viscosidad (AMV). La utilización de cualquiera de ellos tiende a incrementar la viscosidad de la pasta evitando la segregación.

2.2.2 Comportamiento Reológico

“La reología es la disciplina que estudia la deformación y flujo de materiales. La resistencia que un fluido opone al flujo puede ser modelada analizando el movimiento paralelo de dos planos (fig.2.1), donde uno de ellos se mueve en la dirección de su propio plano y el otro está fijo. Se considera que el flujo es unidimensional y que la velocidad varía de forma directamente proporcional a la distancia perpendicular entre los planos.” (Velásquez 2002).

Los líquidos de estructura simple, como por ejemplo el agua, obedecen a la ley de Newton (ecuación 2.1):

$$\tau = \eta \cdot \gamma' \quad (2.1)$$

donde τ es el esfuerzo de corte, definido como la fuerza por unidad de área aplicada y γ' es la velocidad de corte producida, que se define como la variación de la velocidad por unidad de distancia h entre los dos planos.

La Constante η que relaciona el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de corte adoptada por el fluido, se define como viscosidad

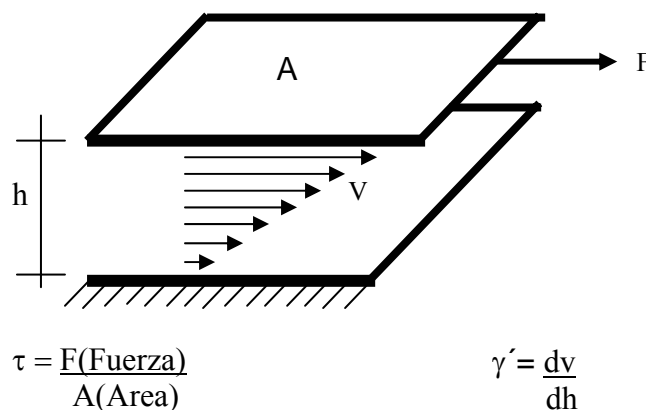


Fig. 2.1 Representación esquemática del comportamiento de un fluido Newtoniano

Existen sustancias, tales como geles, polímeros fundidos, fluidos orgánicos, como la sangre, que presentan estructuras más complejas y que presentan propiedades tanto elásticas (relacionadas con los sólidos) como viscosas. Tales sustancias son conocidas como “fluidos no-Newtonianos” y en la mayoría de los casos pueden ser modelizadas utilizando la ecuación de Bingham (ecuación 2.2):

$$\tau = \tau_0 + (\mu \cdot \dot{\gamma}) \quad (2.2)$$

donde τ_0 es el esfuerzo inicial que se debe superar para que el fluido se ponga en movimiento y μ es la viscosidad plástica. (fig. 2.2).

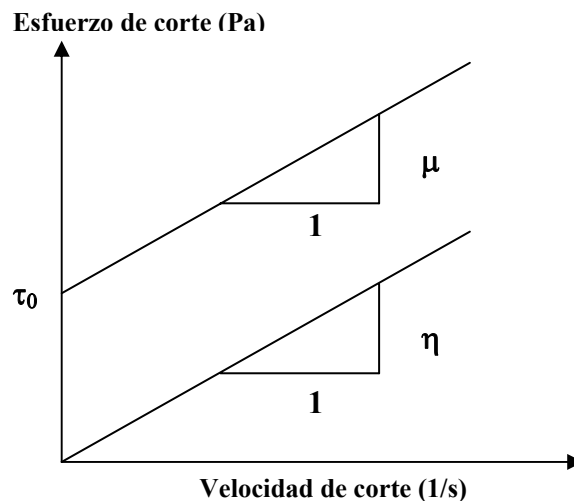


Fig. 2.2 Representación grafica de los modelos de Newton y Bingham

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

En principio el comportamiento reológico de los hormigones puede ser considerado como no Newtoniano y puede ser modelizados por la ecuación de Bingham.

El concepto reológico del esfuerzo de corte inicial que el material necesita para empezar a fluir (τ_0) está íntimamente relacionado con el concepto de la tixotropía, pero también con el de la consistencia, entendida como la resistencia del hormigón a fluir.

Por ello la mayoría de los autores están de acuerdo en que el objetivo a la hora de conseguir un buen HAC es buscar un hormigón que presente el menor τ_0 posible.

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

2.2.3 Determinación de las propiedades reológicas del HAC

Para evaluar los parámetros reológicos τ_0 y μ de la ecuación de Bingham en los HAC se utilizan equipos conocidos como reómetros (viscosímetros). En el mercado existen reómetros de modelos y tamaños muy distintos, lo que hace que los resultados de ensayos sean difícilmente comparables.

Ferraris(1999) presentó un estado del arte sobre los métodos utilizados para analizar las propiedades reológicas de hormigones del altas prestaciones, donde describe los varios tipos de reómetros y el funcionamiento de cada uno.

En 1999 Emborg utilizó un viscosímetro BML WO-3, (fig. 2.3) de cilindros concéntricos, para analizar la viscosidad y el esfuerzo de corte, en hormigones, considerando variables como el tipo de árido (machacado o rodado), tipo y volumen de filler, cuantía de cemento, volumen de agua, tipo y dosificación de aditivo (superplastificante y cohesionante).



Fig. 2.3 Viscosímetro BML WO-3

Sobre una dosificación base, Emborg analiza, inicialmente, el efecto del tipo de árido fino (0 – 8 mm), y concluye que los áridos rodados presentan menor dispersión en los resultados, principalmente en la viscosidad plástica (μ), obteniendo valores se encuentran entre los 7 y los 12 (Nms). Mientras que para los áridos machacados estos resultados varían entre los 6 y los 46 (Nms).

Posteriormente, analiza el efecto sobre el comportamiento reológico del tipo y dosificación de árido grueso (8 – 16 mm), mezclado en proporciones que variaban entre los 39 y los 45% sobre el árido total. En este caso se utilizó siempre el árido fino rodado. Como respuesta encontró valores de μ entre 6 y 12 Nms y de τ_0 entre 0,1 y 0,5 Nm. En todos los casos los áridos gruesos rodados presentaron mayor esfuerzo inicial que los machacados.

Además, Emborg analizó las tendencias reológicas cuando se reducen los finos de la mezcla. Concluyó que reduciendo el contenido en finos, sean estos, cemento o filleres, los valores de los esfuerzos iniciales se reducen, mientras que las viscosidades se mantienen dentro de un mismo orden.

Respecto los aditivos Emborg concluye que los superplastificantes afectan principalmente el esfuerzo inicial. Éste será tanto menor cuanto mayor sea la proporción de aditivo utilizada en la mezcla. Mientras que la utilización de cohesionantes incrementa la viscosidad dando mas estabilidad a la mezcla.

El análisis de sus estudios lleva a Emborg a la conclusión de que distintas variaciones en la dosificación de los hormigones pueden producir efectos similares. Sus resultados se resumen en la fig. 2.4 Así, partiendo de una amasada de referencia, un aumento en la dosificación de agua, un mayor porcentaje de árido grueso o la reducción del contenido en cemento disminuyen tanto el esfuerzo inicial de corte de la mezcla como su viscosidad. Una reducción en el volumen de filleres utilizado también reducen los mismos parámetros, pero de manera mas acentuada cuando se trata del esfuerzo de corte. Por otra parte, dosificaciones elevadas de superplastificantes también reducen el esfuerzo de corte inicial de la amasada, pero a la vez aumentan la viscosidad de la misma.

Ya en el caso de sustituir áridos rodados por machacados, la amasada tiene una tendencia a aumentar tanto su esfuerzo de corte inicial como su viscosidad. La utilización de aditivos agentes de viscosidad es capaz de aumentar la viscosidad de la mezcla manteniendo de manera controlada el esfuerzo de corte inicial.

Asimismo, Emborg propone un área óptima para la fabricación de HAC en cuanto a reología. Esta área está comprendida entre 11 y 14 Nms para la viscosidad y entre 0 y 0,3 Nm para el esfuerzo inicial

Emborg analizó también la correlación entre las propiedades reologicas de la mezcla y ensayos como el Ecurrimiento y la Caja L, pero en ambos casos los datos presentaron demasiada dispersión y por tanto no encontró correlación entre ellos.

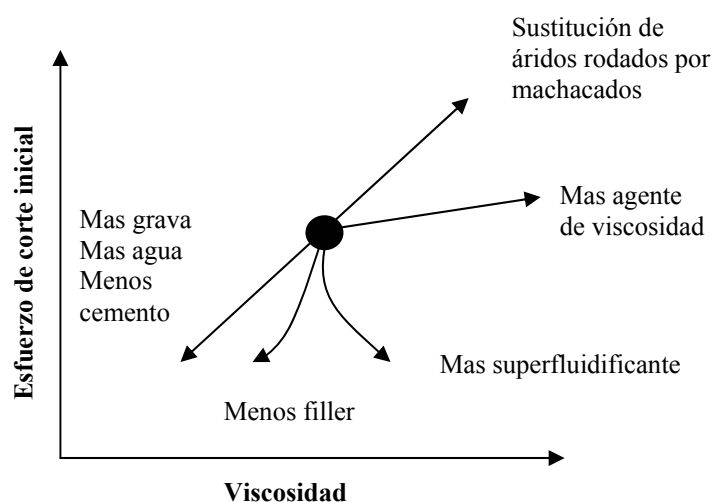


Fig. 2.4 Recomendaciones según Emborg 1999

En esta misma línea de estudios, Nielsson y Wallevik (2003) realizaron estudios reológicos utilizando un viscosímetro “ConTec” (fig. 2.5) y completándolos con ensayos de Esguerramiento, Orimet, Caja L y Embudo V.



Fig. 2.5 Viscosímetro Con Tec

El estudio no tiene el objetivo de proponer ecuaciones a partir de los ensayos empíricos, sino simplemente presentar los resultados y con ellos formular preguntas y analizar sus posibles respuestas sobre el tema.

Estos ensayos se realizaron sobre cuatro tipos de hormigones.

- Una mezcla de referencia, con una tensión de corte igual a cero treinta minutos después de añadir el agua.
- Una mezcla con incremento de árido grueso, para dificultar la capacidad de paso del hormigón.
- Una mezcla con el mismo esqueleto granular que la mezcla de referencia pero con distinta proporción de pasta. De manera que la tensión de corte se incrementa alrededor de 50 Pa, disminuyendo la capacidad de llenado.
- Y finalmente una mezcla “óptima”, diseñada con la idea de mejorar la capacidad de llenado. Se logró este objetivo aumentando respecto a la amasada de referencia, el volumen de finos, reduciendo el contenido de agua y subiendo el de aditivo superplastificante.

A partir de sus los resultados Nielsson y Wallevik definieron intervalos, de viscosidad y esfuerzo de corte, para los cuales los hormigones podrían ser considerados como autocompactantes y los correlacionaron con los diámetros de Escurrimiento alcanzados por los hormigones en cada caso, fig. 2.6.

Nielsson y Wallevik afirman que los hormigones que presenten baja viscosidad plástica deben tener un esfuerzo de corte mas elevado, para garantizar su resistencia a la segregación. Por otra parte, los hormigones que presenten alta viscosidad plástica deben tener valores de esfuerzo de corte insignificantes.

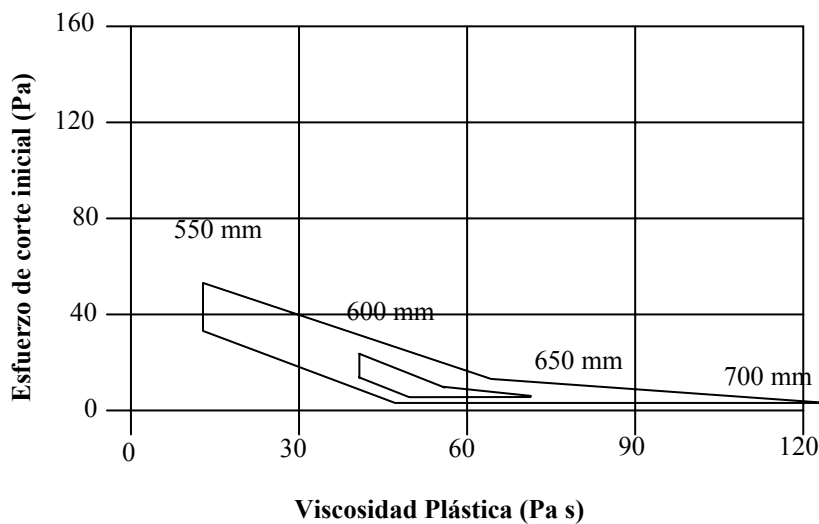


Fig. 2.6 Zonificación de los HAC de acuerdo con su aplicación según Wallevik y Nielsson

Como conclusión Nielsson y Wallevik presentan una correlación lineal creciente entre los resultados de la viscosidad y de los resultados del T_{500} , Orimet, embudo en V y caja L. De forma que una variación de la viscosidad entre los 25 y los 95 (Pa s) corresponde a una variación entre los 2 y los 6 (s) en el T_{500} , los 2 y los 7 (s) en el Orimet, entre los 4 y los 12 (s) en el embudo en V y entre los 2 y los 8 en la caja L.

Además, concluyen que la calidad de los resultados de los ensayos depende principalmente del operador.

Bilberg (1999) utilizó un viscosímetro (Haake Rotovisco C20) de cilindros concéntricos, para analizar pastas de HAC con 7 tipos de aditivos, 2 tipos de cementos y filleres de distintas procedencias.

Manteniendo fijas las proporciones de cemento, filler y la relación a/c, analizó los parámetros τ_0 y μ en respecto al diámetro medio de partícula. La conclusión es que tanto τ_0 como μ son mayores a medida que se reduce el diámetro medio.

Bilberg comprueba la mayor efectividad de los superplastificantes de última generación en comparación con los tradicionales fabricados a base de sulfonatos y melaminas. Además, concluye que el incremento de superplastificante implica una reducción tanto del τ_0 como de la μ independientemente de la proporción entre cemento y filler. Esta reducción puede ser más acentuada o más suave dependiendo del tipo de filler utilizado. Como conclusión final, Bilberg propone que para fabricar un HAC se busque una combinación entre cemento, filler y aditivo con la cual se consiga el menor τ_0 posible.

Los estudios sobre reología no siempre alcanzan las mismas conclusiones y las propuestas para los valores de τ_0 y de μ pueden llegar a ser muy distintos, como se aprecia en la tabla 2.1 (Wallevik 2003).

PAIS	Finos (Kg/m ³)	Esfuerzo inicial (Pa)	Viscosidad plástica (Pa s)
Suecia	>550	0 – 30	50 – 100
Holanda	>550	0 – 10	60 – 120
Japón	>550	0 – 30	50 – 120
Francia	-	0 – 10	> 60
Suiza	<450	0 – 50	10 – 20
Noruega	<450	10 – 50	30 – 45
Islandia	<450	10 – 50	20 – 40
Dinamarca	<400	30 – 60	< 40
Reino Unido	>550	10 – 50	50 – 80
Alemania	>550	0 – 10	60 – 90
Estados Unidos	>550	0 – 20	40 – 120

Tabla 2.1 Propuesta de valores de esfuerzo inicial τ_0 y viscosidad plástica μ para la fabricación de HAC en distintos países. (Wallevik 2003)

Estas diferencias pueden deberse a varios factores entre los cuales se puede destacar, además de la influencia de los materiales componentes del hormigón procedentes de distintos países, los distintos tipos de equipos y procedimientos utilizados que hacen con que la comparación de los resultados sea muy subjetiva. Wallevik (2006) comentó que los valores medidos por el BTRheom son más o menos el doble de los valores que se miden con un viscosímetro ConTec BML en el mismo hormigón. Por ese motivo, a la hora de realizar comparaciones en la fig. 2.6 los valores medidos por el primer equipo se deben dividir entre dos.

Por otra parte, es posible que los objetivos buscados por cada autor sean diferentes, y dependiendo de la aplicación se intente caracterizar un HAC con mayor o menor viscosidad plástica.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS HAC EN ESTADO FRESCO

2.3.1 Introducción

Dado que los HAC en estado fresco poseen propiedades distintas a las de un hormigón tradicional. Estas características requieren métodos de ensayos distintos a los tradicionales, que no sirven para evaluar las propiedades de este nuevo tipo de hormigón.

La utilización del Cono de Abrams daría resultados próximos a 30 cm y no discriminaría distintos comportamientos. Otros métodos tradicionales tampoco son aplicables.

En la actualidad, existen una serie amplia de métodos de ensayo muy extendidos que nos permite caracterizar los HAC en estado fresco. Entre los más utilizados analizaremos los siguientes:

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

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

2.3.2 Ensayo del escurrimiento (UNE 83361:2007)

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

Su procedimiento consiste en llenar el Cono de Abrams con una muestra de hormigón, sin ningún tipo de compactación, sobre una placa de superficie lisa y perfectamente plana que presente una marca circular con diámetro de 500 mm. Tras levantar el cono y dejar fluir el hormigón, se mide el tiempo que tarda la masa de hormigón en alcanzar un diámetro de 500 mm (T_{500}) y posteriormente el diámetro (D_{max}) final alcanzado por la mezcla de hormigón (fig. 2.7).

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

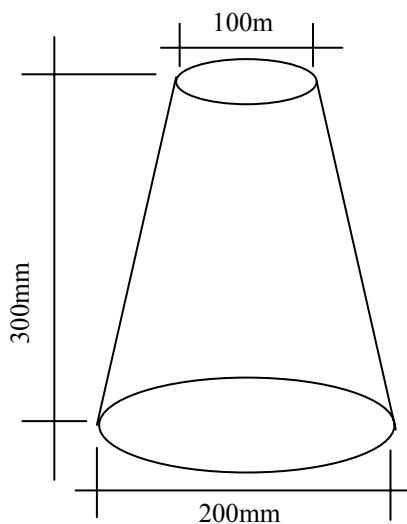


Fig 2.7 Dimensiones del Cono de Abrams y realización del ensayo

Sedran propuso en 1999 las ecuaciones 2.3 y 2.4 que relacionan los parámetros T_{500} y D_f con el esfuerzo de corte inicial (τ) y con la viscosidad plástica (μ) descritos en el apartado 2.2.2.:

$$\tau_0 = (808 - D_{\max}) \frac{Mg}{11740} \quad (2.3)$$

$$\mu' = \frac{Mg}{10000} (0,026D_f - 2,39) t_{500} \quad (2.4)$$

donde el D_{\max} es el diámetro máximo en mm, g es la aceleración de la gravedad, M es la densidad en Kg/m^3 y t_{500} es el tiempo, en segundos, que el hormigón tarda en alcanzar un diámetro de 500 mm. Los resultados se darán en Pa para el τ_0 y en Pa.s para μ' . Sedran admite errores del orden de 95 Pa y de 35 Pa.s respectivamente para τ_0 y μ' .

Paralelamente a los trabajos de reología, Nielsson y Wallevik (2003) realizaron un estudio con el ensayo de Esgurrimiento. En este caso se realizaba el ensayo de dos maneras distintas. En un caso se sacaba el cono lentamente mientras el hormigón fluía y en el otro caso éste era sacado rápidamente.

Se ejecutaron estos ensayos para hormigones con tres viscosidades distintas: 80, 40 y 20 Pa. Es decir, alta, media y baja viscosidad respectivamente.

Nielsson y Wallevik concluyen que en ninguno de los casos la manera de realizar el ensayo afecta el resultado final del mismo y que únicamente el ensayo del Esgurrimiento no es suficiente para definir las características de un HAC. Además, indica que la medida de los tiempos de Esgurrimiento no es precisa debido a que la mezcla no siempre alcanza los 500 mm de manera uniforme con lo cual no llegan a proponer ecuaciones relacionando los parámetros anteriormente mencionados.

Respecto a los límites del ensayo, la Guía Europea para el HAC (2006) o el documento cero de la EHE para HAC (2007) recomiendan clasificar los HAC en distintas categorías en función del valor de su esgurrimiento.

La Guía Europea propone seleccionar las exigencias en función del tipo de aplicación. La tabla 2.2 resume estas recomendaciones. Para los elementos de hormigón en masa o ligeramente armados así como los pavimentos y losas se podrá utilizar cualquiera de las categorías.

Clase	mm	Aplicación
Sf1	550 a 650	- Estructuras en masa o poca densidad de armaduras que sean llenadas desde la parte superior con desplazamiento libre desde el punto de entrega (p.e. losas de cimentación o pavimentos) - Hormigones de relleno por bombeo (p.e. encofrados de túneles) - Elementos suficientemente pequeños que no precisen largos flujos horizontales (p.e. pilares y algunas cimentaciones profundas)
Sf2	660 a 750	Adecuado para muchas aplicaciones normales (p.e. muros y pilares)
Sf3	760 a 850	Aplicaciones verticales en estructuras muy armadas, estructuras de formas complejas, o rellenos bajo los encofrados.

Tabla 2.2 Recomendaciones de la Guía Europea para el ensayo de Ecurrimiento

2.3.3 Ecurrimiento con el anillo Japonés (UNE 83362:2007)

Inicialmente desarrollado por la Universidad de Paisley (EFNARC 2002) este ensayo evalúa la fluidez y la capacidad de paso del hormigón a través de las barras de acero. El aparato consiste en un anillo compuesto de barras de acero y puede ser adaptado los ensayos de Ecurrimiento u Orimet (Fig. 2.8 y 2.9). En ambos casos el ensayo se desarrolla liberando una determinada masa de hormigón en el centro del anillo. El hormigón debe fluir a través de las barras de acero sin el árido grueso se quede bloqueado entre las mismas.

En cuanto a sus dimensiones autores como Sonebi y Bartos (2000), la Guía europea de HAC o la norma española UNE 83362 coinciden que el diámetro del anillo sea de 300 mm mientras que el diámetro y el espacio entre barras pueden variar en función del diámetro máximo del árido que se utilice o de la armadura que se desee simular (Tam 2005). La UNE 83362 recomienda la utilización de 20 barras de 10 mm de diámetro sí

el tamaño máximo del árido es menor o igual a 20 mm. Y 12 barras de 28 mm de diámetro si se utilizan áridos mayores que 20 mm.

Al igual que en el Ecurrimiento, se medirá el tiempo T_{500} y, tras la estabilización del hormigón se medirá el diámetro final (D_f) como resultado específico de este ensayo se mide las alturas H_1 y H_2 alcanzadas por el hormigón, en los bordes interior y exterior del anillo (fig. 2.10). El anejo de la EHE sobre HAC recomienda que los diámetros alcanzados por el hormigón en este ensayo no deben diferir más que 50 mm respecto al ensayo de Ecurrimiento del mismo hormigón.

Tanto la Guía Europea como la norma UNE 83362 definen el coeficiente de bloqueo como (ecuación 2.5):

$$C_{be} = \left(\frac{H_2}{H_1} \right) * 100 \quad (2.5)$$

No hay recomendaciones específicas para los valores del coeficiente de bloqueo.



Fig 2.8 Ensayo de Ecurrimiento con anillo J



Fig 2.9 Ensayo Orimet con anillo J

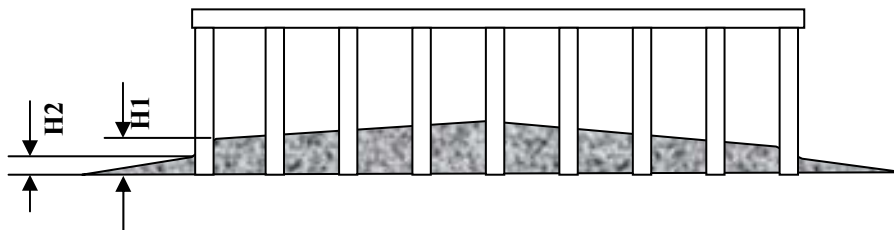


Fig. 2.10. Definición de H1 y H2 en el ensayo del anillo japonés

2.3.4 Embudo en V (UNE 83364:2007)

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

Para realizar el ensayo, primeramente se llena un embudo, de dimensiones indicadas en la fig. 2.11, sin compactación. Tras un minuto de reposo se abre la compuerta que se encuentra en la parte inferior del embudo.

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

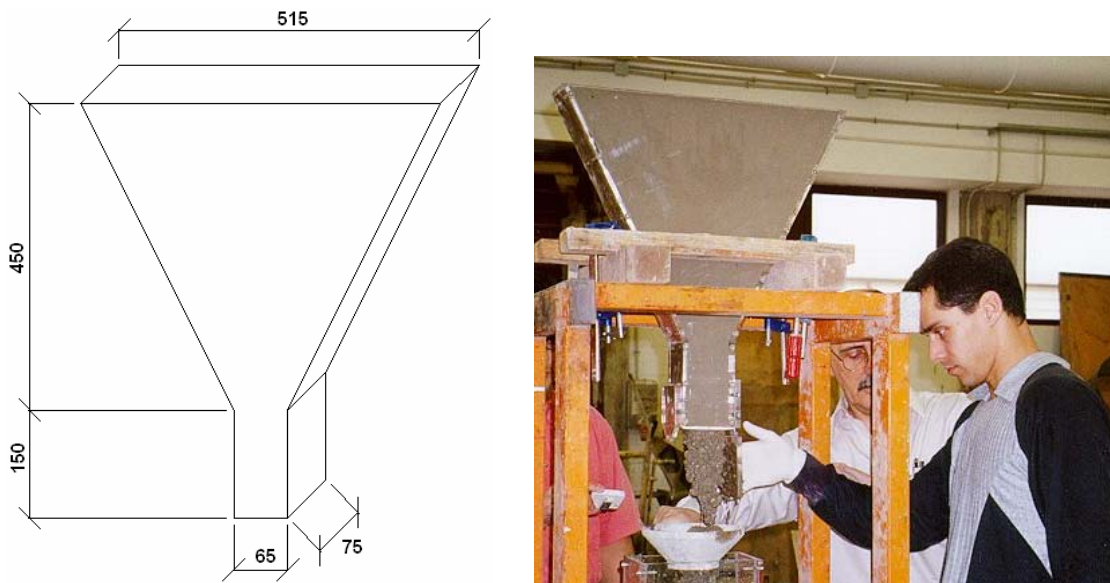


Fig. 2.11 Ensayo del embudo V. Dimensiones en mm

La masa de hormigón debe bajar de manera continua y con velocidad constante. Variaciones en la velocidad de caída del hormigón indican que éste se está bloqueando debido a la segregación. Altos tiempos de embudo en hormigones con velocidades de caída constante indican que la mezcla es demasiado cohesiva debido al exceso de finos, a la reducida cantidad de agua o a la baja dosificación de aditivo.

Okamura (1996, 2003) utilizó este ensayo para evaluar la influencia del volumen, forma y distribución del agregado grueso, en la velocidad del flujo del hormigón. Utilizando hormigones con tres módulos de finura distintos (6.45, 6.71 y 6.90) realizó ensayos de embudo en V con distintas aperturas de salida (55,65 y 75 mm). Okamura concluyó que la frecuencia de contacto entre partículas sube a medida que se reduce la distancia relativa entre ellas. Sin embargo, concluyó que la forma de agregado no afectará la fluidez del hormigón, cuando se utilice un mismo porcentaje de árido grueso. Finalmente Okamura concluye que la velocidad de flujo del hormigón a través del embudo con apertura de salida de 55 mm se verá sensiblemente afectada por el módulo de finura del árido grueso.

Respecto a los límites de resultados, hay distintas recomendaciones aunque en general el límite superior no sobrepasa los 25 (s). La guía EFNARC (2002) recomienda que el resultado debe encontrarse entre los 6 y los 12 segundos y que en la repetición del ensayo, realizado con el mismo hormigón 5 minutos tras la realización del primero, no debe presentar una diferencia superior a 3 segundos. Ya en el 2005, la guía europea recomendó la clasificación de los HAC en función de esta propiedad en dos clases:

- Tv inferior a 8 segundos: utilizados para elementos como pavimentos, losas, muros y pilares
- Tv entre 9 y 25 segundos: utilizados sobretodo para rampas

El anejo de la EHE para HAC propone un rango entre los 4 y los 20 segundos divididos en tres categorías:

- Tv ente 4 y 6 segundos: para estructuras con alta densidad de armaduras, encofrados con geometría compleja o elementos horizontales donde se desee obtener la autonivelación.
- Tv entre 6 y 10 segundos: “adecuada para la mayor parte de los elementos estructurales que se construyen habitualmente”
- Tv entre 10 y 20 segundos: para hormigón en masa o ligeramente armado, rampas y encofrados con geometría sencilla.

Kayat (1999) considera que para un hormigón de alta fluidez, con Escurrimiento alrededor de 630 mm, tiempos de embudo iguales a 20 segundos indica que el hormigón no posee suficiente estabilidad para garantizar una distribución uniforme del árido grueso.

Soen (2001) también propuso dividir los resultados del ensayo del embudo en V en tres clases 4 ± 1 segundos, 7 ± 2 segundos, 13 ± 2 segundos. Estos valores se aproximan a los propuestos por la EHE.

En su estudio sobre la incorporación de altos volúmenes de cenizas volantes a los HAC, Bouzoubaâ (2001) preparó 10 dosificaciones que presentaron un intervalo entre 3 y 7 segundos en el ensayo de embudo V.

Holschemacher (2002) fijó un intervalo entre 10 y 20 segundos para seleccionar los HAC que utilizaría en su estudio de adherencia.

Para la fabricación de los elementos pretesados utilizados en la construcción del viaducto “Higashi-Ooozu” en Japón se consideró el intervalo para los resultados del embudo V entre 8 y 15 segundos, recomendado por la JSCE (Ouchi y otros 2003).

En su estudio sobre el comportamiento de los HAC bajo fuego Rainhardt y Stegmaier (2006) utilizaron dosificaciones con resultados de embudo V entre los 8 y los 18 segundos.

2.3.5 Caja en L (UNE 83363:2007)

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

El aparato está compuesto por un compartimiento vertical y un canal horizontal separados por una compuerta. La forma y dimensiones de la caja se muestran en la fig. 2.12. En el canal, y junto a la compuerta se acopla un sistema de armaduras instalado con la intención de dificultar el paso del hormigón. Tanto los diámetros de las barras utilizadas así como las separaciones entre ellas pueden ser modificados de acuerdo con el tipo de aplicación que se prevea para el hormigón. En 1999 Petersson utilizó tres barras de 12 mm en su investigación sobre el coeficiente de bloqueo del HAC con diferentes tamaños máximos de áridos. Esta misma configuración de barras es la que recomienda el RILEM en su Report 23 (1999) o EFNARC en su documento del 2002. Ya en 2005 la guía europea contempla la utilización de dos o tres barras de 12 mm pero en ningún caso define cuando se debe utilizar cada una de las opciones. Finalmente, la norma española, UNE 83363 define la utilización de 3 barras de 12 mm de diámetro

para ensayar hormigones con diámetro máximo de árido igual a 20 mm, y, 2 barras de 16 mm de diámetro para hormigones con diámetros máximos de árido superior a 20 mm.

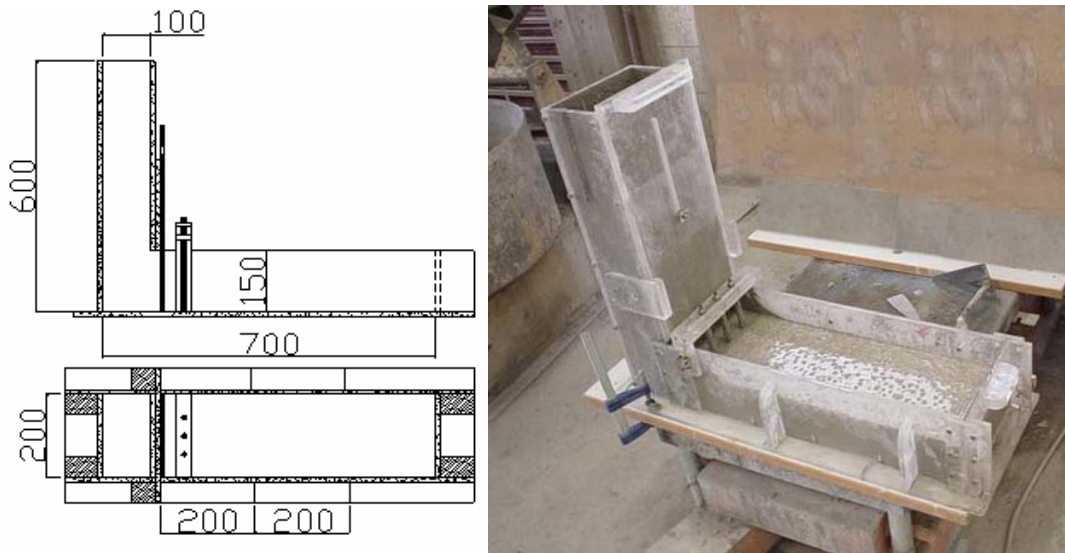


Fig. 2.12 Dimensiones de la caja L y ensayo realizado

Para realizar el ensayo, se rellena completamente el compartimiento vertical de la caja, con una muestra de hormigón, sin compactación, manteniendo la compuerta cerrada. Tras un minuto de reposo, se abre la compuerta y el hormigón empieza a fluir, por el canal horizontal, pasando a través de las barras de acero.

Respecto a los parámetros medidos en el ensayo, inicialmente se recomendaban medir los tiempos que la masa de hormigón tarda en recorrer, desde la compuerta, distancias de 200 y 400 mm, T_{200} y T_{400} respectivamente (Pettersson 1999 y RILEM 2000), pero los últimos documentos sobre la materia ya no consideran estas medidas (Guía Europea 2005) o simplemente miden el tiempo final, es decir, el tiempo que el hormigón tarda en alcanzar el extremo de la sección horizontal de la caja, una vez se abre la compuerta (UNE 83363:2007) .

Finalmente, después que la masa de hormigón se estabiliza, se analiza la capacidad de nivelación o el coeficiente de bloqueo, midiendo las alturas que alcanza el hormigón en los dos extremos del canal horizontal, antes y después de las barras de acero, dando

como resultado el cociente entre la altura al final y al principio del tramo horizontal h_2 y h_1 . Como recomendaciones a este coeficiente de bloqueo RILEM considera valores entre 0,80 y 0,85, EFNARC entre 0,80 y 1,0, mientras que la Guía Europea únicamente considera como límite inferior el valor de 0,75. Y el anejo de la EHE propone el intervalo entre 0,75 y 1,0.

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

2.3.6 Caja en U (RILEM Technical Committee 174 – SCC)

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

El aparato está compuesto de dos compartimentos verticales separados por una sección armada y una compuerta. Las dimensiones de la caja U se muestran en la fig. 2.13.

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

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

Asimismo este ensayo no está contemplado en documentos mas actuales tales como la Guía Europea para HAC, el Anejo 21 de la EHE o el ACI 237R-07.

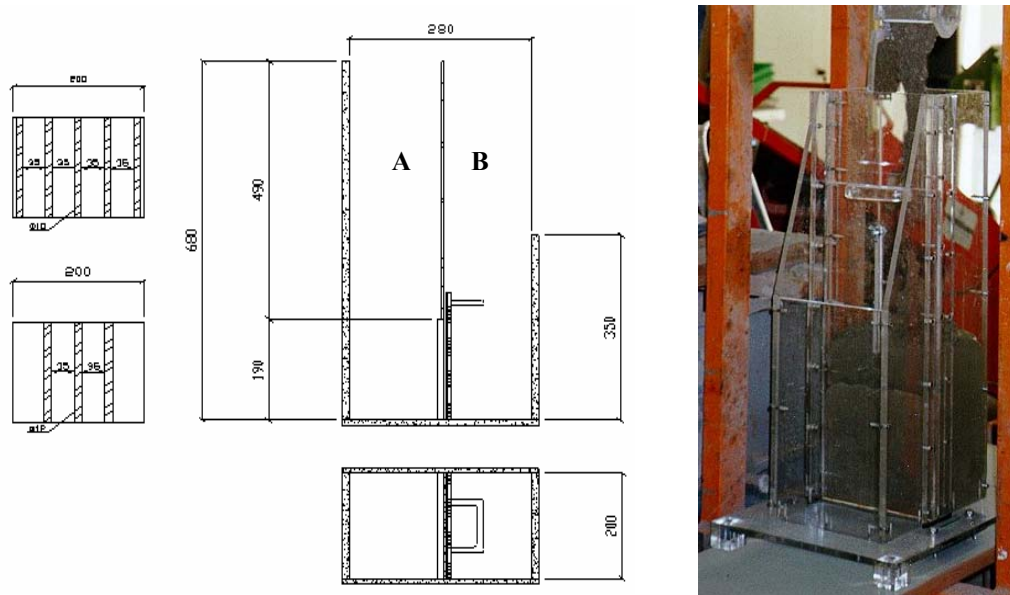


Fig 2.13 Ensayo caja en U

2.3.7 Otros ensayos

Filling Vessel Test (RILEM Technical Committee 174 – SCC)

Este ensayo permite evaluar las capacidades de llenado y nivelación del hormigón en zonas densamente armadas. El aparato original fue desarrollado por Ozawa en 1992 fig. 2.14.

Posteriormente este ensayo sufrió algunas modificaciones; Yurugi, M – 1993 y Takada, K – 1998. Las dimensiones actualmente utilizadas se muestran en la fig. 2.15. Se evalúa la capacidad de nivelación del hormigón a través de la ecuación 2.6:

$$F(\%) = \frac{h1 + h2}{2h1} \times 100 \quad (2.6)$$

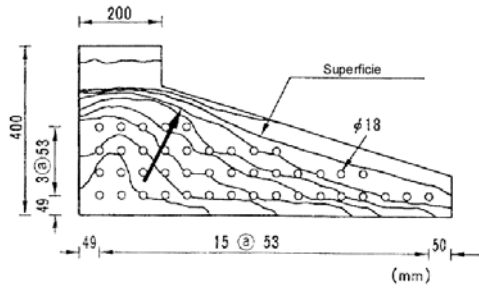


Fig 2.14 Vessel test. Aparato Original

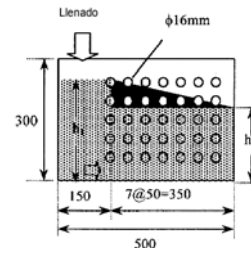
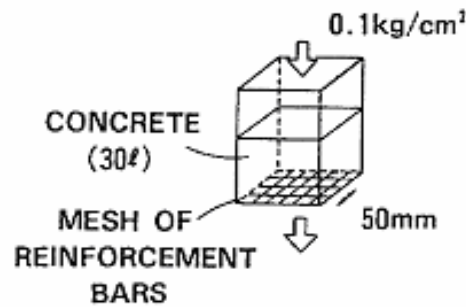


Fig 2.15 Vessel test. Aparato modificado

Ensayo de Flujo Vertical

El ensayo de flujo vertical (Ozawa - 1992), al igual que el Filling Vessel Test, evalúa la habilidad del hormigón de pasar por zonas densamente armadas. Consiste en llenar un recipiente, de aproximadamente 30 litros de hormigón, que posee en la parte inferior un esquema de armaduras como se indica en la fig. 2.16. Tras el llenado, se aplica una pequeña presión (0.1kg/cm^2) y el hormigón empieza a fluir a través de la armadura.



Flujo vertical a través de una malla.

Fig2.16 Ensayo de flujo vertical

Orimet Test

El Orimet Test (fig. 2.17) fue desarrollado por Bartos en 1978 inicialmente para evaluar hormigones fluidos y recientemente para analizar el comportamiento de los HAC respecto a su fluidez.

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

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

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

El procedimiento del ensayo consiste en llenar el aparato con una muestra de 8 litros de hormigón, sin compactarlo. Diez segundos tras el llenado se abre la compuerta dejando que el hormigón fluya simplemente por la acción de la gravedad. Se mide el tiempo que el hormigón tarda en vaciar completamente el cilindro. Este procedimiento no debe superar los 5 minutos.



Fig. 2.17 Orimet test

2.3.8 Ensayos para analizar la segregación de los HAC

Evaluar los niveles de segregación de los áridos es un factor muy importante en este tipo de hormigones, ya que su gran fluidez puede venir acompañada de falta de cohesión. Muchos autores recomiendan la realización de una inspección visual para comprobar la existencia de segregación o exudación (Khayat 1999), (Sedran 1999), (PCI TR-6-03-2003), (Rigueira 2004). Para cuantificar este parámetro se han desarrollado varios ensayos.

Sedran y De Larrard (1999) propusieron utilizar el ensayo de tracción indirecta (Ensayo Brasileño) para romper una probeta cilíndrica y analizar la distribución de los áridos en el interior de la misma (fig. 2.18 y 2.19). Cuando el hormigón tiene tendencia a segregar, al realizar este ensayo se detecta una capa superior sin árido grueso. Se define como segregado el hormigón que presente una capa superficial de pasta con 5 mm de espesor medido entre la superficie de la probeta y el primer árido de diámetro superior a 8 mm.



Fig. 2.18 Probeta segregada



Fig. 2.19 Probeta sin segregación

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

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

Para evaluar la estabilidad superficial Khayat (1999) y Guisan (1997) propusieron los dos métodos de ensayo presentados en la fig. 2.20. En ambos casos se utilizan probetas cilíndricas de 800 mm de altura y 200 mm de diámetro que se rellenan con una muestra de hormigón sin compactación.

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

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

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

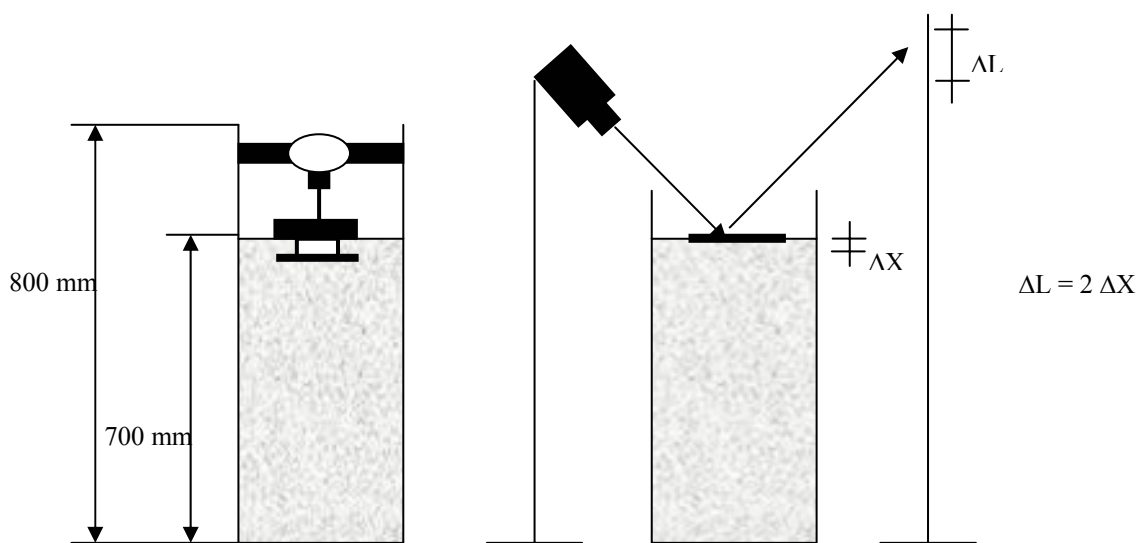


Fig 2.20 Ensayos de estabilidad superficial

En la Universidad Politécnica de Cataluña, Gomes (2002) ha desarrollado el ensayo del Tubo en U (fig. 2.21).

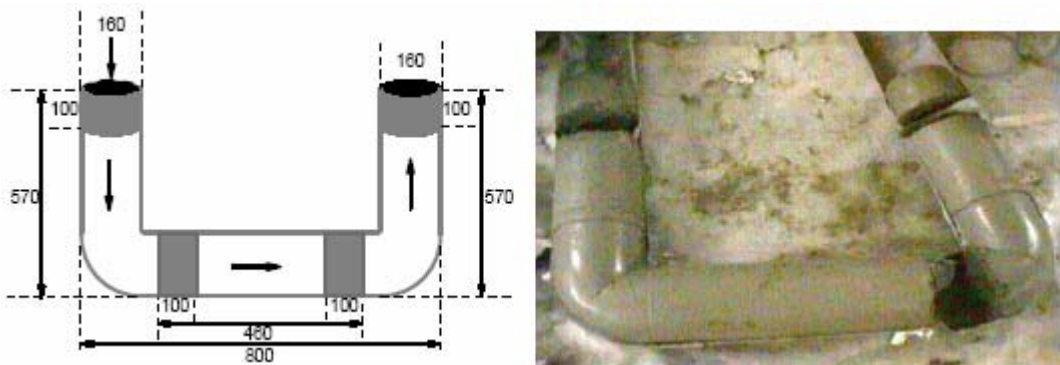


Fig. 2.21 Ensayo del Tubo en U

El ensayo consiste en rellenar un tubo, de 160 mm en forma de U, vertiendo el hormigón por una de las bocas hasta que éste alcance la otra extremidad del tubo de manera que las dos extremidades se queden niveladas. Se espera entre 3 y 6 horas hasta que el hormigón empiece a fraguar. Luego se abre el tubo y se cortan discos con 10 cm de espesor de distintas secciones del tubo. Estos discos son posteriormente lavados y pasados por un tamiz de 5 mm, para eliminar el mortero. Con el árido grueso, lavado y seco, se determina la relación de segregación, definida por el cociente entre el contenido de árido grueso evaluado en el hormigón y el contenido teórico según la dosificación. Ésta relación debe ser igual o superior a 0,9 (Gettu y Agulló 2004).

Para verificar la resistencia a la segregación se ha planteado en algunos casos la realización de pruebas de recepción en obra. Entre ellas, Ouchi en 1996, propuso la utilización del ensayo presentado en la fig. 2.22. Que consiste en verter una muestra del hormigón suministrado en una caja donde una de las paredes laterales ha sido sustituida por una sección armada. La muestra debe fluir a través de la armadura sin que se produzca el bloqueo de la mezcla.

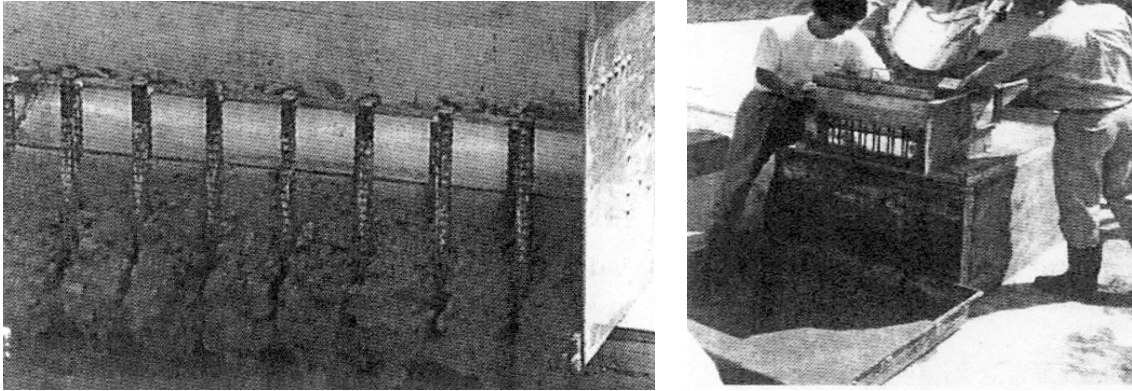


Fig. 2.22 Ensayo de aceptación en obra

2.3.9 Criterios de clasificación y aceptación de HAC

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

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

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

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

No existen valores universalmente aceptados y recomendados para estos ensayos. En algunos casos hay divergencias de opiniones entre los autores, (tabla 2.3), aunque en otros casos los valores recomendados varían muy poco. La altura final de la Caja U, se suele estipular superior a 300 mm, y el cociente entre las alturas finales en la Caja L se propone superior al 0,75.

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

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

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

En su artículo “¿Por qué es tan diferente el hormigón autocompactante en algunos países?” Wallevik (2006) atribuye estas diferencias sobretudo a las tradiciones y al grado de apertura de las personas implicadas en el proceso.

ENSAYOS	Escurrimiento		Caja L			CAJA U	EMBUDO V
	T ₅₀₀ (s)	D _{max} (mm)	T ₂₀ (s)	T ₄₀ (s)	H ₂ /H ₁	h(mm)	T(s)
AUTORES/ GUIAS							
Hayakawa 1993	4 - 10	600-700	-	-	-	≥300	-
Ozawa 1994	-	-	-	-	-	-	6 - 10
Petersson1996	1 - 4	670 - 720	-	-	≥0,80	-	-
Japan Society Civil Ing. 1998	-	-	-	-	-	≥300	-
Billberg 1999	3 - 8	600 - 700	-	-	≥0,80	-	-
Okamura 2000	-	-	-	-	-	≥300	-
Sonebi 2000	1 - 3	650 - 690	-	-	≥0,80	-	-
Bouzoubaâ 2000	-	-	-	-	-	-	3 - 7
BETTOR 2000	-	600 - 700	-	-	-	-	8 - 12
Alcantara 2001	-	600 - 750	-	-	≥0,80	-	-
Sika S/A 2001	3 - 6	650 - 750	-	3 - 6	≥0,80	-	-
Gomes 2002	3 - 7	600-750	1,5	2,5	≥0,80	-	≤15
Gettu 2002	3 - 7	600 - 750	1± 0,5	2± 0,5	≥0,80	-	7 - 13
EFNARC 2002	2 - 5	650 - 800	-	-	≥0,80	≥300	≤ 12
European Guidelines 2005	≤2 ≥2	550<D _f <650 660<D _f <750 760<D _f <850	-	-	≥0,75	-	≤8 9≤T _v ≤25
EHE 2006	≤8 2≤T≤8 2,5≤T≤8	550<D _{f1} <650 650<D _{f2} <750 750<D _{f3} <850	-	-	0,75 - 1,0	-	4≤T _v ≤6 6≤T _v ≤10 10≤T _v ≤20
ACI 2007	2 - 5	450 - 760	-	-	0,80 – 1,0	-	-

Tabla 2.3 Parámetros de los ensayos por autores

2.3.10 Comparación de las características reológicas y tecnológicas del HAC

Siguiendo los parámetros definidos por Nielsson y Wallevik, Zerbino y otros (2006), han desarrollado un amplio estudio experimental que consistió en fabricar varias series de amasadas sobre las cuales se medían los parámetros de reología, esfuerzo inicial y viscosidad plástica, se realizaban los ensayos de Ecurrimiento, Ecurrimiento con anillo y embudo en V. Analizaron como factores:

- Temperatura
- Volumen de amasado
- Tamaño máximo del árido
- Incorporación de fibras
- Incorporación de Retardador de fraguado
- Incorporación de Zeolitas

Con ella analizaron los parámetros reológicos de los HAC a lo largo del tiempo y buscaron una correlación entre estas y otras propiedades tecnológicas como el escurrimiento y el tiempo de flujo en el embudo en V, proponiendo al final una zona de autocompactabilidad en la grafica “Diámetro de Ecurrimiento por Tiempo de embudo V” (fig. 2.23). El área abarcada por la elipse marca la zona de los HAC que corresponde a la zona definida por Nielsson y Wallevik respecto a los parámetros reológicos. Inmediatamente por encima de esta elipse, la zona gris define una región donde se encuentran los hormigones que presentan una viscosidad mas elevada pero que podrían ser considerados como HAC ya que presentan suficiente movilidad, representada por el diámetro del Ecurrimiento. Ya por debajo de la elipse, los tiempos de embudo V en el límite de los 3 segundos y los diámetros de escurrimiento superiores a 700 mm se define la zona de los hormigones que estarían en la frontera de la segregación. Estos

hormigones suelen ser muy rápidos pero no presentan suficiente cohesión entre árido y pasta.

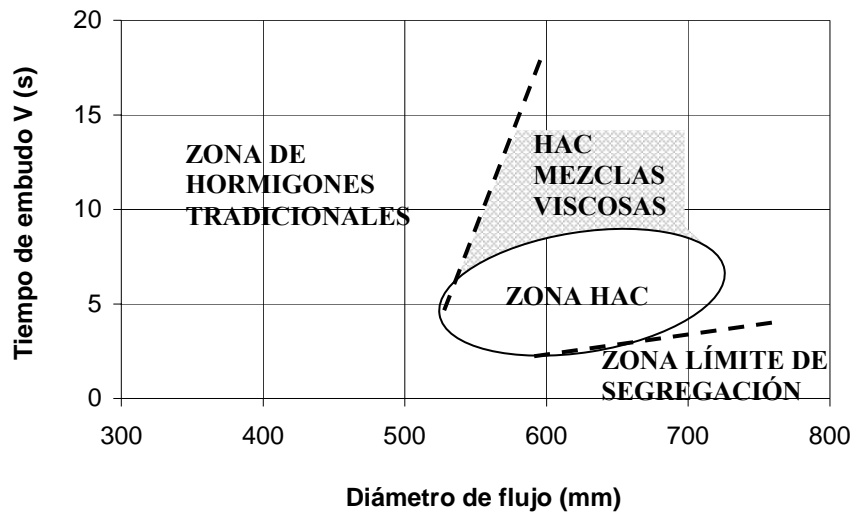


Fig. 2.23. Definición de zonas de autocompactabilidad según Zerbino et al, 2006

Aceptar que la región gris de mezclas viscosas se considere incluida en la zona de los HAC implica ampliar la zona de los parámetros reológicos inicialmente propuesta por Nielsson y Wallevik incluyendo, en ella, hormigones que presentan simultáneamente valores de, viscosidad plástica y esfuerzo de corte inicial, algo superiores (fig. 2.24).

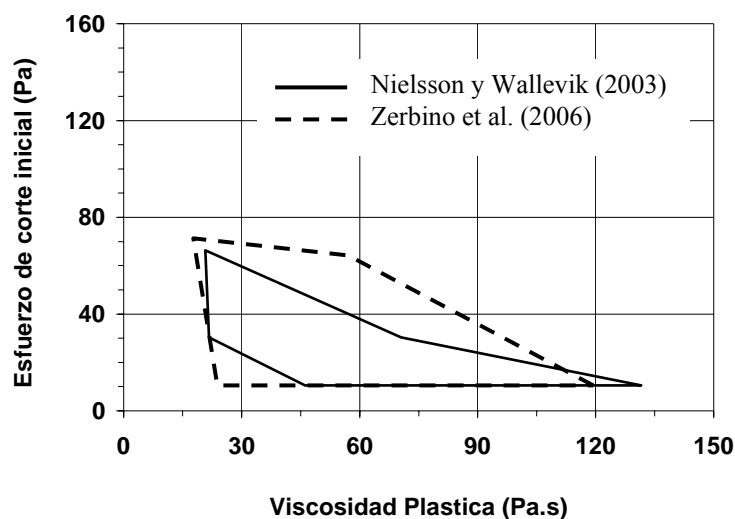


Fig. 2.24. Comparación de las zonas de autocompactabilidad

2.4 MATERIALES EMPLEADOS PARA FABRICAR HAC

2.4.1 Introducción

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

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

2.4.2 Cemento

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

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

Las cantidades de cemento utilizadas, no deben superar $500 \text{ Kg} / \text{m}^3$ debido a los riesgos de aumento en la retracción. Cuantías inferiores a los $350 \text{ Kg} / \text{m}^3$ solo resultan adecuadas si se incluye otro tipo de fino, como cenizas volantes, puzolanas, etc. En general el consumo suele estar entre 350 y 450 Kg/m^3 .

Dado que se han realizado muchos estudios y aplicaciones con la idea de obtener HAC de altas resistencias es frecuente que se emplee cementos tipo CEM-I 52,5. Sin embargo cuando las exigencias de resistencia no sean importante suele ser conveniente emplear cementos de clase resistente inferior ya que su menor finura va acompañada una menor demanda de agua.

2.4.3 Áridos

No existen limitaciones en cuanto a la naturaleza de los áridos para la fabricación de los HAC, sin embargo suelen plantearse consideraciones sobre su tamaño máximo. Las recomendaciones mas usuales son de que este no debe superar los 20 mm (Okamura y Ozawa), (Izquierdo 2001), aunque en los anclajes del puente Alashi-Kaikyo se llegó a utilizar áridos de 40 mm (Olamura y Ouchi – 1999). Asimismo, es muy frecuente encontrar referencias donde se ha utilizado tamaño máximo igual o incluso inferior a 12 mm, tanto en investigación (Chai 1998, Petersson, Bilberg y Van 1999, Khayat 1999, Sonebi y Bartos 2000, Gonnouni 2000, Gomes 2002, Holschemarcher 2002, de la Cruz 2006, Wallevik 2006) como en aplicaciones (Umehara 1999, Hauke 2001, Ohtomo 2001, Müller 2001, Pintado, Barragán, Bravo 2005)

Sobre las arenas hay que tener en cuenta que, las arenas rodadas tienen una superficie que favorece la trabajabilidad del hormigón (ACI 237R-07), mientras que las arenas machacadas poseen formas que aumentan considerablemente el rozamiento interno de la mezcla, por eso necesitan más agua para lograr los mismos resultados que los obtenidos con las arenas de río.

Otro factor que se debe considerar a la hora de elegir la arena es el contenido en finos. Arenas con muchos finos proporcionan una reducción en los niveles de adiciones necesarias y en algunos casos se pueden llegar a eliminar completamente.

Debe garantizarse que los finos aportados por las arenas no sean perjudiciales para el hormigón.

2.4.4 Finos: Adiciones y Filleres

En la bibliografía se puede encontrar distintas opiniones en relación al tamaño de partícula a partir del cual se define un material como fino (tabla 2.4). La tendencia general es que este parámetro se fije en 0.125 mm. En este trabajo serán considerados “finos” todas las partículas inferiores a 0.125 mm independientemente de su procedencia.

Los finos tienen como principal función dar cohesión y evitar la segregación de la mezcla. Su utilización es necesaria en la mayoría de las dosificaciones, pero en algunos casos pueden ser sustituidas, bien por aditivos cohesionantes (Ambroise y Pera – 2001), (Alcantara - 2001), (Petersson – 1999), o bien por los propios finos aportados por los áridos.

Los materiales mas utilizados para incrementar el volumen de finos en los HAC suelen ser las cenizas volantes y humo de sílice (Gomes – 2002), o inertes como el filler calizo (Bilberg – 1999), silicio o la marmolina (Alcantara – 2001) en función de las posibilidades de suministro de la zona y del coste.

	Okamura (1990)	Ozawa (1990)	Sari (1999)	Gomes (2002)	Izquierdo (2001)	European Guidelines (2006)
Finos (mm)	< 0.090	< 0.090	< 0.150	< 0.080	< 0.125	<0.125

Tabla 2.4 Definición de finos según algunos autores

La EHE, en su apartado 28.3.3, establece límites al contenido en finos menores a 0,063 mm, de los áridos, en función del origen del árido y del ambiente en que trabajará el hormigón. En los comentarios de este mismo apartado se recomienda que la masa total de materiales inferiores a 0.063 mm, procedente de los áridos y de la componente caliza del cemento (en su caso), no supere los 175 Kg/m³.

El Anejo 21 del borrador 0 de la nueva EHE (2007) propone que este valor sea ampliado a 250 Kg únicamente para los HAC, y contempla la utilización de filleres calizos como un árido.

La instrucción EHE apartado 29.2 contempla únicamente la utilización del humo de sílice y de las cenizas volantes como adiciones al hormigón en el momento de su fabricación. Establece que los límites de utilización de estos productos no deben exceder los valores de 35% del peso del cemento, para las cenizas volantes y 12% en el caso del humo de sílice.

Sin embargo en la bibliografía internacional se encuentra una amplia relación de referencia en las que se ha empleado con éxito otras adiciones tanto en hormigón tradicional como en HAC (Edamatsu, Nishida y Ouchi 1999, Domone y Chay 1997, Ho 2002, Esping 2003).

Las adiciones se clasifican de acuerdo con su hidraulicidad. La tabla 2.5 extraída de la Guía Europea para HAC (2005) presenta estas clasificaciones.

Tipo 1	Inertes o Seminertes	Filler mineral (piedra caliza, dolomía, etc.) Pigmentos
Tipo 2	Puzolanas	Cenizas volantes conforme la EN 450 Humo de sílice conforme la PNE-prEN 13263
	Hidráulicamente activas	Escoria granulada de alto horno

Tabla 2.5 Clasificación de las adiciones en función de su hidraulicidad

2.4.5 Aditivos

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

Los reductores de agua de alto rango o superplastificantes son imprescindibles en la dosificación de los HAC.

En la tabla 2.6 (Izquierdo – 2001) se muestra la evolución de estos aditivos a lo largo del tiempo.

Desarrollo histórico de la reducción de agua			
1930	1970	1990	2000
Ligno-sulfonatos	Melamina naftaleno	Polimeros vinílicos	Policarboxilatos
reducción de agua hasta un 10%	reducción de agua hasta un 20%	reducción de agua hasta un 30%	reducción de agua hasta un 40%

Tabla 2.6 Evolución de los aditivos reductores de agua a lo largo del tiempo

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

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

Las melaminas son productos basados en polímeros sintéticos. Su capacidad de reducción de agua es similar a de los naftalenos. Como característica fundamental se destaca el aumento de la resistencia a edades tempranas. Estos superplastificantes de segunda generación han tenido como efecto negativo principal que la pérdida de trabajabilidad del hormigón es demasiado rápida, y a bajas relaciones A/C este puede producir un flujo demasiado viscoso.

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

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

La alta trabajabilidad exigida por un HAC solo puede ser obtenida mediante la utilización de productos de última generación producidos a base de éteres policarboxílicos. Los fluidificantes normales producidos a base de naftalenos, sulfonatos, melanina e incluso los vinílicos no suelen ser suficientemente potentes para garantizar la fluidez necesaria.

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

Ambroise (2001), utilizó como aditivo cohesionante una solución de almidón modificado, con un contenido de sólidos de 20%.

2.5 MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN DE LOS HAC

2.5.1 Introducción

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

En la bibliografía se insiste en la necesidad de utilizar una alta cantidad de finos ya que sirven para dar cohesión a la mezcla y para evitar la segregación (Okamura 1996, Chai 1998, Petersson, Bilberg y Van 1999, Cariacedo 1999, Xie 2002, Gomes 2002, de la Cruz 2006, ACI 273R-07).

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

- Puentes:
 - Akashi-Kaikyo, Japón 1998 (Kashima y otros 1999)
 - Gävle y Strängnäs, Suecia 1998 (Bilberg, Petersson, Österberg 1999)
 - Granby, Suecia (Emborg 1999)

- Tuneles:
 - Ensayos a escala real, Suiza 1999 (Wetzig 1999)
 - Cleuson Dixence (1998) y Loetschberg (1999), Suiza (Botte, Burdin, Zermatten 1999)
 - Kalhäll, Suecia 1998/9 (Emborg 1999)

- Prefabricados :
 - El proyecto Belton, Holanda 1998 (Bennenk 1999)

A continuación se presentan algunos métodos propuestos y sus evoluciones.

2.5.2 Ensayos previos sobre pastas y morteros

Muchos criterios de dosificación se han planteado como un proceso en el que se optimiza por separado las pastas, morteros y esqueleto granular, así como las proporciones entre ellos.

Se incluyen en este apartado algunos ensayos que se han desarrollado para caracterizar las pastas o morteros empleados en HAC con la finalidad de servir de base para la dosificación de estos hormigones.

Para evaluar las características del mortero y de los materiales utilizados en su composición, como adiciones (finos), arenas y aditivos, Okamura (2000) propuso la utilización de dos ensayos.

El primero (fig. 2.25) es el ensayo de flujo de morteros. Este ensayo es similar al Ecurrimiento comentado en 2.3.3, con un molde de menor dimensión y un procedimiento idéntico. El resultado del ensayo se expresa por medio de del parámetro G_m , ecuación 2.7.

$$G_m = (d_1 d_2 - d_0^2) / d_0^2 \quad (2.7)$$

Tras el ensayo se mide dos diámetros, d_1 y d_2 , perpendiculares de la huella del hormigón siendo d_0 es el diámetro inferior del cono.

El segundo ensayo, denominado Embudo en V para morteros (fig.2.26) se corresponde también con un ensayo a escala del embudo en V para hormigones comentado en 2.3.4. Del ensayo se obtiene el tiempo t (en segundos) que tarda la muestra en fluir a través del embudo. El resultado se expresa por medio del parámetro $R_m = 10/t$. Altos valores de G_m indican una gran capacidad de deformación y bajos valores de R_m indican una alta viscosidad de la mezcla.

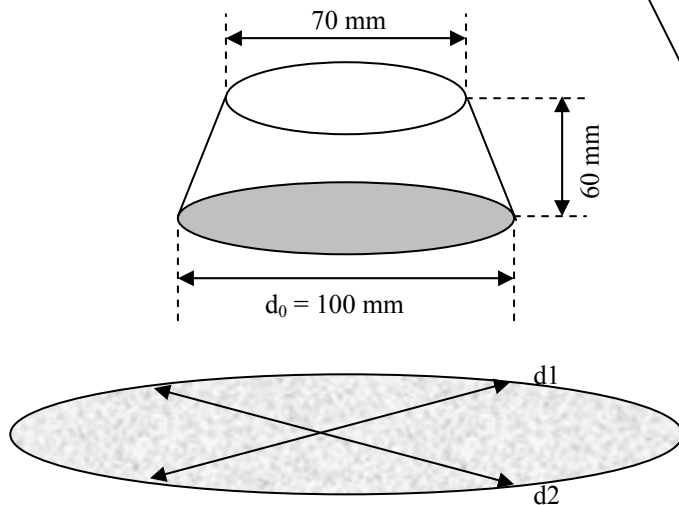


Figura 2.25 Ensayo de flujo de mortero

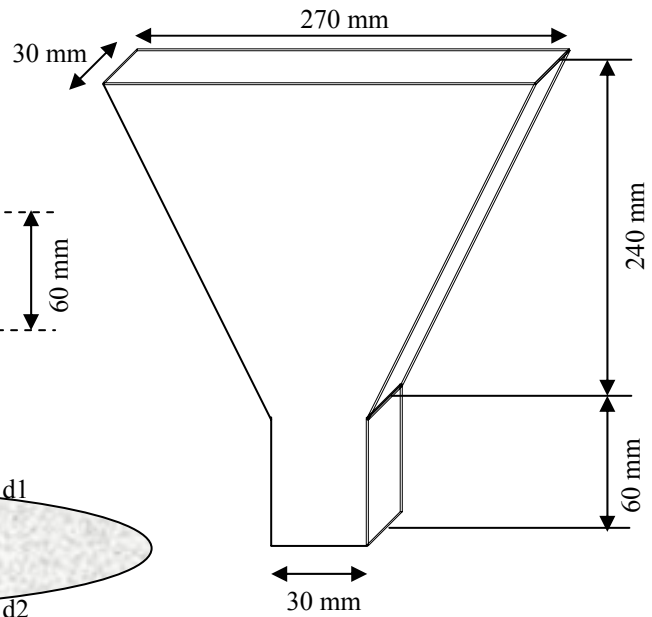


Figura 2.26 Ensayo de embudo en V para mortero

En la Universidad Politécnica de Cataluña Gomes y otros (2002) han utilizado los ensayos de Cono de Marsh y mini-slump para definir la composición óptima de la pasta utilizada para fabricar un hormigón autocompactante de alta resistencia.

El ensayo del cono de Marsh (De Larrard, 1990) con apertura de salida de 8 mm (fig. 2.27) analiza la fluidez de las pastas. El procedimiento consiste en introducir un litro de pasta en el cono y medir el tiempo (T) que tarda en fluir por la apertura inferior una cantidad de 500 ml.

El mini-slump, propuesto por Kantro en 1980, consiste en un molde tronco-cónico (fig. 2.28) que se rellena con la muestra de pasta a ensayar. Como parámetros se mide el diámetro final y el tiempo transcurrido entre el inicio del ensayo y un diámetro de 115 mm (T_{115}).

Gomes concluye que la relación óptima de cada pasta es aquella que presenta un diámetro de extensión de 180 ± 10 mm y tiempos T_{115} entre 2 y 3,5 s.



fig.2.27 Cono de Marsh

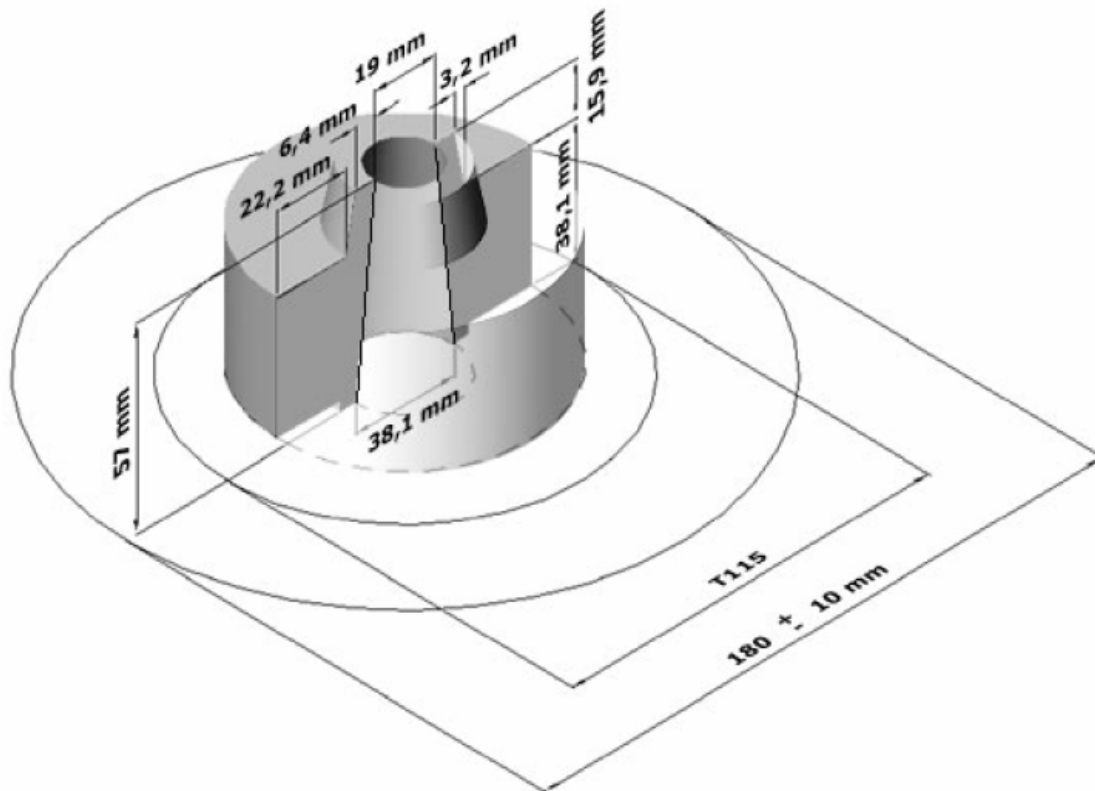


Fig. 2.28 Mini-slump (Cavalcanti 2006)

2.5.3 Método General para la dosificación del HAC

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

El procedimiento se describe a continuación:

Se considera como árido grueso todas las partículas retenidas en el tamiz de 5 mm.

Se considera árido fino la fracción granulométrica entre 0.09 mm y 5 mm.

Se considera como finos todas las partículas de tamaño inferior a 0.09 mm.

Se determina la densidad de conjunto del árido grueso en Kg/m^3 (UNE 83134-90).

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

Este criterio suele conducir a dosificaciones de aproximadamente 800 kg/m^3 de árido grueso, lo que representa un volumen sólido del orden del 30 – 34% del volumen total del hormigón. Las cuantías así obtenidas son sensiblemente inferiores a las normalmente empleadas en hormigones tradicionales.

El resto del volumen de hormigón se completa con un mortero. El volumen sólido del árido fino debe ser el 40% del volumen del mortero.

Las proporciones relativas de agua, cemento, aditivo y otros finos que deben completar el resto del volumen del hormigón se determinan por medio de ensayos sobre morteros. La relación agua/cemento o agua/material cementante en general estará condicionada por las exigencias mecánicas y de durabilidad del hormigón. Con estas limitaciones se realizarán ensayos optimizando las dosificaciones de los componentes mediante pruebas de flujo y embudo en V para morteros.

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

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

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

2.5.4 Otras propuestas de dosificación basadas el método general

Siguiendo la línea del método general Edamatsu, Nishida y Ouchi en 1999 desarrollaron un método para determinar el contenido de árido fino del mortero. Para ello ensayaron morteros fabricados con arenas, de distintas procedencias (rodada, machacada), granulometrías, y distintos tipos de finos (cemento, filler calizo, ceniza volante, escoria). La interacción entre mortero y árido se analizó sobre mezclas en las cuales se utilizó “áridos” de cristal, con diámetro máximo de 10 mm, en una proporción del 20% del volumen del mortero. Los ensayos se llevaron a cabo utilizando el ensayo de embudo en V para morteros (fig.2.19). La razón entre los tiempos de embudo, para un mismo mortero con y sin áridos de cristal, se presenta como un índice de la capacidad de llenado del hormigón y permite reducir el volumen de pasta utilizado en el hormigón.

En la Universidad de Delft, Pelova (1998), limitando el tamaño máximo del árido grueso a 16 mm y logró encontrar el máximo factor de empaquetamiento de la mezcla aumentando del 50 al 60% la cantidad de árido grueso utilizada en la dosificación (RILEM – Report 23). Con ello se consigue que el contenido de pasta sea 10% menor que la utilizada en el “Método General”.

En el University Collage London, Chai y Domone (1999) han llevado a cabo estudios sobre hormigones fabricados con áridos machacados de diámetros máximos 10 y 20 mm, distintos tipos de finos (residuos de ceniza de palma, escoria de alto horno o filler calizo) y sin la utilización de agentes modificadores de la viscosidad.

Al igual que en el método general, la máxima relación a/finos, para mantener la resistencia a la segregación, se obtiene a través del ensayo de flujo de morteros (fig. 2.24). Los ensayos sobre hormigón se llevan a cabo utilizando los ensayos de Ecurrimiento, embudo en V y caja U. Los valores objetivos de estos ensayos varían en función del tamaño máximo del árido y se presentan en la tabla 2.7.

Como diferencia respecto al método general este método, al igual que lo propuesto en Delft, presenta la posibilidad de utilizar un mayor volumen de árido grueso, siempre que su diámetro máximo no supere los 10 mm.

Diámetro máximo de árido (mm)	Escurrimiento (mm)	Embudo V (s)	Caja U (mm)
20	650 – 700	4 - 10	300 - 350
10	600 - 700	2 - 4	300 - 350

Tabla 2.7: Valores de ensayo University College London

2.5.5 Método CBI (Swedish Cement and Concrete Research Institute)

La principal diferencia entre este método propuesto por Petersson (1996) y Bilberg(1999) y el método general esta en la forma de se determinar el contenido de árido y consecuentemente el volumen de pasta. Este método tiene en cuenta el volumen de vacíos entre áridos, su efecto en la capacidad de paso (riesgo de bloqueo) y las características del mortero.

El método consiste en encontrar el mínimo volumen de pasta capaz de hacer fluir el hormigón sin que se produzca el bloqueo entre las armaduras. Para ello se mide inicialmente el volumen de huecos en el esqueleto granular de la mezcla entre arena y grava, de acuerdo con la norma ASTM C29/CM29. Se busca la combinación que presente la mayor densidad.

El riesgo de bloqueo se analiza fabricando hormigón con un determinado árido y unas condiciones de armado. El árido se caracteriza por medio de un tamaño:

$$D_{af} = M_{i-1} + \frac{3}{4}(M_i - M_{i-1})$$

M_i = diámetro máximo del árido

M_{i-1} = diámetro mínimo del árido

La dificultad de ejecución se valora según la distancia entre armaduras “C”, como el co.. C/D_{af} .

Se fabrican hormigones con diferentes dosificaciones de árido (V_{abi}/V_t) y se ensaya la caja en L para diferentes separaciones entre armaduras. En su estudio Peterson ha utilizado, en la caja L, barras de 12mm, espacios entre barras de 34 mm y considera que se produce bloqueo cuando el parámetro h_2/h_1 no alcanza el valor de 0,8.

De este modo se encuentra el máximo valor (V_{abi}/V_t) para cada (c/D_{af}), con el cual se produce el bloqueo. Fig. 2.29.

Donde:

V_t = volumen total de hormigón

V_{abi} = volumen de bloqueo del árido i ;

c = espacio entre armaduras

Si se pretende utilizar varios áridos se obtiene una curva como la de la figura n° 2.28 para cada un y se admite que el volumen de bloqueo en la mezcla de varios de ellos puede obtenerse por la ecuación 2.8 propuesta por Ozawa:

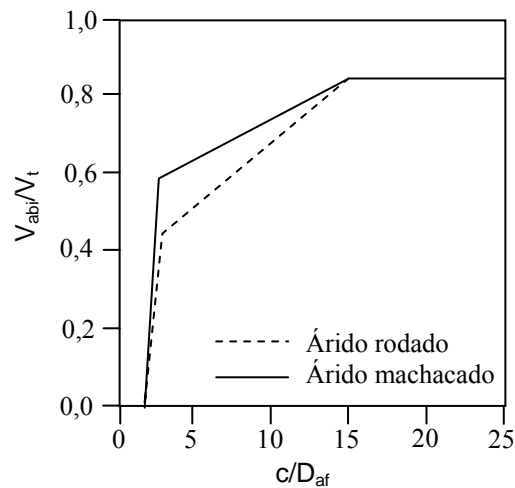


Figura 2.29. Relación entre el cociente (V_{abi}/V_t) y el cociente (c/D_{af})

$$\sum_{i=1}^n (n_{ai} / n_{abi}) = \sum_{i=1}^n (V_{ai} / V_{abi}) = 1 \quad (2.8)$$

donde:

$n_{abi} = V_{abi} / V_t$

V_{ai} = volumen de árido del grupo i ;

Estos resultados pueden expresarse por medio de una curva límite de bloqueo como la indicada en la fig. 2.30. Cualquier dosificación con contenido en pasta sobre el valor de esta línea podrá utilizarse sin riesgo de bloqueo. Evidentemente existe una línea límite para cada distancia entre armaduras.

Esta línea se supone independiente de la calidad de la pasta siempre que no se produzca segregación

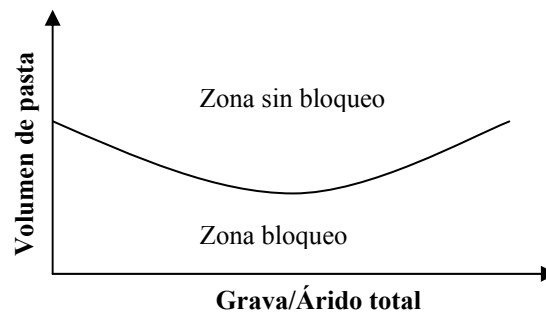


Figura 2.30. Curva límite de bloqueo.
Petersson 1996

La determinación del contenido de finos, considerando como tales las partículas menores que 0,250 mm, de agua y de superplastificante se ajustan mediante la utilización de un viscosímetro coaxial. Asimismo, Peterson recomienda que el contenido en finos se encuentre entre 500 y 525 Kg/m³.

Los ajustes finales en la mezcla se realizan utilizando los ensayos de Ecurrimiento y caja L. Los criterios utilizados son, diámetros finales entre 670 y 720 mm, para el Ecurrimiento y valores de h1 inferiores a 110 mm en la caja L (ver apartado 2.3).

2.5.6 Método LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)

El método desarrollado en el LCPC por Sedran (1996), consiste en utilizar un modelo computacional, conocido como “Solid Suspensión Model” para optimizar el esqueleto granular compacto con el mínimo de huecos. El programa tiene en cuenta:

- La granulometría y tipo de los distintos áridos
- La granulometría de los distintos filleres
- Las características del encofrado a rellenar (efecto pared, armaduras...)
- El tipo de mezcla deseada, que para HAC debe adoptarse a una suspensión de sólidos en la pasta

La elección de los materiales, conjunto granulométrico, compatibilidad entre cemento y superplastificante, adiciones y contenido en cemento, será basada en experiencias anteriores.

El procedimiento de dosificación empieza fijándose dos parámetros. Por un lado el Ecurrimiento debe estar comprendido entre 60 y 70 cm (o el esfuerzo de corte inicial de la mezcla debe ser inferior a 500 Pa, medido con el rehometro BTRHEOM). Por otra parte la viscosidad plástica del hormigón debe ser inferior a 200 Pa.s, para garantizar buena trabajabilidad y capacidad de llenado, y superior a 100 Pa.s, para evitar que ocurra segregación. Asimismo, estos datos de viscosidad y esfuerzo de corte inicial se encuentran en un rango de valores bastante más amplio que los presentados por Wallevik (2003), tabla 2.1 del apartado 2.2.3.

Inicialmente se establecen los criterios de proyecto: La resistencia a 28 días, la geometría y armadura del elemento a fabricar.

Considerando lo anterior, la composición de la mezcla debe seguir los siguientes pasos:

- Inicialmente fijar una proporción de finos relativa entre los finos a utilizar;
- Se obtiene el punto de saturación del aditivo para este conjunto de finos utilizando el cono de Marsh. de Larrard (1990) y Sedran (1996);
- Se determina la demanda de agua de los finos con el aditivo fijado anteriormente;
- Se calcula por medio del programa RENE-LCPC la estructura granular, el contenido de pasta y se fijan los parámetros reológicos del hormigón;
- Se realizan amasadas, de aproximadamente 15 litros de hormigón, para ajustar el contenido de agua hasta que se obtenga la viscosidad fijada en el punto anterior, usando para ello el rehometro;
- Se vuelve a ajustar la proporción de aditivo de acuerdo con el Escurrimiento (o con el esfuerzo de corte inicial) inicialmente fijado.
- Se comprueba la resistencia del hormigón. Si la resistencia es muy alta o muy baja se prueba una nueva proporción de finos.
- Finalmente se comprueba la capacidad de llenado del hormigón utilizando la caja U.

2.5.7 Método UPC (Universidad Politécnica de Cataluña)

En 2002 Gomes propone una metodología para la obtención de HACAR (Hormigones Autocompactantes de Alta Resistencia), que también está fundamentada en optimizar por separado la composición de la pasta y del esqueleto granular.

Primeramente se establecen las relaciones, en peso, de agua/cemento, microsilíce/cemento (en su caso), superplastificante sólido/cemento y filler/cemento.

La relación entre los componentes conglomerantes y la relación a/c se fijan en función de las características del hormigón a obtener.

El humo de sílice se fija en un 10% del peso del cemento. La relación a/c empieza en el límite superior de 0,4 y posteriormente se va disminuyendo hasta que se obtenga el nivel de resistencia deseado. La demanda de agua del filler y de la microsilíce se evalúa utilizando el ensayo de Vicat según la norma ASTM C 187(1986).

La dosificación del superplastificante se determina buscando el punto de saturación con el ensayo de cono de Marsh. (Gomes 2000) descrito en el apartado 2.5.0. Gomes define como punto de saturación la relación entre superplastificante y cemento (sp/c) para la cual un incremento en la dosificación de superplastificante no provoca mejoras significativas en la fluidez de la mezcla (Gettu e otros 1997). Realizando variaciones sobre la relación sp/c se obtiene la curva $\log(T)sp/c$ en la cual se busca la relación sp/c correspondiente a un ángulo interno de $140^{\circ} \pm 10^{\circ}$ (Gomes 2000).

Tras fijar el punto de saturación se determina la dosificación óptima de filler mediante el ensayo de mini-slump.

La composición del esqueleto granular, se determina experimentalmente, realizando el ensayo ASTM C29/CM29(1986), donde se mezclan distintas proporciones de arena y gravas sin ningún tipo de compactación. Mediante series de ensayo se busca las proporciones con las que se consigue una mayor compacidad

Terminada la optimización por separado, se fabrican hormigones con distintos contenidos de pasta, buscando el volumen que mejor se adapte a cada aplicación. Los

hormigones son evaluados utilizando ensayos como el Escurrimiento, la caja L y el embudo en V (ver apartado 2.3).

2.5.8 Método EFNARC

EFNARC es un órgano europeo que está dedicado a sistemas específicos de hormigón y productos químicos y en 2002 publicó una guía para la obtención de HAC.

Desde entonces, dicha guía ha sufrido algunas modificaciones hasta que en el 2005 ha dado origen a la Guía Europea para HAC

De acuerdo con su guía para la obtención de HAC publicada en 2002 la composición de la mezcla debe satisfacer todos los criterios de rendimiento para el hormigón tanto en estado fresco como endurecido.

Para evaluar el estado fresco del hormigón, EFNARC utiliza los ensayos con los respectivos límites presentados en la tabla 2.8

La tabla 2.9 presenta los valores que en la actualidad están definidos en la Guía Europea para HAC. Se observa que la Guía Europea propone únicamente de cuatro ensayos, lo que representa una reducción importante en el número de ensayos que se realizan para definir un hormigón como autocompactante.

Método	Unidad	Margen habitual de valores	
		Mínimo	Máximo
Escurrimiento	mm	650	800
T50	Segundos	2	5
Anillo j	Mm	0	10
Embudo V	Segundos	6	12
Embudo V a 5min	Segundos	0	+3
Caja L	(h2/h1)	0.8	1.0
Caja U	(h2-h1) mm	0	30
Vesel test	%	90	100
Ensayo de estabilidad gtm	%	0	15
Orimet	Segundos	0	5

Tabla 2.8 Parámetros de ensayos según EFNARC 2002

Escurrecimiento	Criterio
Clase de asentamiento SF1	$550 \leq SF1 \leq 650$
Clase de asentamiento SF2	$560 \leq SF1 \leq 750$
Clase de asentamiento SF3	$760 \leq SF1 \leq 850$
Embudo V	
Clase de ensayo VF1	≤ 8
Clase de ensayo VF2	$9 \leq VF2 \leq 25$
Caja L	
Clase de ensayo PA1	$\geq 0,8$ con 2 obstáculos de barras
Clase de ensayo PA2	$\geq 0,8$ con 3 obstáculos de barras
Segregación	
Clase de ensayo SR1	≤ 20
Clase de ensayo SR2	≤ 15

Tabla 2.9 Parámetros de ensayos según la Guía Europea 2006

En cuanto a método de dosificación, la Guía Europea no presenta ninguna propuesta en particular y se remite a documentos como el de Gomes (2002) o el propio procedimiento de EFNARC. Sin embargo, presenta una indicación de rangos típicos de los componentes del HAC pero sin ánimo de que dichos rangos se presenten como restrictivos. Estos rangos se presentarán al final de este capítulo.

Para preparar la dosificación, EFNARC propone un método “paso a paso” (figura 2.31) imponiendo una serie de requisitos:

- Relación agua/finos en volumen de 0,80 a 1,10;
- Contenido total de finos de 160 a 240 litros (400 – 600 kg) por metro cúbico;
- La arena se define como todo material de granulometría entre 0.125 y 4 mm.

El proceso paso a paso consiste en:

1- El contenido en aire suele fijarse en un 2%. Se utilizará valores superiores en los casos donde se quiera diseñar hormigones resistentes a los ciclos hielo-deshielo.

2- La relación agua/cemento se selecciona sobre la base de los requisitos de EN 206. Normalmente el contenido de agua no supera los 200L/m³.

3- El volumen del árido grueso, al igual que en el método general, se fija en función de su densidad. Esta debe estar entre el 50 y el 60% de la densidad de conjunto del árido grueso. Además, establece que será tanto mayor cuanto menor sea su tamaño máximo. Y que los áridos rodados pueden ser utilizados en mayor proporción que los machacados. Se suele fijar entre el 28 y el 35% del volumen de la mezcla.

4- El contenido de arena debe variar entre 40 y 50% del volumen del mortero y se definirá en función de las propiedades de la pasta.

5- El diseño de la pasta se hace fijando la relación agua/finos, β_p de referencia, a partir del ensayo de flujo en cono de mortero.

Para ello se realizan ensayos sobre pastas con la combinación de cemento y adiciones inicialmente elegida variando la relación agua /finos (en volumen). Sobre los resultados se realiza una regresión y se define el punto de intersección con el eje de ordenadas. Fig. 2.32. La ordenada en este punto “ β_p ” es la relación agua finos seleccionada.

6- La determinación de la relación agua/finos a utilizar y de la dosificación de superplastificante se realiza por medio de los ensayos de flujo en cono de morteros y embudo en V para morteros (apartado 2.5.0). Para ello se realizaran distintas amasadas variando la relación agua/finos en el margen de $[0,8 - 0,9] \beta_p$. Los valores requeridos son: entre 240 y 260 mm en el flujo de morteros y entre 7 y 11 segundos en el embudo V para morteros.

7- Finalmente se ajustan los parámetros realizando ensayos sobre el hormigón, fijando definitivamente la dosificación de grava y por tanto la relación grava/mortero.

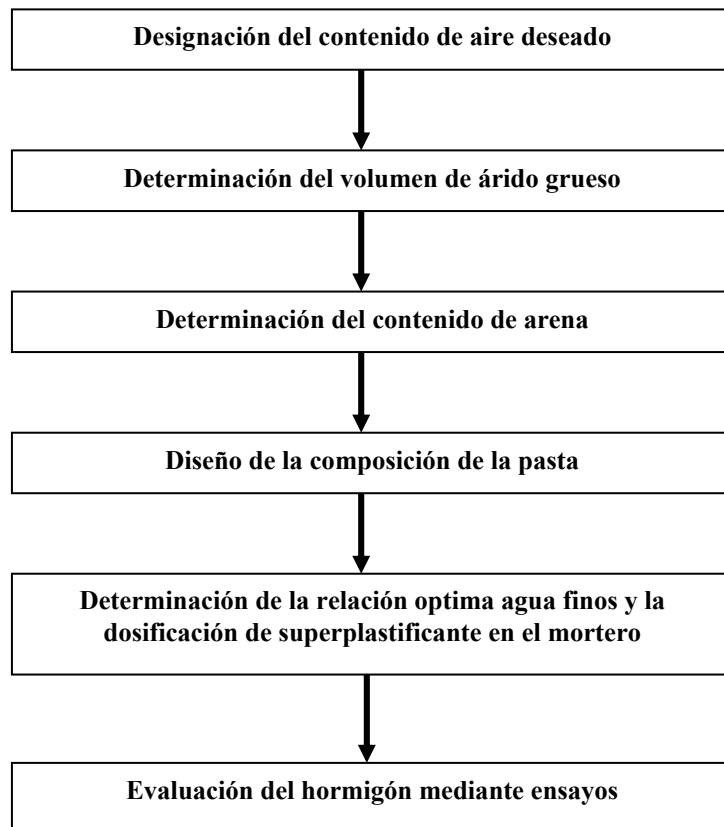


Figura 2.31. Pasos para la obtención del HAC según EFNARC

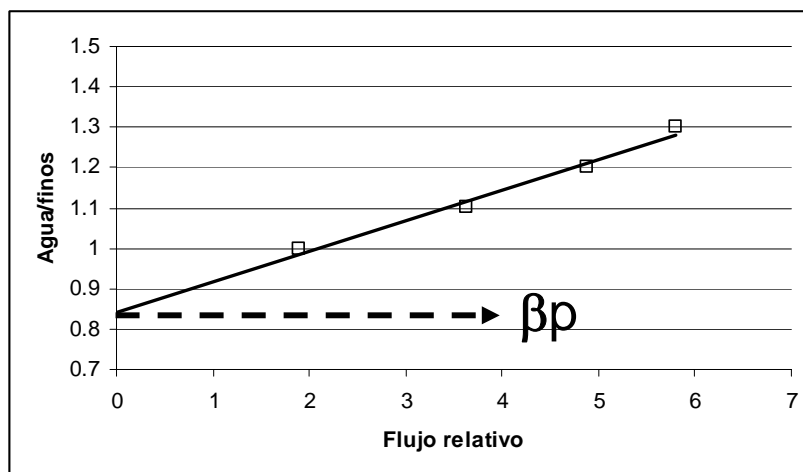


Fig. 2.32 Definición de β_p

2.5.9 Método ACI (American Concrete Institute)

El método de dosificación del ACI (2007) es similar al propuesto por EFNARC. Se parte de un criterio inicial, donde se define el comportamiento del Ecurrimiento deseado.

A continuación se ajustan las proporciones de los materiales siguiendo las recomendaciones de las tablas 2.10 y 2.11.

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

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

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

Tabla 2.10 Sugerencia del ACI para el contenido en finos

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

Tabla 2.11. ACI - Valores recomendados para dosificar un HAC

2.6 CONSIDERACIONES FINALES

De una manera general, la obtención de un HAC puede ser resumida en el esquema mostrado en la fig. 2.33 (Ouchi M, Ozawa K, y Okamura H; 1998).

La tabla 2.12 extraída del trabajo de Gomes (2002) presenta las dosificaciones y parámetros utilizados por algunos autores en la obtención del HAC.

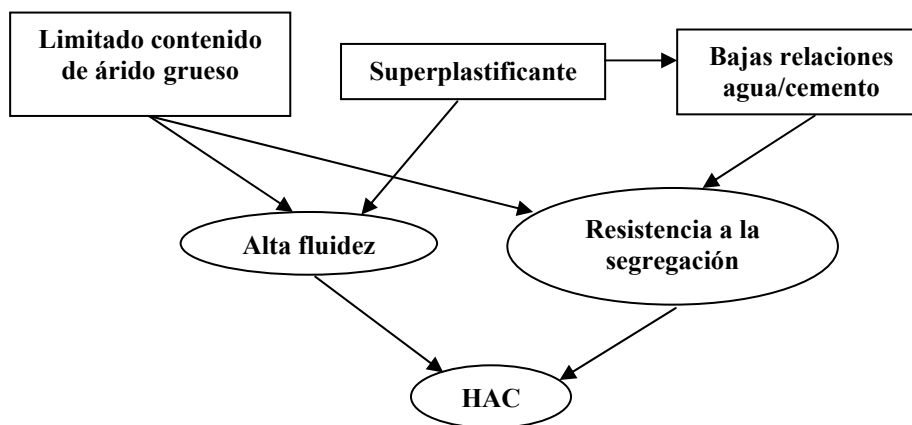


Figura 2.33 Esquema propuesto para la obtención de HAC

Mezclas (Kg/m ³)	Autores							
	Nagataki (1995)	Domone (1997)	Kim (1996)	Sakata (1996)	Sedran (1996)	Bartos (1999)	Umehar a (1999)	Su (2001)
Cemento	250 – 200 – 390	218	370	331 – 331	350	280	360	300
Ceniza Volante	0.0 – 100 – 0.0	125	159	-	-	-	-	148
Escoria	0.0 – 200 – 0.0	280	-	-	--	-	247	63
Filler	250 – 0.0 – 0.0	-	-	216 – 216	134	240	-	-
Arena	805 – 704 – 829	686	782	713 – 713	852	865	774	928
Grava	-	-	-	-	-	-	-	-
10 mm	-	-	-	-	363	-	-	-
16 mm	-	-	-	-	-	-	803	-
20 mm	820 – 898 – 920	785	820	888 – 888	571	750	-	718
Superplastificante	8.5 – 6.0 – 11.7	8.2	10.0	1.8 – 2.5%	7.1	4.2	6.40	8.8
Agente de viscosidad	0.0 – 0.0 – 5.0	-	0.50	0.0 – 0.35	-	-	-	-
Aire ocluido	-	0.8		0.05 – 0.02	-	-	-	-
A/C	-	0.82	0.50	0.50	0.48	0.71	0.49	0.57
*A/Finos	-	0.28	0.35	0.30	0.34	0.36	0.29	0.40

Tabla 2.12 Dosificaciones de HAC propuestas por distintos autores. (Gomes - Septiembre 2002).

*Relación agua/finos medida en peso.

La tabla 2.13 presenta una serie de dosificaciones basadas en los métodos anteriormente descritos y que fueron aplicadas a alguna obra real y la tabla 2.14 presenta otras dosificaciones utilizadas por varios autores en sus investigaciones. Se destaca una gran variación en el contenido en finos y, contenido y tamaño máximo de los áridos utilizados. Los contenidos en finos varían entre aproximadamente 700 Kg, si se considera el material fino aportados por los áridos y 400 Kg, que es lo que puede tener un hormigón tradicional con alto contenido en cemento. Por otro lado, las cuantías de grava van desde cantidades muy bajas, 495 kg (Spengler 2001) hasta 950 kg, con tamaños máximos de áridos de 20 o 40 mm.

Así, se observa que los HAC, al igual que los HT, pueden fabricarse de distintas formas, con distintos materiales, distintas características y para distintas aplicaciones, y que el éxito a la hora de dosificar un HAC no está únicamente vinculado a la utilización de grandes volúmenes de finos y pasta o al limitado contenido y tamaño máximo de los áridos, como suele, en muchos casos estar recomendado en la bibliografía.

Método	General	CBI	LCPC	UPC
Aplicación	Puente Akashi-Kaikyo	Puente Strängnäs	Elemento Protección Puerto	Tunel Camp Magre
Referencia	Okamura 1996 Okamura 1999	Bilberg 1999	Sedran 1996	Pintado 2005
Dosificación Kg/m³				
Cemento	260	415	350	492
Agua	145	166	168	188
Arena	769	851	852	373 (0/2mm) 508 (0/5mm)
Grava	965	797	363 (4/10 mm) 571 (10/20 mm)	684 (6/12mm)
Finos añadidos	150 (LS)	180 (Filler)	134 (Filler)	93 (filler) 49 (Humo de sílice)
Dmax	40 mm	16 mm	20 mm	12 mm
MPa	24 (91 días)	62.3	50	80

Tabla 2.13. Dosificaciones utilizadas en aplicaciones reales

Autor	Trägårdh 1999	Wetzig 1999	Bettencourt 2001	Spengler 2001	Khrapko 2005	Grünewald 2005	de la Cruz 2006
Centro	Swedish Cement and concrete research Institute - Suecia	Hagerbach test gallery Ltd. - Suiza	Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil - Portugal	Technische Universitaät Manchen - Alemania	W Stevenson & Sons Ltd – Nueva Zelanda	Universidad Tecnológica de Delft - Holanda	Universidad Politécnica de Cataluña
Dosificación Kg/m³							
Cemento	401	380	205	340	400	388	373
Agua	161	182	195	187	171	174	187
Arena	872	950	786	1013	363 (0/1mm) 545 (0/5mm)	875	620 (0/2mm) 413 (0/5mm)
Grava	658	193 (4/8mm) 615 (8/13mm)	786	495	297 (5/10mm) 446 (10/13mm)	770	689
Finos añadidos	170 (filler)	80 (filler)	102 (ceniza volante) 256 (filler)	240 (ceniza volante)	150 (ceniza volante)	123 (ceniza volante)	112 (filler)
Finos totales*	571	460	563	580	550	511	485
Dmax	16 mm	16 mm	14 mm	16mm	13 mm	16 mm	12 mm

Tabla 2.14 Dosificaciones utilizadas en investigación.

* No considerados los finos aportados por los áridos

CAPÍTULO 3

MATERIALES, METODOLOGÍA, CRITERIOS DE ENSAYO Y PROCEDIMIENTOS

3.1 INTRODUCCIÓN

En el este capítulo se presentan los materiales y se detallan los procedimientos utilizados durante el desarrollo de los trabajos realizados.

Se incluyen un primer apartado en el que se describen los métodos de ensayo de caracterización normalizados tanto aplicados a componentes como a los propios hormigones, comentando los aspectos específicos en los que el procedimiento empleado se ha salido del criterio normalizado.

A continuación se comentan otros ensayos empleados para aspectos concretos de este estudio y que se han dirigido al conocimiento específico de alguna propiedad de especial interés desde el punto de vista de la caracterización de las materias primas o de las propiedades del hormigón autocompactante.

En este sentido se considera, por ejemplo, los análisis por espectrometría infrarroja o termogravimetría que se desarrollaron para caracterizar a los aditivos empleados, o el ensayo ECADA que analiza las propiedades adherentes de las armaduras activas al

hormigón y que ha sido aplicada para comparar los HAC con los HT en su comportamiento mecánico.

Los apartados 3.5 y 3.6 desarrollan los procedimientos operatorios que han sido desarrollados para los trabajos realizados con la intención de precisar la metodología empleada y su posible influencia en la calidad de los resultados.

Finalmente en el apartado 3.7 se incluye la descripción de una propuesta de modelos reducidos para la realización de los ensayo de caracterización de las propiedades de los HCA en estado fresco

3.2 MATERIALES

Como se pudo observar en el estado del arte, los HAC están compuestos básicamente de los mismos materiales utilizados para fabricar un hormigón tradicional. Por ello, en esta tesis se pretendió utilizar una amplia gama de materiales para cubrir el mayor número de combinaciones posibles, sobretodo en lo que respecta a los cementos, aditivos y a la existencia de compatibilidad entre ellos.

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

3.2.1 Cementos:

Puesto que no existen limitaciones en cuanto al cemento, en este trabajo e utilizaron tres tipos de cemento con el objetivo de fabricar hormigones de distintas características y resistencias. Estos fueron:

- CEM I – 52.5 R
- CEM II/B–V 42.5 R
- CEM II/B–(V–LL) 32.5 N

Todos suministrados por Lafarge Asland, S.A. procedentes de la fábrica de Sagunto.

Las características físicas y químicas, así como las normas utilizadas en la caracterización se presentan en el anejo X de este documento. Asimismo las resistencias a flexo tracción y a compresión se comprobaron en muestras aleatorias en distintos suministros de acuerdo con la norma UNE-EN 196-1 parte 1: “Métodos de ensayo de cementos - Determinación de resistencias mecánicas”. En todos los casos los cementos utilizados cumplían los parámetros especificados para cada uno de ellos.

3.2.2 Adiciones

Como adiciones se utilizó:

- Un Filler calizo de machaqueo
- Un polvo de mármol o Marmolina

Ambas adiciones son materiales completamente inertes compuestos básicamente por carbonato cálcico.

El filler resulta del machaqueo de los áridos calizos de cantera. Es un material muy fino y presenta mas de un 90% de sus partículas con un tamaño inferior a 0,063 mm.

La marmolina es un material procedente del corte del mármol. Su granulometría cubre las fracciones entre 50 y 125 μm que no aportaban los otros finos empleados. Además, aporta otra importante fracción en la gama de las arenas finas (0,125 a 1 mm). Su utilización proporciona una continuidad en la curva granulométrica del hormigón cubriendo la franja entre la arena 0/4 mm y los materiales finos (cemento y filler). La figura 3.1 presenta las distribuciones granulométricas del filler, marmolina y de un cemento tipo CEM I 52.5 R.

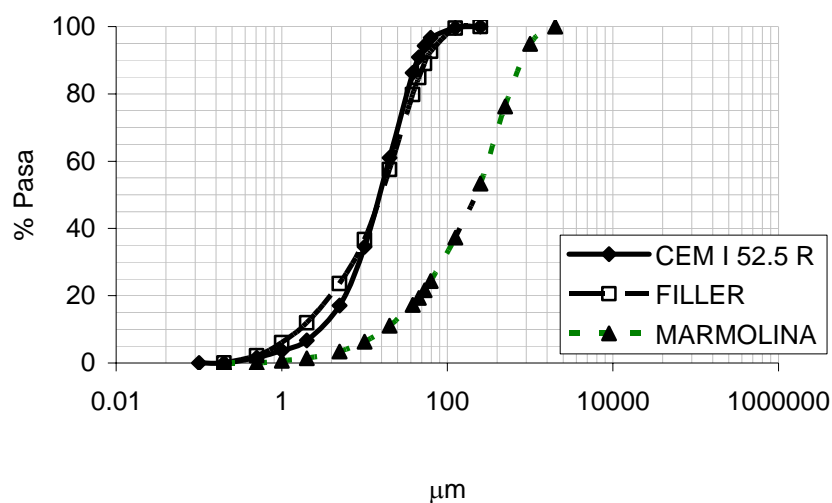


Fig.3.1 Granulometría de los materiales finos

3.2.3 Áridos

En general tampoco existen limitaciones en cuanto al tipo de los áridos a se utilizar en la fabricación de un HAC por lo que a lo largo de este trabajo se decidió probar dos tipos distintos de arenas a saber:

- Una arena rodada 0/4 mm lavada de río suministrada por Graveras Castellana (Población de Ademús).
- Una arena machacada 0/4 mm de cantera suministrada por Soinval (Población de Buñol).

Estas dos arenas presentan una diferencia muy importante en cuanto al contenido en finos (< 0.63 mm). Mientras que la arena rodada presenta tan solo un 3.5% de material inferior a este tamaño, la arena machacada llega a aportar hasta un 11.5%. Dato que se debe tener en cuenta a la hora de dosificar un HAC.

En cuanto a los áridos gruesos, se han utilizado tres gravas con distintas granulometrías. : Todas procedentes de la cantera de la empresa Soinval (Población de Buñol.).

- Una grava 4/7 mm de machaqueo
- Una grava 7/12 mm de machaqueo
- Una grava 10/20 mm de machaqueo

La fig. 3.2 presenta la distribución granulométrica de los áridos.

Para garantizar la constancia de las características de los áridos, regularmente se realizaban ensayos de coeficiente de absorción y contenido en finos para las arenas y gravas de acuerdo con las normas UNE 83-134/90 “Determinación de las densidades, porosidad, coeficiente de absorción y contenido en agua del árido grueso” y UNE 83-133/90 “Determinación de las densidades, porosidad, coeficiente de absorción y

contenido en agua del árido fino”. Además, las granulometría de los áridos, arenas y gravas, se mantenían controladas por el método de tamizado de acuerdo con la norma UNE - EN 933-1 parte 1 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Determinación de la granulometría de las partículas – Método del tamizado”.

Los resultados indicados en la tabla 3.1 son los valores medios de los ensayos de absorción, densidad y contenido en finos.

Material	Absorción (%)	Densidad (Kg/dm ³)	Contenido en finos (%)
Arena rodada 0/4 mm	0,58	2,5	3,5
Arena 0/4 mm de machaqueo	1,25	2,6	1,4
Grava 4/7 mm de machaqueo	1,25	2,6	1,4
Grava 7/12 mm de machaqueo	1,25	2,6	1,4
Grava 10/20 mm de machaqueo	1,25	2,6	1,4

Tabla 3.1 Ensayos de absorción, densidades y contenido en finos para la arena y gravas.

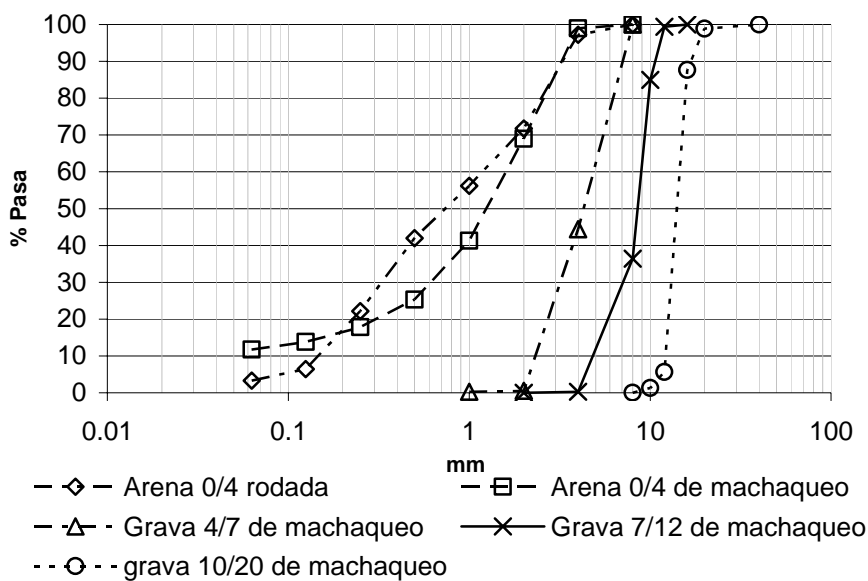


Fig 3.2. Granulometría de los áridos

3.2.4 Aditivos

Los aditivos son materiales imprescindibles a la hora de dosificar un HAC. Los reductores de agua de alto rango (RAAR), también conocidos como aditivos de 3ª generación aportan la fluidez necesaria al hormigón a la vez que permite una reducción en la relación a/c. Por otra parte, los cohesionantes, como dice el propio nombre, cohesionan la mezcla de hormigón evitando la segregación en los casos donde la granulometría de la dosificación no aporta suficientes finos.

Asimismo, la dosificación de un HAC requiere cuidados especiales con respecto a los aditivos, ya que estos hormigones son muy sensibles y pequeñas variaciones en las cantidades o tipo de aditivo pueden cambiar apreciablemente el comportamiento del hormigón.

A continuación, en la tabla 3.2 se presentan los aditivos, y sus características, utilizados a lo largo de este trabajo y estudiados más detalladamente en el capítulo 5

Aditivo	Tipo	Función principal	Función secundaria	Residuo sólido(%)	Densidad (kg/l)	Aspecto
Sika Stabilizer	Polisacárido	Cohesionante	XX	4.18	1.00	Líquido marrón
Viscocrete 20HE	Policarboxilato modificado en base acuosa	Superfluidificante	XX	29.64	1.08	Líquido amarillo
Viscocrete 5900	Policarboxilato modificado en base acuosa	Superfluidificante	Retardador de Fraguado	36.21	1.09	Líquido marrón
Viscocrete 5700	Policarboxilato modificado en base acuosa	Superfluidificante	Retardador de Fraguado	36.08	1.09	Líquido marrón
Reomac 890 F	Melamina sulfonato	Agente modulador de viscosidad	XX	3.35	1.01	Líquido turbio incolor
Glenium C 370	Éter Policarboxílico	Superplastificante	Acelerador de endurecimiento	28.48	1.08	Líquido turbio amarillento
Glenium Sky 515	Éter Policarboxílico	Superplastificante	Retardador de Fraguado	30.85	1.08	Líquido marrón
Glenium C 303 SCC	Éter Policarboxílico	Superplastificante + Cohesionante	Retentor de agua	20.53	1.04	Líquido verde
Isocron FM 211	Éter Policarboxílico	Superplastificante	XX	30.59	1.08	Líquido marrón
Glenium C355	Éter Policarboxílico	Superplastificante	Acelerador de endurecimiento		1.05	Líquido ligeramente turbio

Tabla 3.2 Características de los aditivos

3.2.5 Armaduras

En los ensayos de adherencia se han utilizado como armaduras cordones de 7 alambres de acero de pretensar UNE 36094:97 Y 1860 S7 13.0.

Las principales características recogidas en el certificado de calidad del fabricante son:

- Sección 99.69 mm²
- Carga de rotura 192.60 kN
- Limite elástico a 0.2% 177.50 kN
- Módulo de elasticidad 196.70 kN/mm²

3.3 RELACIÓN DE ENSAYOS NORMALIZADOS UTILIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PASTAS, MORTEROS Y HORMIGONES O SUS MATERIALES CONTITUYENTES.

3.3.1 Ensayos de caracterización de componentes

3.3.1.1 Resistencia mecánica de cementos (UNE-EN-196-1)

La resistencia de los cementos utilizados en este trabajo se determinó de acuerdo con la norma UNE-EN 196-1 parte 1: “Métodos de ensayo de cementos - Determinación de resistencias mecánicas”.

3.3.1.2 Determinación del extracto seco convencional de los aditivos (UNE-EN 480-8)

La determinación del extracto seco convencional de los aditivos se realizó de acuerdo con la normativa UNE-EN 480-8 parte 8 “Aditivos para hormigones, morteros y pastas – Métodos de ensayo – Determinación del extracto seco convencional.

3.3.1.3 Determinación del contenido de agua (h) de los áridos (UNE 83-133-90)

Para identificar el contenido de agua existente en los áridos se ha utilizado el procedimiento establecido en las normas UNE 83-133-90 “Determinación de las densidades, coeficiente de absorción y contenido de agua en el árido fino” y UNE 83-134-90 “ Determinación de las densidades, porosidad, coeficiente de absorción y contenido en agua del árido grueso”.

Para ello se pesa una muestra del material, en su estado natural, con precisión de 0,1 g, obteniendo su masa “M”. A continuación, se seca la muestra en una estufa con temperatura a $125\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ hasta masa constante (con precisión de 0,1 g) y se obtiene su masa Ms.

Finalmente se calcula el contenido en agua, en tanto por ciento, utilizando la ecuación (3.1):

$$h = \frac{M - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3.1)$$

3.3.1.4 Determinación de la granulometría de los áridos (UNE-EN 933-1)

La granulometría de los áridos, arena y gravas, han sido obtenidas por tamizado de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1 parte 1 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Determinación de la granulometría de las partículas – Método del tamizado” (fig. 3.3).

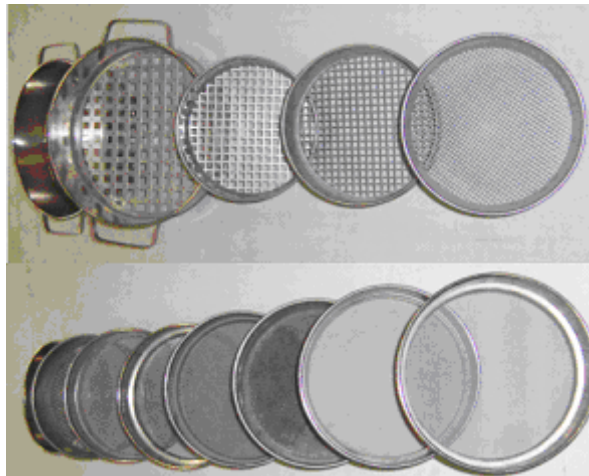


Fig. 3.3 Serie de tamices utilizados

3.3.2 Determinación de la densidad de conjunto de los áridos (ASTM C29/CM29)

El proceso seguido para determinar la densidad de conjunto de los áridos (ρ_c) se basa en la norma ASTM C29/C29M “Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate”. El proceso consiste en mezclar los áridos, en seco, en las proporciones a analizar. A diferencia de la norma, no se aplicó ningún tipo de compactación a los áridos. Con la mezcla realizada se rellena un recipiente de volumen conocido (V_c) y se pesa la misma, obteniéndose P_c . A continuación se calcula la densidad del conjunto (ecuación 3.2)

$$\rho_c = \frac{P_c}{V_c} \quad (3.2)$$

3.3.3 Otros ensayos para caracterización de áridos

Se determinaron las densidades, coeficiente de absorción y contenido en finos para las arenas y gravas de acuerdo con las normas UNE 83-134/90 “Determinación de las densidades, porosidad, coeficiente de absorción y contenido en agua del árido grueso” y UNE 83-133/90 “Determinación de las densidades, porosidad, coeficiente de absorción y contenido en agua del árido fino”.

3.3.4 Ensayos sobre pastas morteros y hormigones

3.3.4.1 Determinación de la fluidez de una pasta mediante el Cono de Marsh (UNE-EN 455)

Las pastas se fabricaron utilizando una amasadora de morteros tradicional (fig3.4) y el procedimiento de amasado consistía en verter, en el recipiente de la amasadora, primero todo el agua y a continuación, todos los materiales finos (cemento y en su caso, el filler).



fig 3.4 Amasadora de morteros

A continuación, se pone la amasadora en marcha a velocidad lenta durante un minuto. Transcurrido este tiempo se para la amasadora y con la ayuda de una paleta de goma se limpian las paredes del recipiente y la pala de la amasadora del material que pueda haberse quedado apelmazado haciendo con que éste vuelva a la amasada. Este proceso no debe tardar más de treinta segundos.

Se vuelve a poner en marcha la amasadora en velocidad lenta durante otros treinta segundos, mientras se añade el aditivo.

A continuación se pasa la amasadora a la velocidad rápida durante un minuto.

Para realizar el ensayo, se llena el cono de Marsh (fig. 3.5) a través de una rejilla (fig. 3.6) que filtra la pasta impidiendo que los grumos que puedan haber sido formados en el proceso de amasado o cualquier otro cuerpo extraño tapone la salida del cono.

Una vez completado el llenado se quita el tapón que cierra el cono por su parte inferior y se mide el tiempo que tarda en fluir un litro de material.

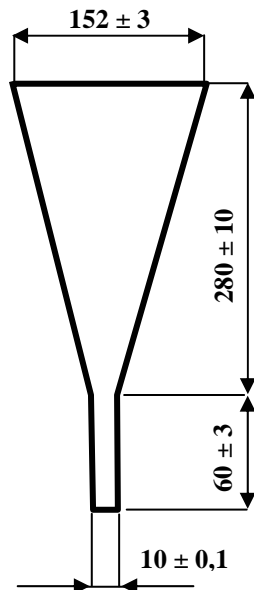


Figura 3.6 Material retenido en la rejilla del cono de Marsh

Fig 3.5 Ensayo y dimensiones del cono de Marsh

3.3.4.2 Determinación de la consistencia del hormigón (UNE-EN 12350-2)

Los hormigones tradicionales utilizados a lo largo de este estudio se caracterizó en su estado fresco utilizando el cono de Abrams de acuerdo con la norma UNE EN 12350-2:2006 “Ensayos de hormigón fresco – Parte 2: Ensayo de asentamiento”.

3.3.4.3 Caracterización de la fluidez de los HAC (UNE 83361:2007)

La caracterización de la fluidez de los HAC se llevó a cabo por medio del ensayo del escurrimiento norma UNE 83361:2007 “Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez. Ensayo del escurrimiento”. La descripción y el procedimiento del ensayo se presentan en el apartado 2.3.2

3.3.4.4 Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Anillo japonés (UNE 83362:2007)

El comportamiento de la fluidez de los HAC en presencia de barras de acero se realizó mediante el ensayo de escurrimiento con anillo japonés de acuerdo con la norma UNE 83362:2007) “Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Ensayo del Anillo japonés”. La descripción y el procedimiento del ensayo se presentan en el apartado 2.3.3. El anillo utilizado presentaba una configuración de 16 barras con diámetro de 18 mm.

3.3.4.5 Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Caja L (UNE 83363:2007)

También para la analizar la fluidez de los HAC en presencia de barras de acero se utilizó en ensayo de la caja L norma UNE 83363:2007 “Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Método de la caja en L”. Como obstáculo se utilizó 3 barras ϕ 12 mm para los hormigones con tamaño máximo de árido igual a 12 mm y 2 barras ϕ 16 mm para aquellos fabricados con áridos de 20 mm. La descripción y el procedimiento del ensayo se presentan en el apartado 2.3.5.

3.3.4.6 Determinación del tiempo de flujo – Embudo V (UNE 83364:2007)

La capacidad del hormigón de pasar por sitios estrechos se evaluó utilizando el ensayo de embudo en V norma UNE 83364:2007 “Hormigón autocompactante. Determinación del tiempo de flujo. Ensayo del embudo en V”. La descripción y el procedimiento del ensayo se presentan en el apartado 2.3.4. Las dimensiones del embudo utilizado en los ensayos realizados en este trabajo presentan pequeñas diferencias respecto al presentado en la norma UNE. Dichas diferencias se deben a que este estudio se realizó antes de la publicación de la norma. En este momento se decidió utilizar unas dimensiones intermedias, entre las encontradas en la bibliografía, para la fabricación del aparato. La fig. 3.7 presenta las dimensiones del aparato utilizado en este estudio.

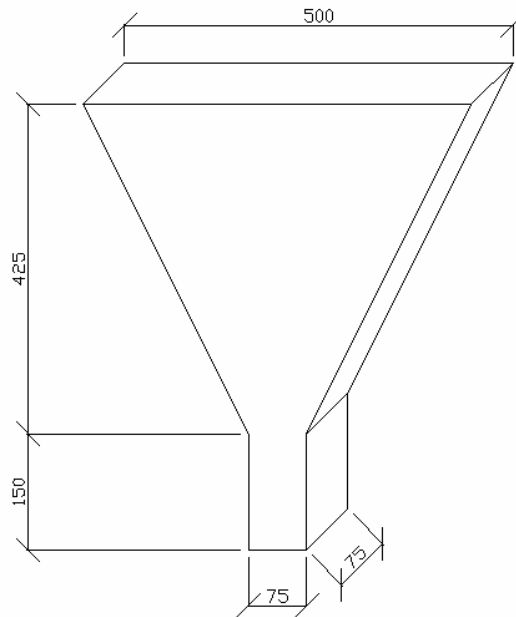


Fig.3.7 Dimensiones del embudo V utilizado. Dimensiones en mm

3.3.4.7 Determinación de las características mecánicas de los hormigones

3.3.4.7.1 Fabricación, curado y refrentado de probetas

A lo largo de todo este estudio se han fabricado básicamente dos tipos de probetas a saber:

- Cilíndricas 15 x 30 cm
- Cúbicas 10 cm

Cuando el hormigón a ensayar era autocompactante el procedimiento de fabricación consistía en verter directamente el hormigón en el molde sin aplicar ningún tipo de compactación, vibración o picado. Fig.3.8. Tras el llenado únicamente se enrasaban las probetas con una llana metálica. Además de nivelar, este procedimiento retira las piedras sobrantes en la superficie del hormigón evitando posibles puntos de concentraciones de tensión a la hora de romper las probetas.



Fig 3.8 Llenado de probeta con HAC

El proceso de curado de las probetas se realizó en cámara húmeda a 20°C y humedad al 95%. Únicamente se retiraron las probetas de la cámara húmeda a las 24h de su fabricación para proceder el desmoldeo y posteriormente a la hora de realizar el refrentado de las mismas.

El refrentado de las probetas cilíndricas se realizó utilizando mortero de azufre que se calentaba en una estufa a 150°C. El procedimiento consiste en llenar con azufre líquido el platillo que se encuentra acoplado al un soporte donde posteriormente se apoyará la probeta. Se encaja la probeta en el soporte con la cara irregular de la misma hacia abajo. A continuación se baja la probeta suavemente de manera que la cara irregular descansa sobre el platillo lleno de azufre líquido. Tras algunos segundos, se retira la probeta del platillo y se comprueba que el azufre ha quedado bien adherido a la probeta (fig 3.9).

El refrentado de las probetas cilíndricas es un procedimiento que se hace necesario debido a que el acabado superior del hormigón en la probeta no es suficientemente regular. Una rotura directa sobre esta superficie generaría una mala distribución de las tensiones haciendo con que la probeta se rompiera con cargas por debajo de su capacidad real.

Las probetas cúbicas no requieren refrentado puesto que su geometría presenta dos pares de caras perfectamente planas y paralelas entre si.



Fig. 3.9 Refrentado de probeta cilíndrica

Cuando se ha realizado ensayos sobre hormigones tradicionales de referencia el procedimiento solo difería del indicado en que el llenado de las probetas se realizaba en 3 capas que se picaban con barra de acuerdo con lo indicado en la norma UNE-EN 12390-2:2001 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.”

3.3.4.7.2 Rotura a compresión simple (UNE EN 12390-3:2003)

La rotura de las probetas se realizó utilizando una prensa ICON de 2500 kN de capacidad. fig. 3.10.



Fig 3.10 Prensa ICON. Capacidad de 250 toneladas

3.3.4.7.3 Ensayo de tracción indirecta (UNE-EN 12390-6:2001)

La resistencia a tracción del hormigón se determinó por medio del ensayo de tracción indirecta (ensayo brasileño) de acuerdo con la norma UNE EN 12390-6:2001. Fig. 3.11



Fig. 3.11 Ensayo Brasileño

3.3.4.7.4 Ensayo de permeabilidad (UNE-EN 12390-8:2001)

Se realizó el ensayo de permeabilidad sobre las probetas 4 y 6 siguiendo la normativa UNE – EN 12390-8:2001. En el ensayo se utilizó el permeabilímetro mostrado en la figura 3.12.

La normativa define que la cara superior de las probetas debe ser tratada con el propósito de suprimir la capa de pasta o mortero que pueda haberse quedado en esta zona. Para ello se utilizó una sierra y realizó un corte de 3 mm en dicha superficie. La unión entre la probeta y el permeabilímetro se produjo por medio de una goma de formato cilíndrico que impedía las pérdidas de agua. (Fig.3.13). Tras la realización del ensayo se rompieron las probetas por la mitad por medio del ensayo brasileño. En la sección longitudinal de la probeta se analizaron factores como la profundidad máxima alcanzada por el agua, la distribución de los áridos y la homogeneidad de la mezcla. Además se utilizaron las mismas probetas para analizar la tendencia a la segregación del hormigón por medio del ensayo descrito a continuación

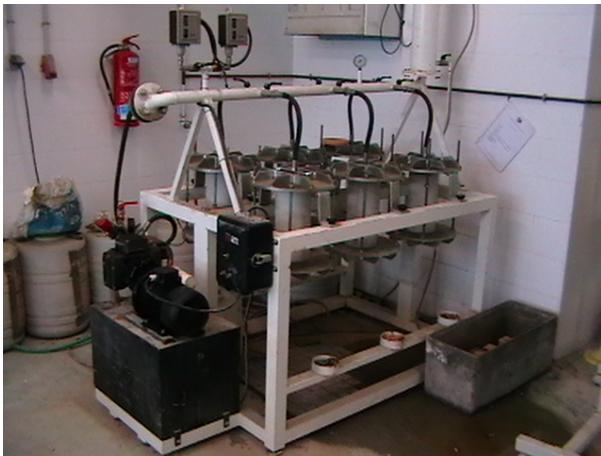


Fig. 3.12 Permeabilímetro



Fig 3.13. Goma de unión entre probeta y permeabilímetro

3.4 ENSAYOS ESPECIFICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPONENTES, PASTA Y HORMIGÓN

Se incluyen en este apartado algunos métodos de ensayo utilizados para caracterización de las materias primas y que no son de uso común en laboratorio de control, o que han sido empleados en condiciones especiales

3.4.1 Granulometría de los finos empleados

El cemento, el filler y la marmolina fueron analizados utilizando un ADL - Análisis de tamaño de partícula por difracción de rayos Láser (fig. 3.14). Éste ensayo consiste en pasar una pequeña muestra de material, diluida en agua destilada, entre dos placas de cristal sobre la cual incide un rayo láser. El aparato mide la difracción del rayo, debido a la presencia de las partículas, y calcula su granulometría. Las principales características de este aparato son:

- Rango de medición: de 0,02 a 2000 micras.
- Principio de medición: dispersión de Fraunhofer y Mie.
- Fuentes de luz
 - Luz roja: Láser de helio neón
 - Luz azul: Fuente de luz de estado sólido
- Sistemas de detección:
 - Luz roja: (Dispersión frontal, Dispersión lateral, Retrodifracción)
 - Luz azul: (Dispersión de ángulo amplio frontal, Retrodispersión)



Fig. 3.14 ADL – Equipo para el análisis de tamaño de partícula por difracción de rayos Láser

3.4.2 Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)

El ensayo de Espectrometría Infrarroja FTIR (fig 3.15) se utiliza para medir, cualitativa y cuantitativamente los grupos funcionales de los materiales. El ensayo se realizó para una región del espectro de infrarrojo que cubre intervalos de números de ondas entre 400 y 4000 cm^{-1} . La interacción entre la radiación y la materia generan alteraciones en los estados de rotación y vibración de las moléculas. Los espectros de absorción de infrarrojo se constituyen por franjas características originadas por la modificación de los estados vibracionales de los átomos de la molécula de referencia.

Este ensayo se realiza sobre muestras de aditivos previamente liofilizadas (Velásquez 2002). Para la fabricación de las pastillas de muestra se utilizó un sistema dispersante de bromuro de potasio (KBr) que establece un blanco para la zona de espectro entre 4000 y 400 cm^{-1} . Para fabricar las pastillas de ensayo se mezclan trazas de la muestra de referencia con KBr puro y seco en una proporción de 1:200 aproximadamente. Una vez homogeneizada la mezcla se comprime una pequeña muestra mediante una prensa manual.



Fig.3.15. Equipo Mattson Genesis II F.T.I.R. para realización de espectrometría Infrarroja.

3.4.3 Termogravimetría TGA850

Los métodos de ensayo termogravimétrico permiten identificar y calcular los componentes orgánicos que se volatilizan, se descomponen o se oxidan, cuando se calienta la muestra seca en condiciones de oxidación (aire) para un amplio rango de temperatura.

En este estudio se ha utilizado el equipo de termogravimetría TGA850 Melter Toledo (fig.3.16) y se varió la temperatura en un rango entre 35 y 1000°C.

Como resultado de este ensayo se obtiene la curva de termogravimetría (TG) que registra la variación de masa de una muestra en función de la temperatura o el tiempo.

Derivando la curva TG se obtiene la curva DTG que aporta información sobre la velocidad de pérdida o ganancia de masa con la temperatura o el tiempo.

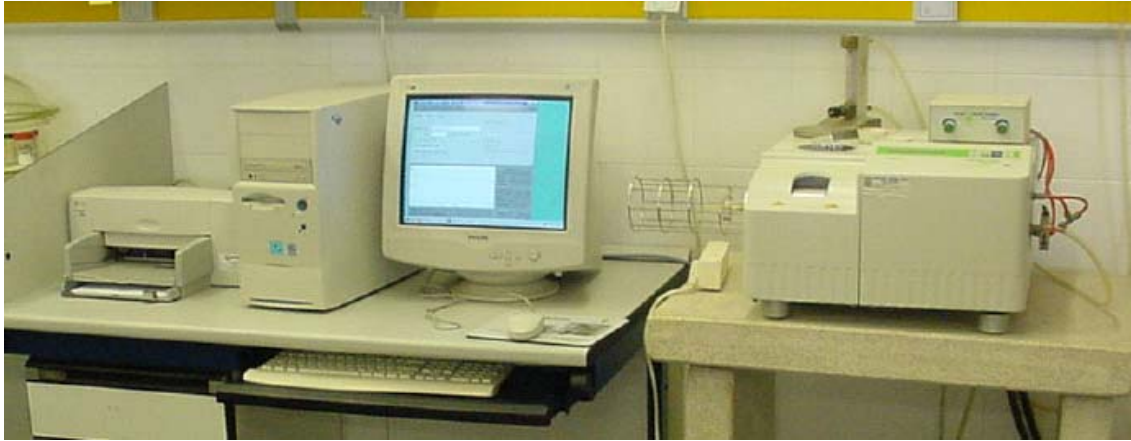


Fig. 3.16 Equipo para el ensayo de termogravimetría

3.4.4 Características reológicas de pastas para hormigón

La viscosidad de las pastas de cemento y cemento + fíll se analizó utilizando un viscosímetro rotacional Bohlin Visco 88 BV (fig.3.17) utilizando un cilindro de 25 mm de diámetro. Dicho equipo se encuentra conectado a un ordenador con el cual se realiza la captación de datos a través del programa informático Bohlin Windows V06.00.03 (the corinium Centre, Cirencester, England) (Velásquez 2002). Posteriormente se tratan los datos utilizando el programa Excel.

Las pastas analizadas en el viscosímetro requieren un procedimiento especial de preparación y mezclado debido al reducido volumen fabricado (< 100ml)



Fig. 3.17 Viscosímetro rotacional Bohlin Visco 88 BV

Dado que existe en la literatura una gran diversidad de métodos para el mezclado de las pastas a ensayar en viscosimetría, se decidió elegir uno de ellos y mantenerlo fijo en todas nuestras experiencias. El método elegido fue el utilizado por Velásquez (2002), el cual consiste en:

“

1. *Mezcla el agua con la mitad del cemento durante dos minutos*
2. *Añadir el resto de cemento y mezclar durante 4 minutos más (hasta $t=6$ min.)*
3. *Dejar minuto y medio en reposo (hasta $t=7.5$ min.)*
4. *Mezclar durante 2.5 minutos más (tiempo total de 10 minutos)*

Si se utiliza una adición de puzolana, ésta se añade al principio con el agua, sin el cemento y se mezcla durante un minuto, seguido de la adición de la mitad del cemento indicada en el punto 1 y el seguir procedimiento. Si se utiliza superplastificante, este se añade con el agua al inicio del mezclado.

Para llevar a cabo el mezclado se utilizó un mezclador de laboratorio Heidolph (Type RZR1) con una hélice con doble pala helicoidal (fig. 3.18), a una velocidad de 280 rpm. Esta velocidad junto con la geometría del agitador y el tiempo de mezclado nos permitió obtener una pasta homogénea. La pasta se mezclaba directamente en un vaso de precipitado, el cual se adaptaba al viscosímetro para la medición, por lo que no era necesario hacer ninguna manipulación adicional posterior al mezclado.



Fig.3.18 Hélice con doble pala helicoidal

Preacondicionamiento

Ya que al retirar la pasta de la mezcladora para sumergirla en el cilindro rotatorio del viscosímetro, se pueden producir zonas heterogéneas, se decidió aplicar un preacondicionamiento de la pasta para asegurarnos de tener las mismas condiciones de homogeneidad en todas nuestras experiencias. Dicho preacondicionamiento consistió en someter a la pasta a una velocidad de cizalla constante durante 60 segundos a un valor igual al de la velocidad máxima del ciclo del ensayo (100 s^{-1} , ver siguiente sección para la discusión del valor). Al finalizar este tiempo, se dejaba la pasta en reposo durante otros 60 segundos ya que el ciclo elegido fue una rampa ascendente-descendente, por lo que necesitábamos iniciar a bajas velocidades, y debíamos dar tiempo a que la estructura interna se estabilizara. Cabe señalar que para dar tiempo a la manipulación de la muestra en el viscosímetro, se iniciaron todas las mediciones exactamente 5 minutos después de terminado el mezclado.”

3.4.5 Ensayos para determinar el nivel de segregación en HAC

Para evaluar el nivel de segregación se utilizó el procedimiento propuesto por Sedran (1999) que consiste en fabricar una probeta cilíndrica con una muestra del hormigón, sin ninguna compactación, y tras el fraguado romperla por medio del ensayo brasileño. Se analiza el aspecto de la distribución de los áridos en la sección de la probeta. (Fig. 3.19 y 3.20), considerando que se produce la segregación cuando la distancia desde el borde superior de la probeta y el primer árido de tamaño superior a 8 mm es mayor que 5 mm.(fig. 3.21)



Fig. 3.19 Hormigón segregado



Fig. 3.20 Hormigón Autocompactable



Fig. 3.21 Medida de la profundidad de segregación

3.5 PROCEDIMIENTO OPERATORIO PARA LA OBTENCIÓN DE COMPOSICIONES GRANULARES ÓPTIMAS

Cuando se pretendía determinar la densidad de conjunto de una mezcla de áridos, estos se mezclaban previamente, sin añadir agua, en las proporciones a analizar. Con esta mezcla se rellena un recipiente de volumen conocido y se pesa la misma. Con estos datos se obtiene la densidad de conjunto de la mezcla.

Para garantizar la correcta mezcla de los áridos se utilizó una amasadora de eje basculante donde se vertían 30 Kg de material (fig. 3.22), se ponía la amasadora en marcha y tras dos minutos de amasado se vertía la mezcla en moldes cilíndricos de 14 cm de diámetro por 28 cm de altura. El llenado de los moldes se realizó sin ningún tipo de compactación (fig. 3.23). Una vez finalizado el relleno se enrasaba la superficie de la probeta con una varilla metálica (fig. 3.24).

Una vez relleno el recipiente se pesaba, y tras descontar el peso del recipiente se dividía por su volumen obteniendo la densidad de conjunto buscada



Figura 3.22 Mezclas en seco

Finalmente se obtenía el peso del recipiente lleno (fig. 3.25). Se realizaron series de ensayos con distintas proporciones de áridos donde se buscaba la combinación que presentara la mayor densidad. Para analizar los resultados se representaron en gráficas como las de la fig. 3.26.

Este procedimiento está indicado para analizar las proporciones óptimas relativas entre arenas y gravas. Sin embargo en este caso se ha estudiado su aplicación a los sólidos finos como el filler y la marmolina.



Fig.3 .23 Mezclas en seco
Llenado de la probeta



Fig. 3.24 Mezclas en seco.
Enrazado de la probeta



Fig. 3.25 Mezclas en seco.
Pesada de la probeta

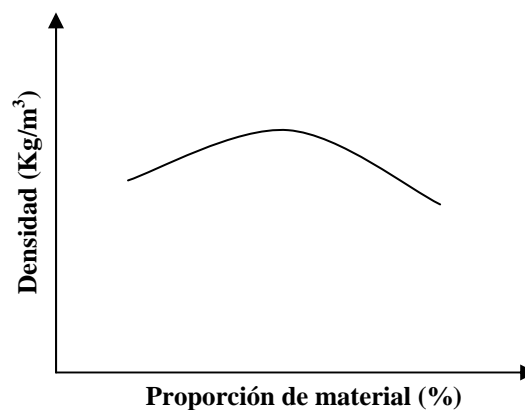


Fig. 3.26 Obtención de resultados

3.6 PROCEDIMIENTO OPERATORIO PARA LA FABRICACIÓN DE LOS HAC

En este estudio se plantea el interés por reproducir, a la menor escala posible, la fabricación de los HAC con el condicionante de intentar conseguir la mayor similitud posible con los procesos seguidos tanto en obra como en la industria de prefabricado

Por ello se desarrollaron dos métodos diferentes para la fabricación de hormigones con los que cubrir diferentes condiciones de ejecución se estudió el proceso de fabricación del hormigón en dos hormigoneras de características claramente diferenciados, tanto por el volumen como por su energía de amasado.

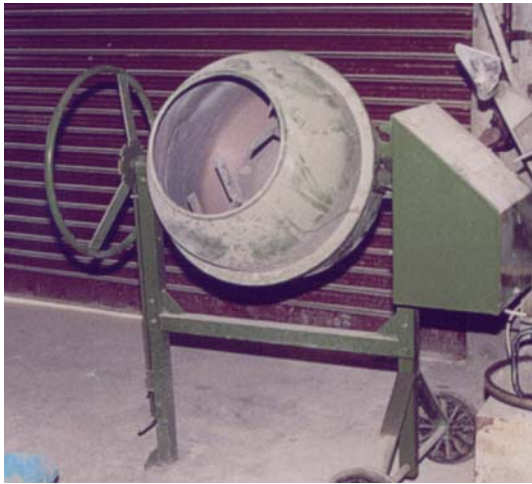
Los equipos utilizados han sido:

Una hormigonera basculante con capacidad para fabricar hasta 35 litros de hormigón (**hormigonera – A**);

Una amasadora de morteros donde se fabricaban 2 litros de mezcla (**hormigonera – B**). En la fig. 3.27 se muestran las hormigoneras utilizadas.

Salvando las lógicas diferencias con la hormigonera “A” se pretende simular una fabricación de hormigón en planta con amasado en camión y con la hormigonera “B” se reproduce un criterio más enérgico como puede ser la producción en prefabricación con equipos potentes.

Otros tipos de amasadoras como pudiera ser el empleo de amasadoras planetarias de eje vertical con movimiento inducido, de uso frecuente en laboratorio, pueden exigir condiciones de ejecución diferentes a los utilizados en este estudio.



Hormigonera basculante "A"



Amasadora de morteros "B"

Figura 3.27 Hormigoneras utilizadas

3.6.1 Procedimiento de Amasado Hormigonera A

El vertido empieza con la grava y la arena. Estos se mezclan durante un minuto.

A continuación se añaden los materiales con granulometrías finas; filler, marmolina y cemento y se mezcla otro minuto más.

Posteriormente se añade el agua y pasados dos minutos se añade el aditivo.

Finalmente, tras la colocación del aditivo, la hormigonera permanecía en marcha durante otros quince minutos.

3.6.2 Procedimiento de Amasado Hormigonera B

Inicialmente se vierten los materiales de granulometría fina (filler, marmolina y cemento), se pone en marcha la amasadora.

Mientras se mezclan los finos se vierte la arena y a continuación el agua.

El comienzo de la colocación del aditivo se realiza cuando la mezcla adquiere un aspecto homogéneo, por lo que el tiempo de espera varía de acuerdo con la cantidad de cemento, finos y agua.

Por último, treinta segundos tras el término del vertido del aditivo se añade la grava. Este último procedimiento se justifica por el hecho de que la amasadora se bloqueaba cuando se añadía la grava a la mezcla seca.

El tiempo de amasado tras la colocación del aditivo se fijó en tres minutos, por ser éste el tiempo a partir del cual las características de la mezcla ya no variaban. Además ésta presentaba el mismo aspecto, que una de su misma dosificación, en la amasadora A.

Todo el proceso se realizó con la amasadora en la velocidad lenta.

En la tabla 3.3 se muestra un resumen del orden de vertido en cada uno de los casos

	Hormigonera A	Hormigonera B
Tipo de hormigonera	Basculante	mortero
Volumen de amasado (l)	25	2
Orden de llenado (tiempo en minutos al origen)	<ul style="list-style-type: none"> • Grava, arena • Filler, polvo de mármol, cemento (1 min) • Agua (2 min) • Aditivo (4 min) 	<ul style="list-style-type: none"> • Filler, polvo de mármol, cemento • Arena (1 min) • Agua(2 min) • Aditivo(3 min) • Grava(3:30 min)

Tabla 3.3 Proceso de amasado en cada hormigonera

3.6.3 Procedimiento para el ajuste de los tiempos de amasado

En general los HAC requieren tiempos de amasado superiores a los de un hormigón convencional para garantizar la homogeneización de una mezcla con muchos finos y para asegurar que se desarrolle todo el efecto de los aditivos. Estos tiempos variarán en función de las características de la amasadora; potencia, palas, posición de palas y eje; y de los materiales utilizados.

Modificaciones en el proceso de amasado (tipo de amasadora, orden de llenado, tiempo de amasado...) pueden dar lugar a diferentes propiedades del hormigón.

Debido a que en este trabajo se han utilizado dos hormigoneras distintas (ver apartado de procedimientos y ensayos), se vio la necesidad de realizar ajustes del orden de vertido de los materiales y del tiempo de amasado en cada amasadora para que el hormigón obtenido en los dos casos presentara, para una misma dosificación, el mismo aspecto y las mismas características.

Como prueba de la influencia del tiempo de amasado en las propiedades del hormigón se presenta en la fig 3.28 dos aspectos de la misma dosificación de hormigón con diferentes tiempos de amasado.

En la izquierda se muestra el resultado de un ensayo de caja en L para el hormigón mezclado durante 3 minutos en la amasadora "A". La poca energía de esta hormigonera no permite una dispersión completa de los finos en este tiempo, pero el aditivo actúa sin dificultad. Como consecuencia el hormigón segrega ya que los finos no aportan su función cohesionante.

Si se prolonga el tiempo de amasado todos los componentes desarrollan sus funciones y el resultado es el que se puede ver en la fig 3.28 (derecha). Se aprecia aquí un hormigón autocompactable claramente cohesionado.

El efecto en la amasadora B, es el inverso. Su gran energía provoca una rápida dispersión de los finos, incluso antes de que el aditivo desarrolle su efecto. Como

consecuencia el aspecto inicial del hormigón en los primeros momentos de amasado es muy seco

Admitidas estas diferencias es lógico pensar que los tiempos de amasado deben prolongarse hasta conseguir una mezcla homogénea, con la completa dispersión de los finos, a partir del cual las propiedades no varíen.

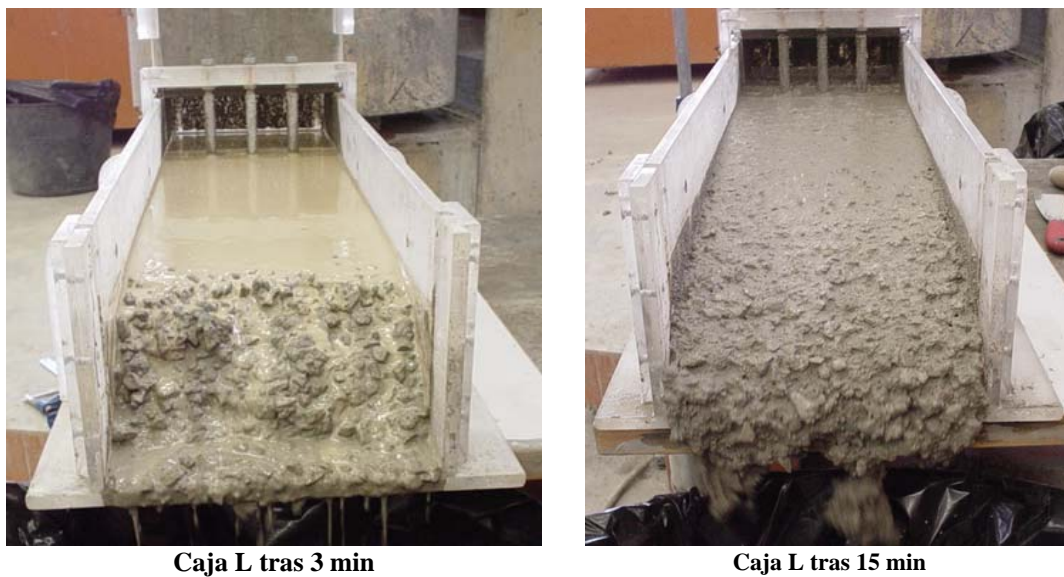


Figura 3.28 Comparación de aspecto en el ensayo de la caja L en función del tiempo de amasado

Por ello, para seleccionar el tiempo de amasado que se daría a la mezcla, en la amasadora “A” tras la colocación del aditivo, se analizaron tres dosificaciones con distintas cuantías de cemento (350, 400y 500 Kg/m³). Para cada dosificación fabricada se estudió la evolución del resultado del ensayo del embudo en V estándar en función del tiempo de amasado. Los resultados se muestran en la fig. 3.29.

Se verifica que los tiempos de embudo no varían significativamente a partir del noveno minuto de amasado.

Finalmente se fijó el tiempo de amasado, tras la colocación del aditivo, en quince minutos ya que este tiempo garantiza la total homogeneización de la mezcla.

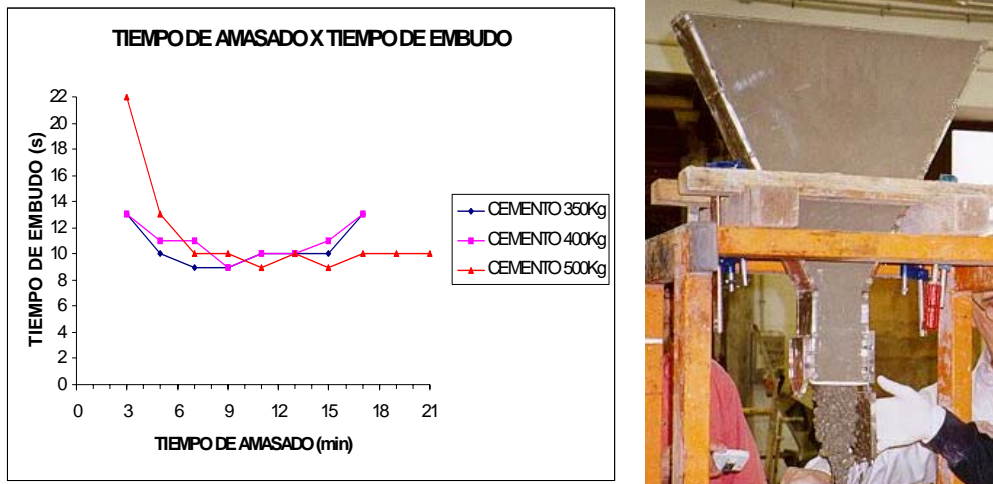


Fig. 3.29. Selección del tiempo de amasado

En el caso de la hormigonera “B” el tiempo de amasado tras la colocación del aditivo se fijó en tres minutos, por ser éste el tiempo a partir del cual las características de la mezcla ya no variaban. Además ésta presentaba las mismas características, que una de su misma dosificación, en la amasadora A.

3.6.4 Control de humedad en los áridos durante la fabricación del hormigón

Para evitar variaciones en las características del hormigón debido al agua que aporta la arena se mantuvo un estricto control sobre la humedad de la misma. Para ello en el día anterior a la fabricación se preparaban capazos de arena con aproximadamente el volumen que sería utilizado en cada amasada. De cada uno se sacaban dos muestras de arena de aproximadamente 500 gramos cada una, que se pesaba y se introducía en estufa a 100 ± 5 °c por un período no inferior a 24h. En el día de la amasada se extraía la muestra de la estufa y se determinaba la humedad. Este valor se utilizaba para corregir los pesos de los materiales. Asimismo, antes de fabricar el hormigón se tomaban otras dos muestras de la arena que sería añadida a la hormigonera y al día siguiente se comprobaba los resultados de la humedad con una precisión de un 0,01%.

En el caso de las amasadas de dos litros se seguía el mismo procedimiento, utilizando un mismo capazo de arena para varias amasadas. Se tomaban muestras periódicas y se revolvía la arena siempre antes y después del proceso de fabricación del hormigón.

Cuando los resultados de humedad obtenidos en las diferentes etapas de control no coincidían los ensayos realizados eran descartados y se repetía todo el proceso.

3.7 MÉTODOS DE ENSAYO EN MODELOS REDUCIDOS PARA DOSIFICAR Y CARACTERIZAR HAC

3.7.1 Introducción

Optimizar la dosificación de un HAC es una tarea que exige un elevado número de aproximaciones. Además los ensayos actualmente utilizados para caracterizar los HAC demandan mucho material y tiempo. (véase apartado 2.3), debido a sus dimensiones relativamente grandes, para parámetros de laboratorio.

Una serie completa de ensayos que incluya el embudo V, la caja L y el flujo de cono exige como mínimo 25 litros de hormigón incluso si se realizan los ensayos en línea, aprovechando para cada ensayo el material procedente de otros anteriores. Además, la realización de esta serie de ensayos demanda como mínimo dos personas y tarda por lo menos 30 minutos, incluyendo el tiempo empleado para limpiar los aparatos.

La propuesta en esta etapa del trabajo fue fabricar estos mismos ensayos en escala reducida, con la intención de minimizar estos inconvenientes y sacar un mayor rendimiento del proceso. De esa manera una única persona puede realizar los ensayos de caracterización encargándose de todo el proceso incluso la limpieza en la mitad del tiempo que se gasta cuando se utilizan los ensayos convencionales.

Es cierto que el hecho de utilizar los ensayos con escala reducida nos obliga a trabajar con dimensiones máximas de áridos inferiores a las que se pueden utilizar en los ensayos de tamaño convencional. Pero esto no supone un problema considerando la tendencia de la industria de prefabricados a trabajar con dimensiones máximas de árido pequeñas. Además en general los HAC están pensados para rellenar espacios muy reducidos y para pasar a través de zonas densamente armadas lo que también nos lleva a reducir el tamaño máximo del árido.

Asimismo, aún en los casos donde el objetivo sea utilizar áridos de 20 o 25 mm los modelos reducidos podrían ser utilizados como un paso previo a la dosificación final. En estos casos se puede ajustar la dosificación utilizando un árido de 12 mm y posteriormente realizar el cambio de áridos realizando pequeños ajustes, caso sean

necesarios. Este procedimiento puede ser considerado como válido ya que en ningún caso se encontraron problemas para ajustar cambios de dimensiones de áridos que fuesen procedentes de la misma cantera.

3.7.2 Modelos reducidos - propuesta

Se han diseñado modelos reducidos para los ensayos de Esgurrimiento, Embudo en V y Caja L. Los procesos que se aplican a cada caso y su comparación con los métodos estándar se describen a continuación

3.7.2.1 Ensayo de Esgurrimiento reducido

Igual que el ensayo de esgurrimiento de tamaño estándar, el ensayo de esgurrimiento reducido evalúa la capacidad de deformación del hormigón bajo su propio peso.

El cono es el normalmente utilizado para determinar la consistencia de morteros frescos. En la norma UNE 83.811-92 encontramos la descripción del aparato:

“Molde tronco-cónico de acero inoxidable o latón de $(60 \pm 0,5)$ mm de altura y con diámetro interior de $(100 \pm 0,5)$ mm en la base y de $(70 \pm 0,5)$ mm en la parte superior. La superficie interior y los bordes del molde deben ser lisos y deben formar ángulos rectos con su eje. El espesor mínimo de las paredes del molde debe ser de 2,0 mm. Se recomienda disponer de una tolva que encaje en su parte superior.” (Fig. 3.30)

El ensayo se realizará sobre una superficie plana, nivelada, perfectamente lisa y no absorbente. Sobre esta superficie se marcarán dos círculos concéntricos con diámetros de 10 y 20 cm respectivamente.

El procedimiento del ensayo consiste en llenar el cono con una muestra de hormigón. El llenado debe realizarse por simple vertido, sin ningún tipo de compactación.

Tras el llenado se recoge el material que pueda haber rebosado, se limpia y se seca el área libre de la superficie donde se realizará el ensayo

La muestra debe permanecer en reposo por un tiempo entre los 30 y los 60 segundos.

A continuación se levanta el cono verticalmente y a una velocidad constante de manera que el hormigón se quede libre para fluir por debajo del mismo.

Se mide el tiempo que la muestra de hormigón tarda en alcanzar un diámetro de 20 cm y el diámetro máximo alcanzado por la muestra tras cesar el movimiento.



Fig. 3.30 Cono utilizado para realizar el ensayo de Flujo de cono reducido.

3.7.2.2 Embudo en V reducido

El ensayo de embudo en V reducido, de la misma manera que su respectivo modelo en tamaño normalizado, se utiliza para evaluar la capacidad de paso del hormigón a través de sitios estrechos. Además este ensayo puede aportarnos información sobre la viscosidad y la tendencia a la segregación de la mezcla.

El aparato fue fabricado con placas de metacrilato de un centímetro de espesor unidas por tornillos de acero inoxidable. Las fig. 3.31 y 3.32 muestran su aspecto y dimensiones.



Fig. 3.31 Embudo en V reducido

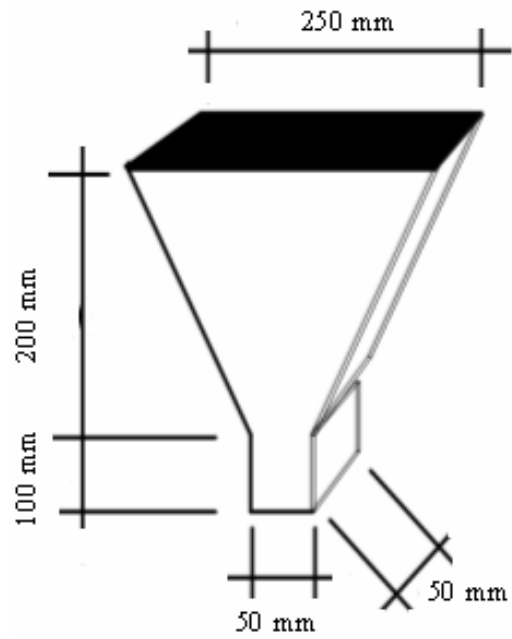


Fig. 3.32 Dimensiones del Embudo en V reducido (medidas interiores)

El embudo está dotado de una compuerta en la parte inferior con sistema de cierre de fácil apertura. Fig. 3.33.



Fig. 3.33 Sistema de cierre del Embudo en V reducido

Para la realización del ensayo el aparato debe estar apoyado sobre algún tipo de soporte que lo mantenga fijo y perfectamente nivelado.

El ensayo consiste en llenar el embudo con una muestra de hormigón. El llenado debe realizarse por simple vertido, sin ningún tipo de compactación.

Tras el llenado el hormigón debe permanecer en reposo por un tiempo entre los 30 y los 60 segundos.

A continuación se abre la compuerta en la parte inferior del embudo dejando fluir el hormigón.

Se mide el tiempo que el hormigón tarda en vaciar el embudo desde que se abre la compuerta hasta que, mirando desde arriba, se vea la primera entrada de luz en la parte inferior del mismo.

El operador del ensayo debe considerar datos como la nivelación del hormigón en el embudo, la velocidad de bajada del hormigón y la tendencia del hormigón a bloquearse en la parte inferior del embudo.

3.7.2.3 Caja en L reducida

La caja L reducida es una réplica fiel de su modelo en tamaño estándar. Está compuesta de un compartimiento vertical y un compartimiento horizontal separados por una compuerta de funcionamiento estilo guillotina y por un conjunto de barras de acero que simulan las armaduras en un encofrado.

Las propiedades evaluadas son las mismas que en el ensayo tamaño estándar:

- La capacidad de llenado;
- La habilidad de pasar entre las barras de acero;
- La resistencia a la segregación.

El aparato de tamaño reducido se fabricó con placas de metacrilato con un centímetro de espesor unidas por tornillos de acero inoxidable. Las Fig. 3.34 y 3.35 muestran su aspecto y dimensiones.

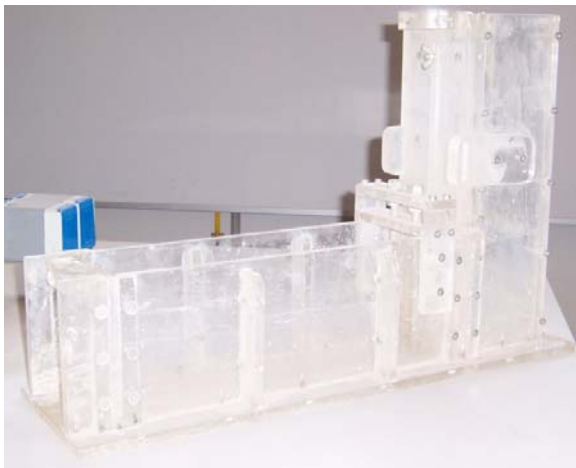


Fig. 3.34 Caja L reducida

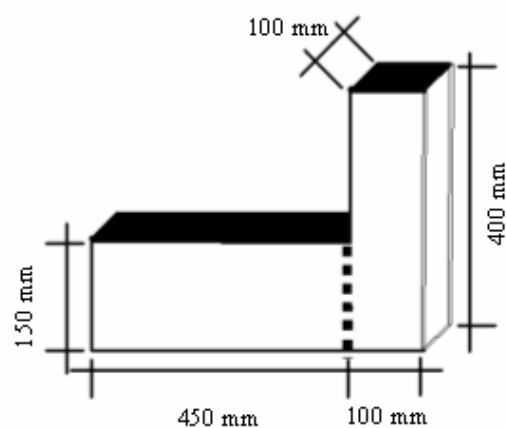


Fig. 3.35 Dimensiones de la Caja L reducida

Las barras de acero utilizadas tienen el diámetro de 10 mm y pueden ser dispuestas a distintas separaciones entre ellas y las paredes de la caja. Asimismo, las dimensiones de este aparato están pensadas para trabajar con hormigones de tamaño máximo de árido de 12 mm. Fig. 3.36.



Fig. 3.36 Disposición de las barras de acero en la Caja L reducida

Igual que en el modelo normalizado, el procedimiento de ensayo en el modelo reducido consiste en:

- Llenar el compartimiento vertical de la caja con una muestra de hormigón, sin realizar ningún tipo de compactación;
- Dejar el hormigón reposar durante 60 segundos;
- De una manera rápida y a velocidad constante, abrir la compuerta que separa los dos compartimientos, dejando fluir el hormigón.

Como datos se miden: el tiempo que el hormigón tarda en alcanzar el extremo del compartimiento horizontal y las alturas alcanzadas por el hormigón en ambos extremos de la misma.

3.7.3 Comparación de resultados entre ensayos estándar y reducido

En las fig. 3.37, 3.38 y 3.39 se presentan las dimensiones de los equipos utilizados y las fotografías de los mismos en su tamaño normalizado y reducido.

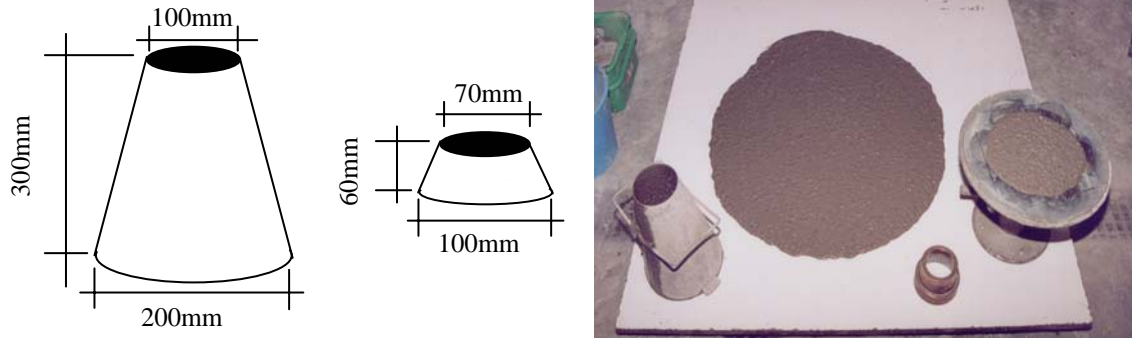


Fig. 3.37 Ensayo de escurrimiento – estándar e reducido

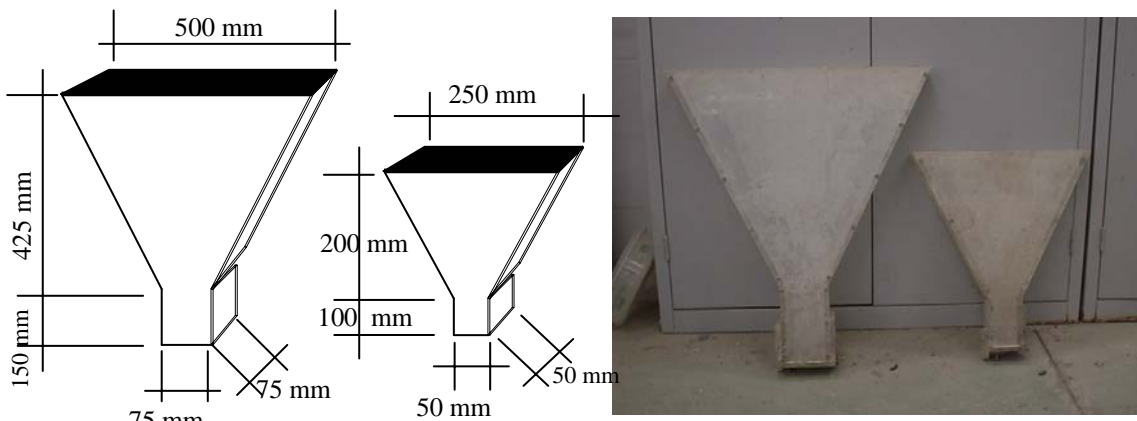


Fig. 3.38 Embudo en V – estándar e reducido

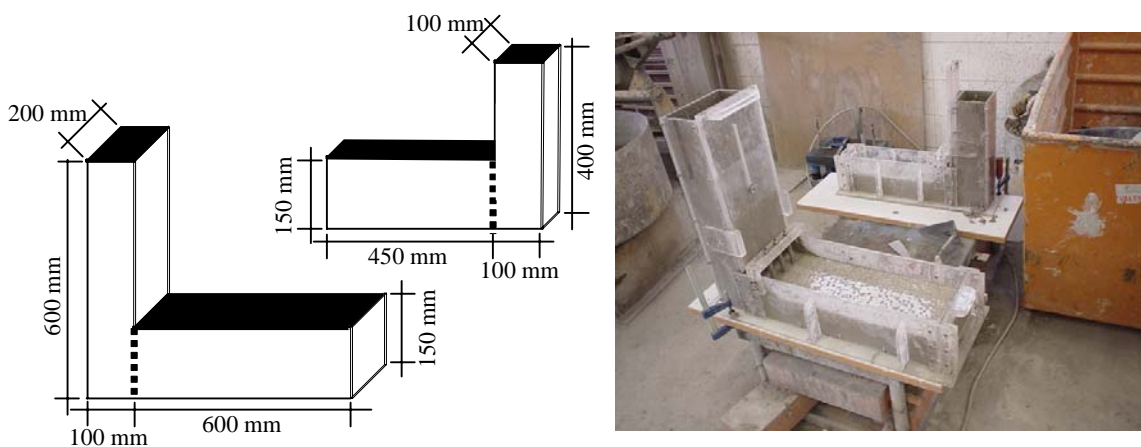


Fig. 3.39 Caja L– estándar e reducido

Se seleccionaron 30 dosificaciones para realizar una comparación entre los resultados encontrados en los ensayos de tamaño normalizado y en sus respectivas réplicas en tamaño reducido con se pretende comprobar la eficacia de los ensayos reducidos a la hora de caracterizar los HAC en estado fresco y de encontrar una correlación entre ambas escalas de ensayos.

La elección de las dosificaciones se realizó de forma que éstas tuviesen distintas características, sobretodo en cuanto a su contenido en cemento, relación agua/cemento y al tipo y contenido en adición filler o marmolina. De esta manera se pretendía abarcar una amplia gama de hormigones autocompactantes y poder así, analizar la influencia del contenido y del tipo de las adiciones inertes, de la fracción fina de la arena y consecuentemente de la relación a/finos en estado fresco del hormigón. Las principales características de las dosificaciones seleccionadas se presentan en la tabla 3.4.

El procedimiento de este estudio consistía en preparar amasadas de 2 y 25 litros, y realizar los ensayos indicados en la tabla 3.5.

Dosificación	Cemento (Kg)	a/c	% Grava sobre (grava + arena)	Adición inerte (Kg)	Tipo de adición inerte (% sobre el total de adición)	
					Filler	Marmolina
A	350	0,52	47	180, 240, 300, 360, 420	50	50
B	400	0,46		140, 200, 260, 320, 380	50	50
C	400	0,46		100, 130, 160, 190, 220	100	--
D	500	0,36		40, 70, 100, 130, 160	100	--
E	500	0,36		240, 270, 300, 330, 360	--	100
F	500	0,36		40, 100, 160, 220, 280	50	50

Tabla 3.4 Variables analizadas en las mezclas de hormigón

Ensayo	Determinaciones en	
	Amasadora grande	Amasadora pequeña
Flujo en el cono	T50; DM	--
Cono reducido	--	T20; dm
Embudo en v grande	TE	--
Embudo en v pequeño	--	te
Tracción indirecta y segregación	1 probeta ϕ 10x20 cm	--

Tabla 3.5 Ensayos realizados

Las fig. 3.40, 3.41, 3.42 presentan los resultados de las comparaciones para el ensayo de escurrimiento y del embudo en “V”. En ellas, podemos verificar que los tiempos recomendados para el T_{50} , que se encuentran entre los 2 y los 6 segundos, corresponden a tiempos entre los 3 y los 7 segundos para el T_{20} en el cono pequeño. Por otra parte los tiempos recomendados para el embudo de dimensiones normales están entre 5 y 12 segundos, estos valores corresponden a 6 y 11 segundos respectivamente en su modelo reducido.

La comparación de valores obtenidos para el escurrimiento (D_{max}) en los modelos normalizado y reducido muestran tendencias similares a excepción de 3 casos en los que el cono estándar da valores elevados mientras que en el cono reducido se mantiene en valores en diámetros de apenas 190 mm. Estos casos concretos corresponden a hormigones con un exceso de finos, y por lo tanto muy viscosos y cohesivos

En el caso de la caja L, (fig. 3.43 y 3.44), podemos ver que los tiempos finales (T_f) medidos en el modelo reducido y los tiempos 40 (T_{40}) medidos en el ensayo normalizado, presentan una correlación, de modo que, T_f es prácticamente el doble de T_{40} .

Todavía sobre los tiempos, podemos decir que, aunque los resultados de estos hormigones no cumplan los parámetros establecidos por la bibliografía, ($T_{20} < 1,5s$ e $T_{40} < 3,5s$), la experiencia demostró que estos factores no afectan la ejecución del hormigonado.

El parámetro H_2/H_1 , en todos los casos, se encuentran dentro del intervalo 0,8 – 1; garantizando que todas las dosificaciones de hac analizadas poseen buena capacidad de nivelación.

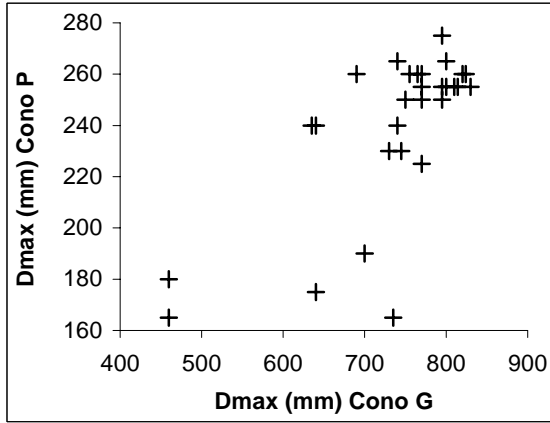


Fig.3.40 Comparación de resultados Dmax entre los conos estándar y reducido.

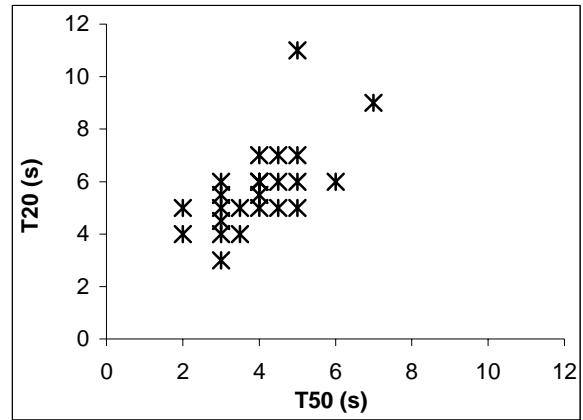


Fig. 3.41 Comparación de resultados entre los conos estándar y reducido

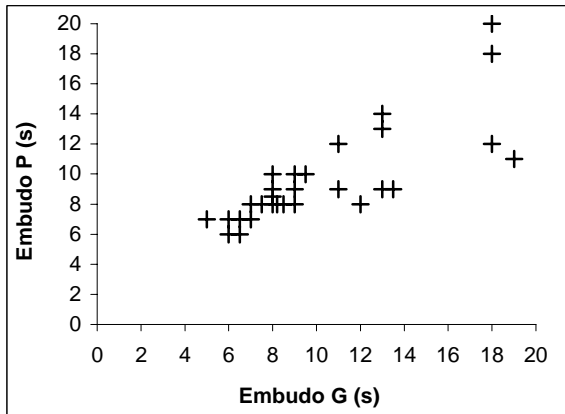


Fig. 3.42 Comparación de resultados entre los embudos grande y reducido

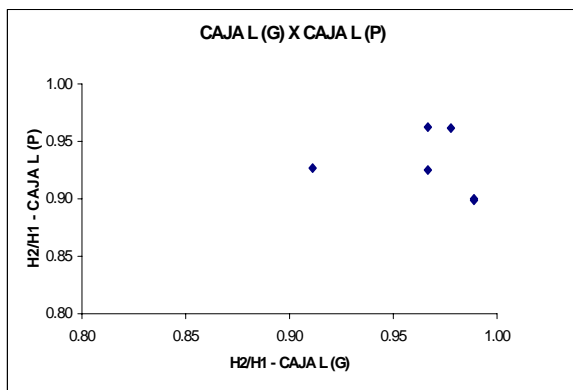


Fig. 3.43 Comparación de resultados entre las cajas "L" estándar y reducida

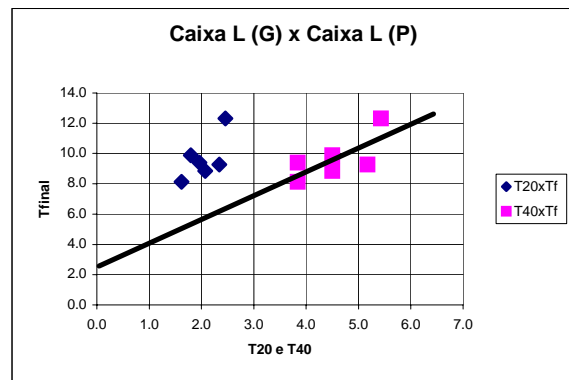


Fig. 3.44 Comparación entre los tiempos t_{20} , t_{40} y t_{final}

Como conclusión los modelos reducidos propuestos se adaptan en tendencia a los modelos de ensayo normalizado y se obtienen valores comparables salvo casos especialmente viscosos.

Debe tenerse en cuenta que para un análisis completo de un hormigón el estudio de un solo ensayo puede conducir a interpretaciones parciales, tanto en modelos estándar como reducidos y puede llevar a conclusiones no coherentes con el conjunto de resultados. Se hace imprescindible un estudio de resultados de forma conjunta.

La utilización de los ensayos reducidos permite mantener un control más estricto de la ejecución de los ensayos ya que la misma persona que los ejecuta es también la que controla el cronómetro. Además el hecho de utilizar una reducida cantidad de material a la hora de fabricar la amasada favorece la reducción de la dispersión en los resultados debido a posibles variaciones en el suministro del material. Este factor es especialmente importante a la hora de controlar el porcentaje de humedad de la arena, ya que se pueden realizar varias amasadas con un volumen de arena bastante reducido, garantizando que todas se fabricaron con la misma precisión en lo que dice respecto a la cantidad total de agua.

3.8 ENSAYO DE ADHERENCIA DE ARMADURAS ACTIVAS AL HORMIGÓN

En la realización de los ensayos de adherencia se utilizó el método ECADA para la caracterización de la adherencia de armaduras activas al hormigón desarrollado por Martí (2000). El método permite determinar la longitud de transmisión y la longitud de anclaje de una armadura después de la transmisión del esfuerzo de pretensado, basando sus resultados en la medición de la fuerza soportada por la armadura durante el proceso de ensayo. Este ha sido diseñado con la idea de reproducir el modo de trabajo de las armaduras de pretensado que transmiten su tensión por adherencia, típicas en la industria del prefabricado. El método de ensayo ECADA ha demostrado tener una mayor fiabilidad que los métodos basados en la medición de deslizamientos. (LCPC, 1999 y RILEM, 1979)

3.8.1 El método de ensayo ECADA

El método ECADA queda ampliamente desarrollado en Martí (2002). En este apartado se desarrolla una breve explicación del proceso seguido.

En un elemento de hormigón pretensado, al destesar la armadura, se desarrollan, en los extremos, dos zonas de transmisión de la tensión de pretensado, La tensión crece desde los extremos hacia el interior, hasta alcanzar un valor máximo que se mantiene constante en toda la zona central del elemento. Se define la longitud necesaria para que la fuerza de pretensado introducida en una armadura previamente tesada se transfiera por adherencia al hormigón. Esta longitud es la correspondiente a la distancia existente entre el extremo libre de un elemento pretensado y la sección a partir de la cual la tensión en la armadura es constante.

Cuando el elemento pretensado es sometido a carga, puede incrementarse la fuerza soportada por la armadura. Para desarrollar esta fuerza es necesaria una longitud adherente adicional. Se define longitud de anclaje como la longitud necesaria para anclar, por adherencia, una cierta tensión de tracción de la armadura. La longitud de anclaje máxima corresponde al caso en el que la tensión a anclar sea la de rotura por tracción de la armadura.

El método ECADA intenta reproducir la secuencia de trabajo del tramo final de una armadura activa en un elemento pretensado durante los procesos de fabricación, transmisión y anclaje. Para ello plantea la realización de ensayos de probetas de diferentes longitudes adherentes en bastidores de pretensado (Fig. 3.45). En un extremo del bastidor se sitúa un sistema de arrancamiento con la misma rigidez que el elemento a ensayar. Este sistema sirve de anclaje al elemento y permite medir la fuerza soportada por la armadura. Asimismo, permite aumentar la tensión en la armadura procediendo a su arrancamiento. En consecuencia se puede realizar secuencialmente las operaciones de transmisión y arrancamiento.

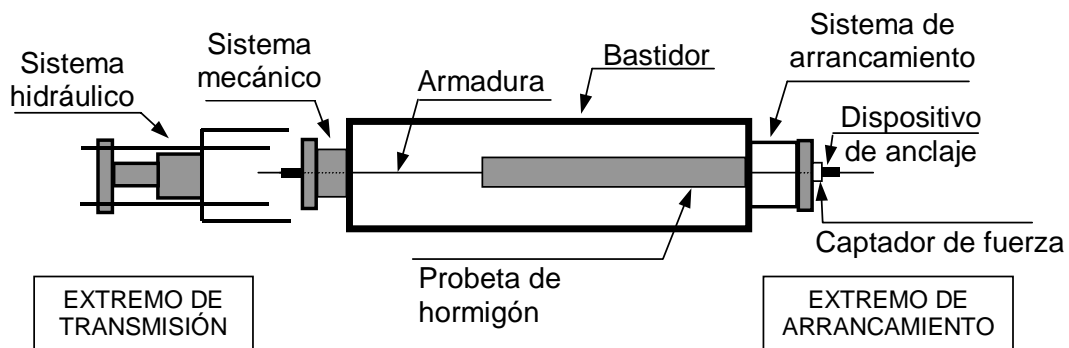


Fig. 3.45. Esquema del equipo de ensayo. Vista en planta.

Además del bastidor y el sistema de arrancamiento, el equipo de ensayo se complementa con un sistema hidráulico que se puede acoplar en ambos extremos del bastidor. Éste facilita las operaciones de tesado, destesado y arrancamiento. Un sistema mecánico en el extremo de transmisión garantiza, junto con los dispositivos de anclaje, el mantenimiento la tensión introducida a la armadura, y un captador de fuerza en el extremo de arrancamiento permite medir la fuerza que soporta realmente la armadura.

3.8.2 Procedimiento operativo

El procedimiento de ensayo comienza con la colocación de un cordón de pretensado de 7 alambres en el bastidor (fig. 3.46). Sigue la operación de tesado desde el extremo de transmisión (fig. 3.47), hasta un nivel de tesado del 75% de la carga unitaria máxima característica del cordón, garantizando la tensión en el cable mediante la aproximación del sistema mecánico.

Una vez realizada esta operación, sobre cada uno de los bastidores de ensayo se procede al hormigonado de una probeta prismática de sección transversal 10 x 10 cm y diferente longitud adherente (fig. 3.48).



Fig. 3.46. Vista general de los bastidores.



Fig. 3.47. Extremo de transmisión. Tesado finalizado. Sistema hidráulico y sistema mecánico en posición.



Figura 3.48 Hormigonado de la probeta.

Pasado el tiempo deseado para la realización del ensayo, que en este caso se fijó en 24 horas, se procede al desmoldado de las probetas y se inicia la operación de transmisión del pretensado. Para ello se acopla nuevamente el sistema hidráulico en el extremo de transmisión permitiendo controlar la velocidad de descarga de la armadura de forma gradual, y la transmisión del pretensado al tiempo que se mide la fuerza soportada por la armadura en el extremo de arrancamiento.

Terminada la transmisión del pretensado se inicia un periodo de estabilización del ensayo. Se observan las pérdidas de fuerzas detectadas en la armadura debidas a la compatibilidad de deformaciones entre el acero y el hormigón o por la falta de longitud adherente de la probeta. Si la longitud adherente es menor que la longitud de transmisión, después del destesado no se transmitirá totalmente la fuerza de pretensado. La longitud de transmisión corresponderá a la longitud adherente de la probeta de menor longitud para la cual la fuerza transmitida alcanza el máximo valor de la serie. En todas las probetas de mayor longitud adherente la fuerza transmitida será idéntica.

Al finalizar esta fase se inicia la operación de arrancamiento procediendo a realizar un aumento de la tensión en la armadura desde el extremo de arrancamiento (fig. 3.49), hasta que se produzca el deslizamiento de la armadura, su rotura, o el fallo del hormigón por hendimiento.



**Fig. 3.49 Extremo de arrancamiento.
Sistema hidráulico en posición.**

Si la longitud adherente del elemento es menor que la longitud de anclaje correspondiente, la tensión en la armadura durante la operación de arrancamiento no alcanzará la tensión que se pretende anclar. De este modo, la longitud de anclaje corresponderá a la longitud adherente de la probeta de menor longitud para la cual la tensión en la armadura en esta operación alcanza el valor que se pretende anclar.

En este trabajo se ha considerado como tensión a anclar un valor igual 75 % de la carga unitaria máxima de rotura correspondiente a una fuerza de 141 kN. Además, se ha analizado la respuesta frente al arrancamiento, y por lo tanto la longitud de anclaje de dos formas distintas, así definidas:

- *Longitud de anclaje 1:* La longitud adherente en la cual se llega a anclar la fuerza deseada, admitiendo deslizamientos de la armadura en el extremo de transmisión durante la operación de arrancamiento.
- *Longitud de anclaje 2:* La longitud adherente en la cual se ancla la fuerza deseada sin que se produzcan deslizamientos de la armadura en el extremo de transmisión durante la operación de arrancamiento; evidentemente esta longitud es mayor que la anterior.

Adicionalmente al equipo de ensayo descrito, se incluyeron dispositivos para la medición de los deslizamientos relativos de la armadura respecto al hormigón. Los datos del ensayo son registrados de forma continua por medio de una tarjeta de captura de datos, para su posterior análisis.

CAPÍTULO 4

SOBRE LA COMPOSICIÓN DE LOS HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los estudios previos realizados para definir la composición de los hormigones analizados. Durante esta fase se ha realizado un importante trabajo de análisis de la influencia de los distintos parámetros de dosificación en las propiedades de autocompactabilidad, y aunque el objetivo básico de esta tesis no pretendía dar lugar a una definición de método de dosificación completo se ha considerado importante exponer los criterios seguidos, y su fundamento en aras a justificar la selección de las dosificaciones estudiadas y para servir de base en el análisis de los resultados de robustez.

4.2 ESTUDIOS SOBRE LA COMPOSICIÓN DE LAS PASTAS

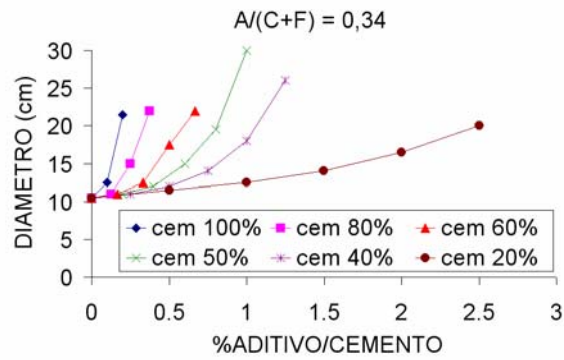
En un HAC la pasta es el principal responsable de la fluidez, por lo tanto es importante conocer su comportamiento principalmente en lo referente a la compatibilidad entre el aditivo y los finos que se utilicen, incluido el cemento, la fracción fina de las arenas y las posibles adiciones.

Hay que considerar que las pastas utilizadas para fabricar los HAC suelen llevar adiciones para aumentar la cohesión y reducir el riesgo de segregación de la mezcla. Estas adiciones suelen ser materiales finos que pueden llegar a tener una granulometría parecida a la del cemento.

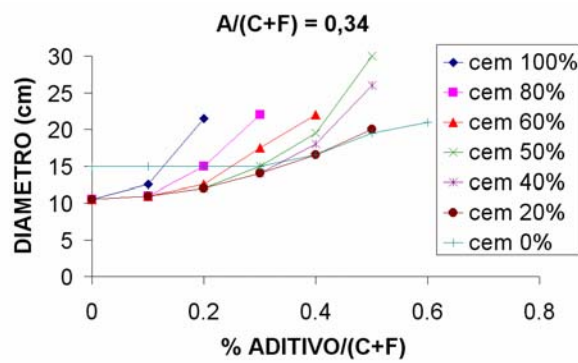
En todos los estudios se busca obtener las proporciones óptimas para conseguir las pastas de máxima fluidez aprovechando al máximo las propiedades de cada material. Para evaluar las características de este conjunto, se realizaron varias series de amasadas de pastas compuestas de cemento, filler, agua y aditivo donde se analizó, principalmente, la influencia de las proporciones de cemento y filler, la relación agua/finos totales y la proporción de aditivo. El objetivo de esta fase se centró en determinar la efectividad del aditivo empleado, analizar su dosificación de saturación, y comprobar el efecto de la presencia de finos.

En una primera aproximación se fabricaron pastas con mezclas cemento / filler en distintas proporciones y con relación agua / finos constante, analizando sobre ellas la influencia de la dosificación de aditivo sobre la trabajabilidad medida mediante la medida del escurrimiento en el ensayo de cono reducido. Este ensayo se realizó en mezclas con relación agua / finos de 0,34 y 0,25.

Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 4.1 y 4.2 (a y b)

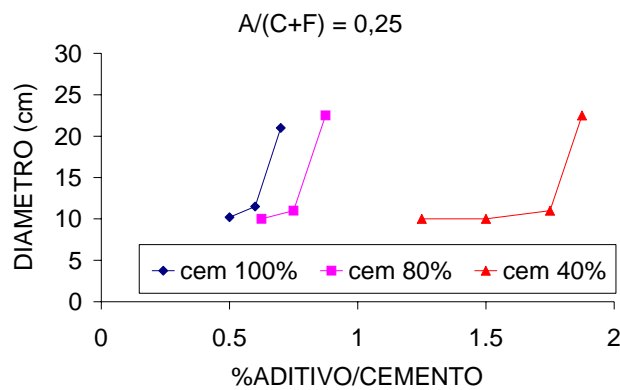


a) % en aditivo s/ cemento

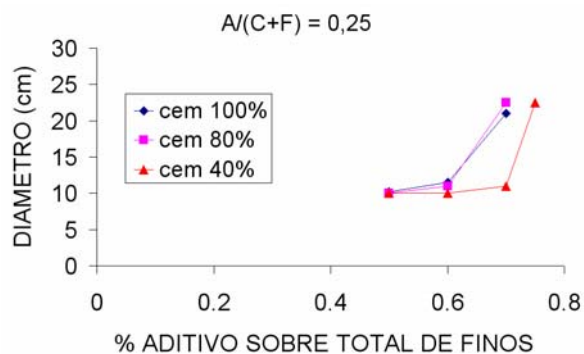


b) % en aditivo s/ (cemento + filler)

Fig. 4.1 Influencia de la dosificación de aditivo en el escurrimiento en cono para pastas con diferentes contenidos en cemento, con relación agua / finos = 0,34



a) % en aditivo s/ cemento



b) % en aditivo s/ (cemento + filler)

Fig. 4.2 Influencia de la dosificación de aditivo en el escurrimiento en cono para pastas con diferentes contenidos en cemento, con relación agua / finos = 0,25

Además de la lógica constatación de que el aumento en la dosificación de aditivo provoca un mayor escurrimiento se aprecia que la demanda de aditivo para un mismo escurrimiento es tanto menor cuanto mayor es el contenido en cemento y menor el contenido en filler. Este resultado se detecta sobre todo para mezclas filler – cemento en las que el contenido en cemento supera el 50 %. Además esta diferencia crece cuando la relación agua / finos es mayor.

Utilizando el cono de Marsh se analizó la evolución de la proporción de cemento y filler para un mismo contenido en aditivo y misma relación a/c. Los resultados muestran que las pastas resultan mas lentas cuando se aumentan las proporciones de cemento.

Estos resultados parecen ser contradictorios a los presentados en las graficas de las fig. 4.1 y 4.2 donde las pastas se hacen mas trabajables a medida que se aumenta la proporción de cemento.

La cuestión es que estos resultados no son comparables ya que en el cono pequeño se midió el diámetro final de la mezcla sin considerar el tiempo que ésta tardaba en alcanzarlo. Por otra parte, en el cono de Marsh se mide el tiempo que la mezcla tarda en caer, lo que nos permite evaluar un parámetro relacionado con la viscosidad y la cohesión de la mezcla. Así, los resultados de las graficas presentadas en la figura 4.3 están de acuerdo con los resultados del estudio de Emborg (1999) (ver fig. 2.4). En él

Emborg concluye que la viscosidad plástica de la mezcla será mayor a media que se aumenta la proporción de aditivo.

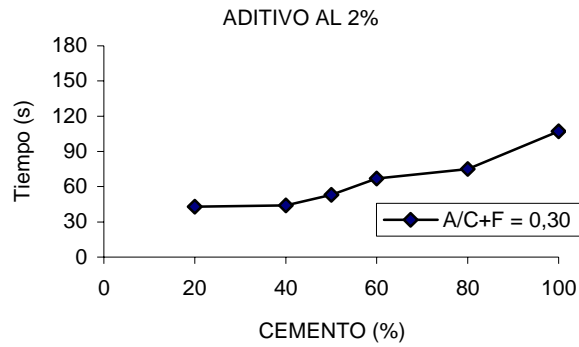


Fig. 4.3 Evolución de la proporción de aditivo, para distintas proporciones de cemento, en el cono de Marsh

4.3 ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA GRANULAR DE LOS HORMIGONES AUTOCOMPACTABLES.

4.3.1 Planteamiento del estudio

Cada aplicación de hormigón presenta una serie de particularidades que la hace diferente a otras, por ello el hormigón a utilizar requiere unas características especiales. No se podrá, por tanto, hablar de hormigón óptimo si no es en relación a su aplicación concreta, y partiendo de materiales realmente disponibles en la zona. Con el hormigón autocompactante sucede lo mismo. Sin embargo es frecuente plantear unos límites a distintos aspectos de la composición de los HAC para conseguir las propiedades necesarias para ser considerado como tal. En este apartado se ha desarrollado un amplio programa de ensayos para verificar la validez de alguno de estos límites.

Ante la imposibilidad de abarcar la gran variedad de posibilidades que se pueden analizar en un estudio como este se decidió limitarlo a hormigones de tamaño máximo de árido de 12 mm. De este modo se cubre el campo de aplicación de los prefabricados de hormigón, que suele evitar el empleo de áridos demasiado gruesos y que es uno de los que más HAC está utilizando en la actualidad. Al mismo tiempo esta decisión permite utilizar para el estudio los métodos de ensayos reducidos que se plantearon en el capítulo 3, con la consiguiente reducción del volumen de hormigón necesario y del trabajo que ello conlleva.

Como objetivo se propuso fabricar amasadas combinando una amplia gama de variaciones posibles de todos los componentes del hormigón.

Las cuantías de cemento y las relaciones a/c se fijaron con la idea de obtener niveles de resistencia en toda la gama de las normalmente empleadas en prefabricación. Se parte de la idea de que siendo la resistencia a largo o corto plazo, según los casos, el principal condicionante que determina la dosificación del hormigón, y dependiendo ésta fundamentalmente de la relación agua / cemento, el parámetro a/c se adaptará a límites similares a los de los hormigones tradicionales. Aunque en este apartado se pretendía estudiar las estructuras granulares viables, el contenido en cemento debía también ser variado para analizar su previsible en las exigencias granulométricas. Sin embargo, y al

plantearse una aplicación en prefabricados con tamaño máximo de árido pequeño se ha tendido a dosificaciones altas en cemento.

Asimismo, se pretendió que el rango de valores de la relación agua / finos fuera mucho más amplio de los normalmente propuesto en la bibliografía para los HAC

El volumen de aditivo se dosificó con la idea de conseguir para cada combinación las consistencias deseadas intentando rebasar los extremos admisibles. En esta fase se utilizó únicamente un aditivo reductor de agua de alto rango de última generación. Es evidente que el empleo de aditivos modificadores de la viscosidad podían reducir la demanda de finos para garantizar la estabilidad de los hormigones, sin embargo esta variable quedó fuera de los objetivos del estudio. Se considera de esta manera que el caso analizado es el más desfavorable.

Para estudiar distintas estructuras granulares se utilizarón dos gravas procedentes de machaqueo de tamaños 4/7 y 7/12, una arena de río, una arena correctora 0/2 y un filler calizo. Variando las proporciones relativas de estos materiales se analizaron dosificaciones con contenidos en finos totales (cemento más áridos de hasta 125 μm) entre menos de 150 y más de 330 l /m³, y con dosificaciones en grava 530 y 1000 kg/m³.

Esta etapa se concluyó con un total de 228 dosificaciones analizadas. La tabla 4.1 presenta el margen de variación estudiado para cada uno de los parámetros. En el anexo I se muestra el conjunto de todas las dosificaciones.

Cemento (Kg/m ³)	a/c (en peso)	a/finos <0,125mm (en volumen)	Grava Kg	Finos totales <0,125 mm (Kg)
300 350 400 450 500	0,30 a 0,55	0,69 a 1,31	536 a 995	417 a 946

Tabla 4.1 Variables evaluadas en la fabricación del hormigón

Para cada una de las dosificaciones se fabricarán dos litros de hormigón de acuerdo con el procedimiento descrito en 3.6.2. Las propiedades en estado fresco de se midieron utilizando los ensayos de cono y embudo reducidos antes comentados en 3.7. La tendencia a la segregación se analizó mediante el ensayo propuesto por Sedrán (1999), comentado en 3.4.5 salvo en los casos en los que el resultado era evidente.

4.3.2 Caracterización de los HAC

La figura 4.4 muestra los resultados de los ensayos, que han sido agrupados en función del aspecto y características de los hormigones obtenidos.

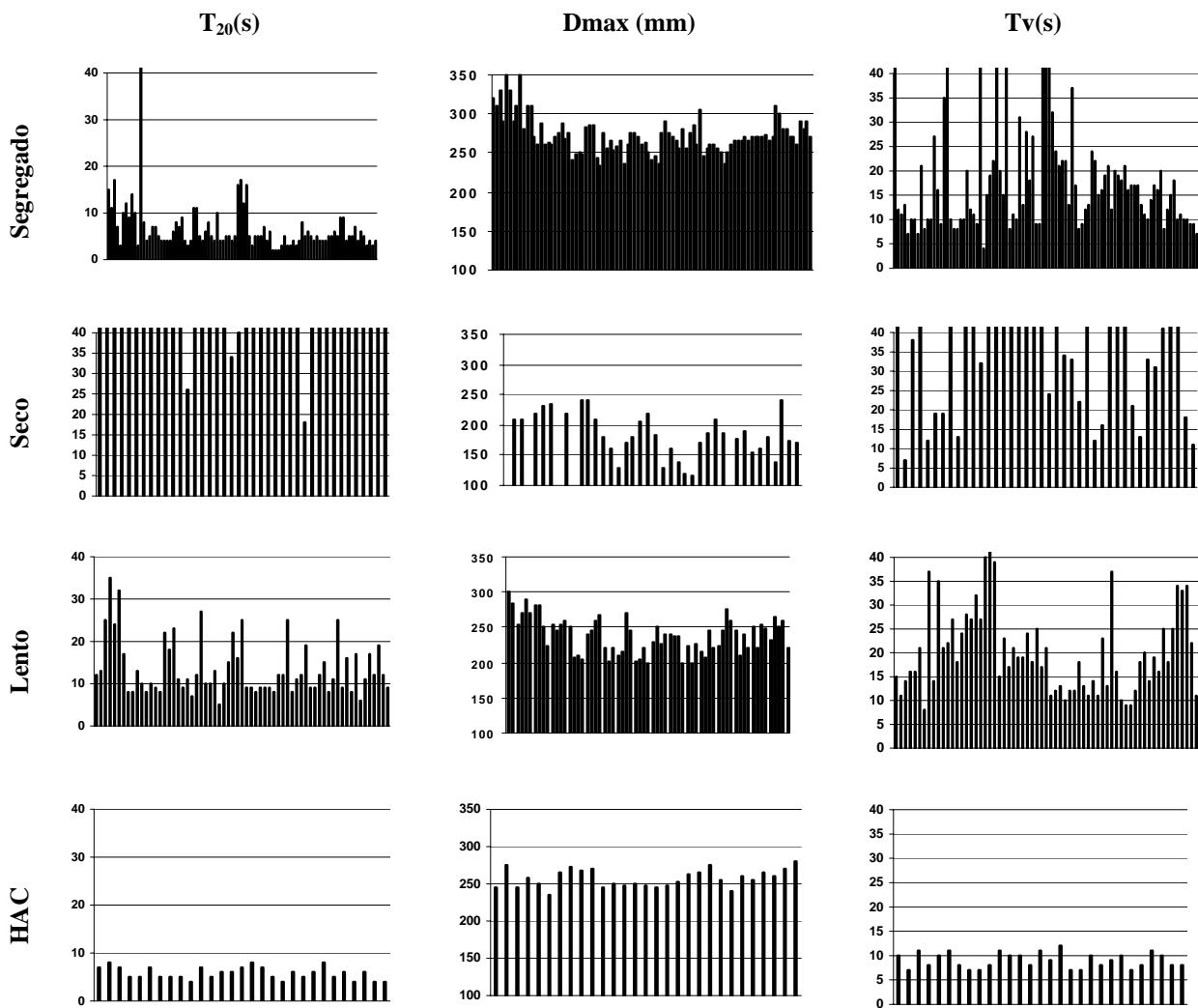


Fig. 4.4. Resultados de los modelos de ensayos en tamaño reducido

Para esta clasificación se decidió estudiar los resultados de los ensayos de forma conjunta mediante un parámetro “P” que tiene en cuenta el tiempo de flujo en el cono (T_{20}), el tiempo de embudo (T_v) y el diámetro máximo en el cono (D_{max}), según la ecuación 4.1.

$$P = \frac{T_{20} \times T_v}{D_{Max}} \quad (4.1)$$

Una vez calculado el parámetro “P” los valores obtenidos nos permitieron caracterizar los hormigones en cuatro categorías:

- Hormigón segregado: Se define como aquel en el que la profundidad de segregación en el ensayo propuesto ha sido superior a 5 mm. El factor “P” no es adecuado para caracterizar la segregación del hormigón.
- Hormigón seco. ($P > 3,5$): caracterizado por tiempos T_{20} o tiempos de embudo T_v mayores que 40 segundos, o por diámetros máximos inferiores a 200 mm. En general los factores que influyen para que la amasada tenga este aspecto son: excesiva dosificación de finos, baja proporción de aditivo o una inadecuada proporción de arena/grava.

En cualquier caso debe entenderse que en este documento cuando se hace referencia a “hormigón seco” se está utilizando el término de forma comparativa a los HAC que son objeto del estudio. Todos los hormigones “secos” analizados podrían entrar como un hormigón tradicional fácil de colocar en cualquier obra.

- HAC lento: ($0,35 < P < 3,5$): los parámetros para clasificar esta categoría son: valores de T_{20} entre 8 y 40 segundos; Tiempos de embudo T_v entre 12 y 40 segundos y diámetros máximos superiores a los 200 mm. Estos hormigones tienen un flujo lento debido al alto grado de cohesión de la mezcla y presentan un bajo riesgo de segregación, pero pueden ser aplicados en los casos donde los encofrados no presentan un alto grado de densidad de armaduras o las distancias de recorrido del hormigón son cortas.

- HAC: ($P < 0.35$): las características de este hormigón presentan resultados bastante regulares. Los valores de T_{20} se encuentran entre 3 y 7 segundos y los diámetros máximos del flujo de cono varían entre los 240 y 270 mm. Además los tiempos de embudo en V se encuentran entre 6 y 12 segundos. Una inspección visual confirma los resultados numéricos.

En las figuras 4.5 a 4.8 se muestran los valores del parámetro P para todos los hormigones.

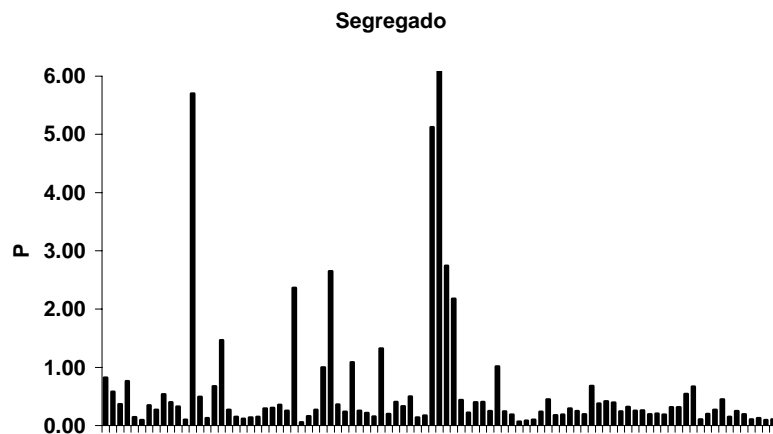


Fig. 4.5 Valores del parámetro P para los hormigones segregados

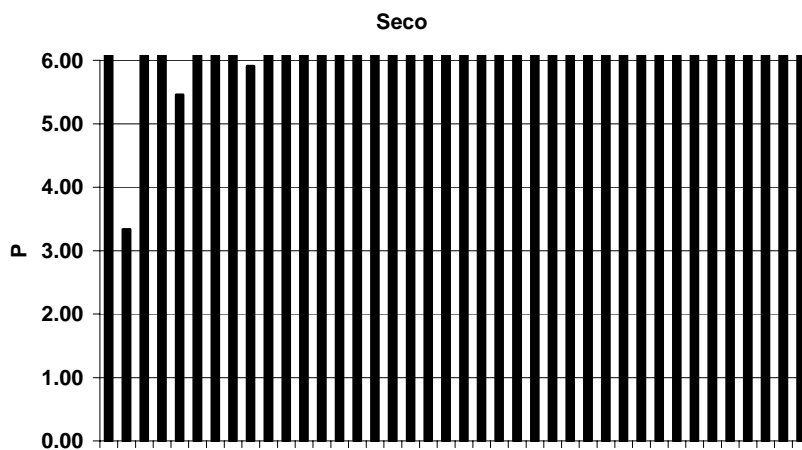


Fig. 4.6 Valores del parámetro P para los hormigones secos

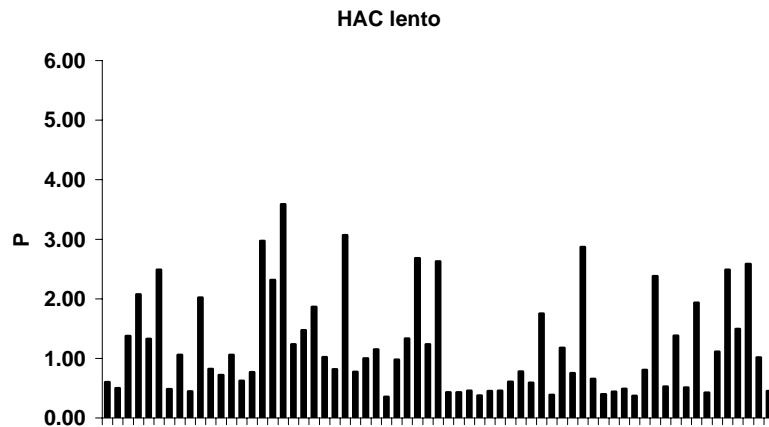


Fig 4.7 Valores del parámetro P para los HAC lentos



Fig. 4.8 Valores del parámetro P para los HAC

Se comprueba que puede producirse la segregación en hormigones con cualquier valor de P, desde próximo a 0 hasta superiores a 6, con gran dispersión de resultados.

Se constata asimismo que un solo valor no es suficiente para caracterizar el hormigón. Aún dentro de los límites de autocompactabilidad para todos los parámetros analizados, algunas combinaciones pueden convertir a un hormigón en excesivamente lento en su flujo, o incluso seco.

Todos los hormigones considerados como HAC presentan valores muy bajos de P y con poca variabilidad.

4.4 PARÁMETROS PARA LA DOSIFICACIÓN DE LOS HAC

Para analizar la influencia de la dosificación en las características de los HAC, en la figura 4.9 se presenta en una gráfica volumen de finos – relación agua/finos, los tipos de hormigón obtenidos y clasificados de acuerdo con el criterio que se acaba de definir.

Se aprecia que los HAC se encuentran preferentemente en una zona con contenido en finos entre 200 y 240 litros, y con relaciones agua / finos entre 0,8 y 0,95, aunque es posible encontrar HAC con valores fuera de estos límites.

Por otra parte, en esta zona pueden encontrarse también hormigones de otras categorías, sean secos, lentos o segregados, de manera que no es suficiente que la dosificación cumpla estos límites para ser un HAC.

Un detalle de esta zona se presenta en la figura 4.10

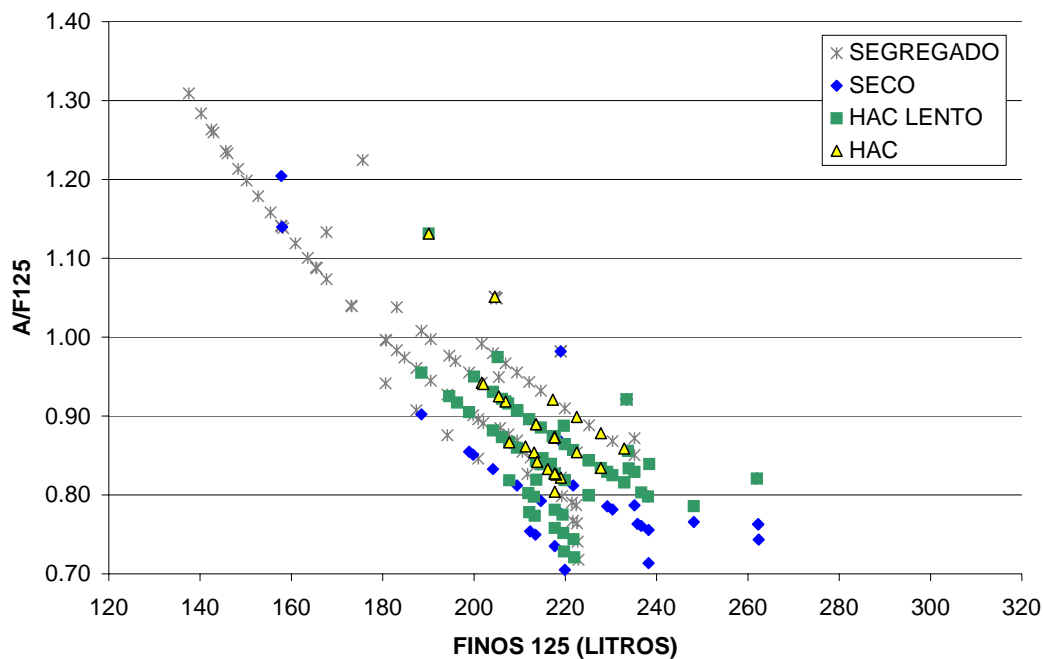


Fig. 4.9 Volumen de finos 125 x A/finos125

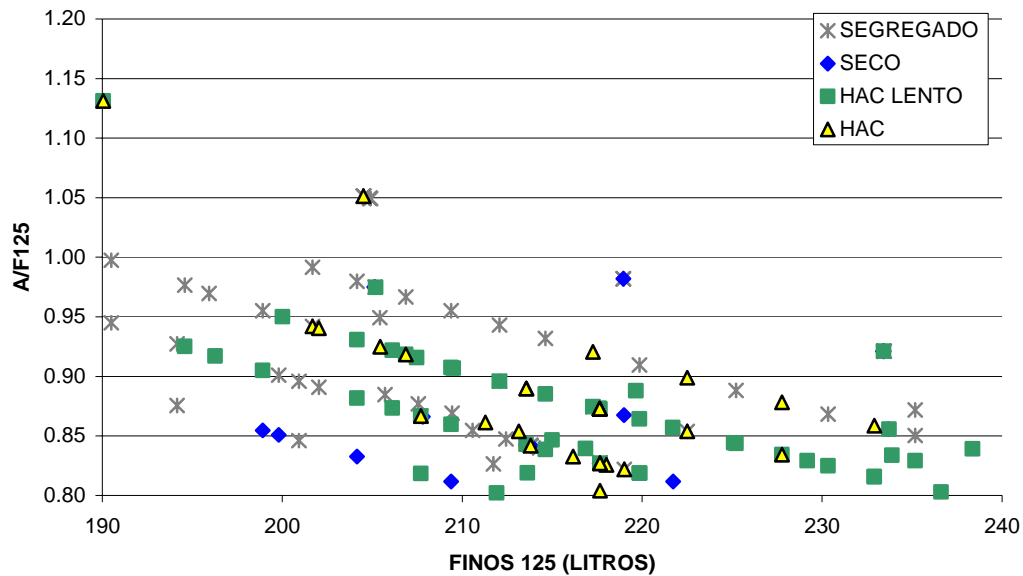


Fig. 4.10 Volumen de finos 125 x A/finos 125

En la tabla 4.2 se muestra los límites de todos los parámetros correspondientes a cada una de las categorías de las dosificaciones estudiadas.

Tipo	Cemento (Kg)	a/c	Finos totales (vol)	Finos totales (Kg)	Filler calizo < 0.063 mm	a/finos (vol)	Grava (Kg)
Segregado	350-500	0,35-0,54	146-233	417-687	39-270	0,79-1,31	704-997
Seco	350-500	0,32-0,72	158-337	478-946	68-456	0,70-1,14	536-927
Lento	350-500	0,31-0,54	188-262	554-724	86-287	0,70-1,13	612-921
HAC	350-500	0,35-0,54	190-233	558-665	86-234	0,80-1,13	664-898

Tabla 4.2 Límites encontrados para los distintos tipos de hormigón

El análisis de estos datos se presenta a continuación:

- Se ha podido obtener HAC para cualquiera de los contenidos en cemento analizados, y con relaciones a/c en el amplio margen de los hormigones normalmente utilizados para las aplicaciones propuestas.
- Los límites obtenidos son similares a los propuestos en la bibliografía. Incluso considerando que el estudio se ha limitado al tamaño máximo de árido de 12 mm, se ha podido fabricar hormigones con altos contenidos en grava. Sin

embargo cuando el contenido en árido grueso es alto la demanda de finos también es mayor, exigiendo una granulometría menos continua. En estos casos ha sido difícil diseñar mezclas con menos de 550 kg de finos totales.

- Las zonas granulométricas en las que se ha podido obtener HAC y HAC lentos quedan reflejadas en la figura 4.11. Estas curvas incluyen todos los sólidos empleados (incluso el cemento). Centrada en este huso se ha dibujado una curva granulométrica siguiendo la fórmula de Bolomey:

$$Y = a + (100-a) (d/D)^{1/2}$$

Con un valor de “a” = 21.

Se aprecia que el huso granulométrico de HAC obtenido es amplio y que la curva de Bolomey puede ser una buena referencia para la dosificación.

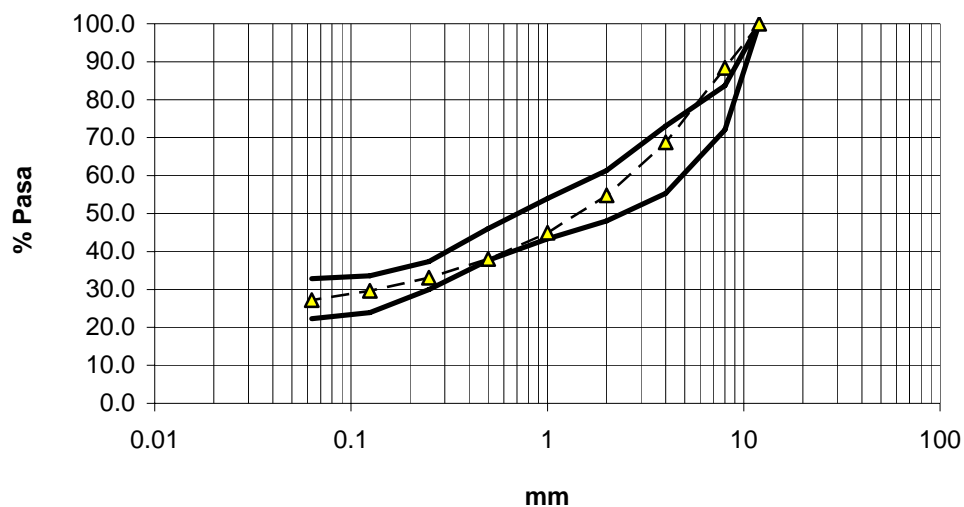


Fig.4.11 Uso granulométrico de los HAC y curva de referencia de Bolomey con $a = 21$ y $D = 11$ mm

- El contenido en finos calizos menores de $63\ \mu\text{m}$ con los que ha podido fabricarse HAC va desde apenas $86\ \text{kg}$ (muy por debajo del límite de 175 propuesto por la EHE) hasta 234 , superando el límite comentado, pero incluso en estos casos por debajo de la propuesta de $250\ \text{kg}$ que se incluye en el borrador de la futura EHE.
- Para analizar la distribución de tamaños en las arenas se incluye la figura 4.12 en la que se representa la granulometría de la fracción 0/4 del conjunto de todos los áridos (sin considerar por tanto el cemento) comparada con el huso granulométrico propuesto por la EHE para las arenas. En este punto se debe destacar que se ha considerado como “arena” el conjunto de todos los sólidos calizos, incluyendo los filleres, la fracción caliza del cemento en su caso y los finos de la arena correctora, y excluyendo del conjunto de finos únicamente el resto del cemento.

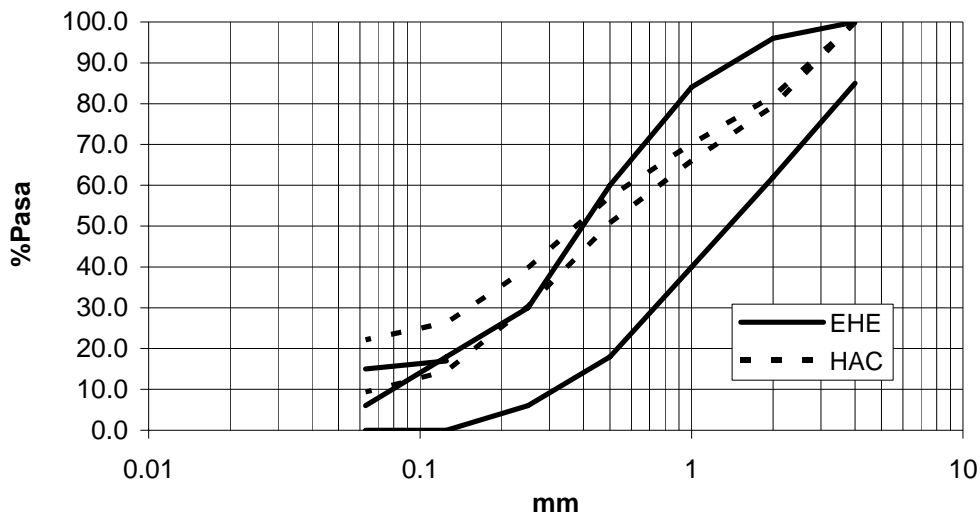


Fig.4.12 Comparación de la franja 0/4 mm de la EHE con la de los HAC estudiados

- Se comprueba que para todas las composiciones el contenido en finos que pasan por el tamiz $0,063\ \mu\text{m}$ supera el $10\ \%$, pudiendo encontrar algunos muy por encima del valor máximo del huso granulométrico recomendado por la Instrucción EHE. Es evidente que el límite del contenido en finos, si se analizara con este criterio, sería ampliamente superado.

4.5 SOBRE LA SENSIBILIDAD DE LOS HAC FRENTE A CAMBIOS EN SU ESTRUCTURA GRANULAR

Para analizar por separado la influencia de las fracciones fina y gruesa de los áridos se procedió a seleccionar 6 amasadas de hormigones clasificados como HAC con distinta estructura granular y contenido en cemento, pero manteniendo fija la dosificación en agua y con un volumen de finos totales similar. Sobre cada una de ellas se procedió a analizar la influencia de variar el contenido en la fracción fina de la arena modificando la dosificación de filler y/o arena correctora. Las amasadas en cuestión fueron las mismas que se utilizaron para el estudio de comparación de los métodos de ensayos, normalizado y reducido, expuesto en 3.7.3.

La figura 4.13 muestra la curva granulométrica de las 6 dosificaciones de referencia con la siguiente nomenclatura: (Ej.)1C/350-255 donde:

1C = nombre de la serie;

350 = Kg de cemento/ m^3 ;

255 = Kg de material calizo/ $m^3 < 0.125\text{mm}$ no cemento.

Puede apreciarse que las curvas granulométricas de las amasadas de referencia son muy parecidas en la zona más fina con tamaños de hasta 500 μm . Esto confirma la idea de que las exigencias de finos deben encontrarse en un margen reducido tal como se vio en la tabla 4.2 para conseguir que un hormigón sea caracterizado como HAC, pero que este contenido en finos puede ser obtenido tanto mediante la utilización de contenidos altos de cemento como por su sustitución por finos de otro origen. El método que se utilice para conseguir aportar los finos necesarios condicionará la fracción gruesa de la curva granulométrica. Cuanto mayor sea la finura de la adición empleada (filler o arenas correctoras) mayor será la posibilidad de utilizar cantidades elevadas de grava. Por ello pueden conseguirse dosificaciones muy variadas de HAC para el mismo contenido en finos.

En las figuras 4.14 a 4.19 se presenta las variaciones granulométricas analizadas para cada una de ellas, y en la figura 4.20 a 4.25 se puede observar los resultados de los ensayos reducidos obtenidos en todas las amasadas en función del contenido en finos. En estas gráficas los cuadrados amarillos indican las amasadas que presentan tendencias a la segregación y el círculo rojo marca la dosificación seleccionada como óptima en cada serie. Se ha considerado aquí que empezaba a presentarse síntomas de segregación cuando tras el ensayo del cono reducido se detectaba los primeros indicios de orla de pasta en el frente de avance del cono. Sin embargo esto no indica que el resultado del ensayo de segregación superara los límites planteados para clasificar al hormigón como segregado.

En las figuras 4.14 a 4.19 se ha destacado las composiciones óptimas con línea verde, mientras que las líneas rojas muestran aquellas amasadas demasiado cohesivas o con tendencia a la segregación. Este último se detectó realizando una inspección visual identificando factores como la exudación del hormigón, la presencia de una aurilla de pasta alrededor del ensayo de flujo de cono o el aspecto adherente del conjunto árido – pasta.

Se aprecia que las granulometrías óptimas se encuentran en un margen muy estrecho, por lo que deberá exigirse un control estricto del contenido en finos durante la producción de un HAC. Estas gráficas deben considerarse únicamente con carácter orientativo ya que no tenían la finalidad de detectar el punto de cambio de tendencia. Sin embargo, se destaca que las variaciones analizadas en el contenido en finos de apenas 30 o 40 kg /m³, a pesar de ser poco importantes en relación al contenido en sólidos totales del hormigón, pueden conducir a dosificaciones no aceptables. Estos efectos deberán estudiarse como parte de las variaciones del contenido en finos ya sea como errores en la adición de fílleres específicos, o como variación del contenido en finos de las arenas. En este sentido, y como orden de magnitud, las variaciones analizadas podrían producir efectos similares a un cambio en el contenido en finos de una arena entre el 3 y el 4%, variación que no es irreal en la línea de suministro de algunas canteras. En el capítulo 07 se ampliará el estudio de sensibilidad de este tipo de hormigones.

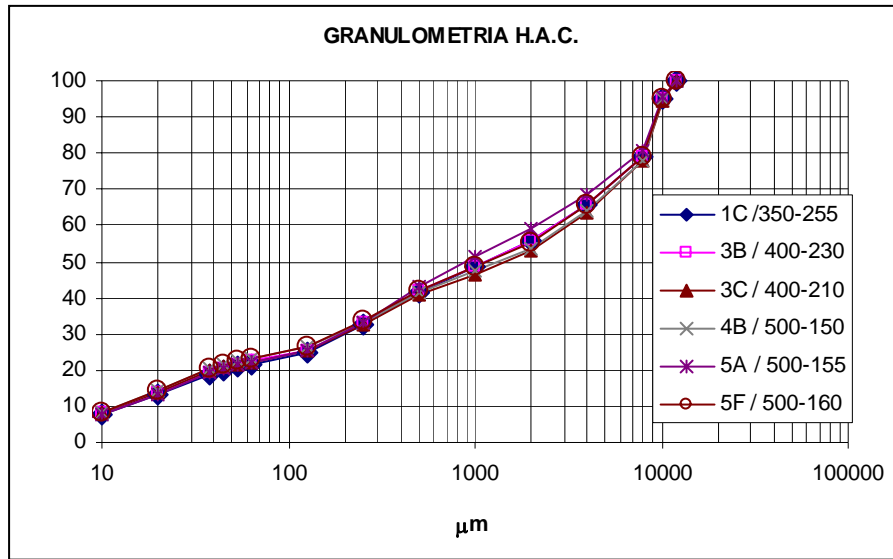


Fig. 4.13. Granulometría de las dosificaciones seleccionadas

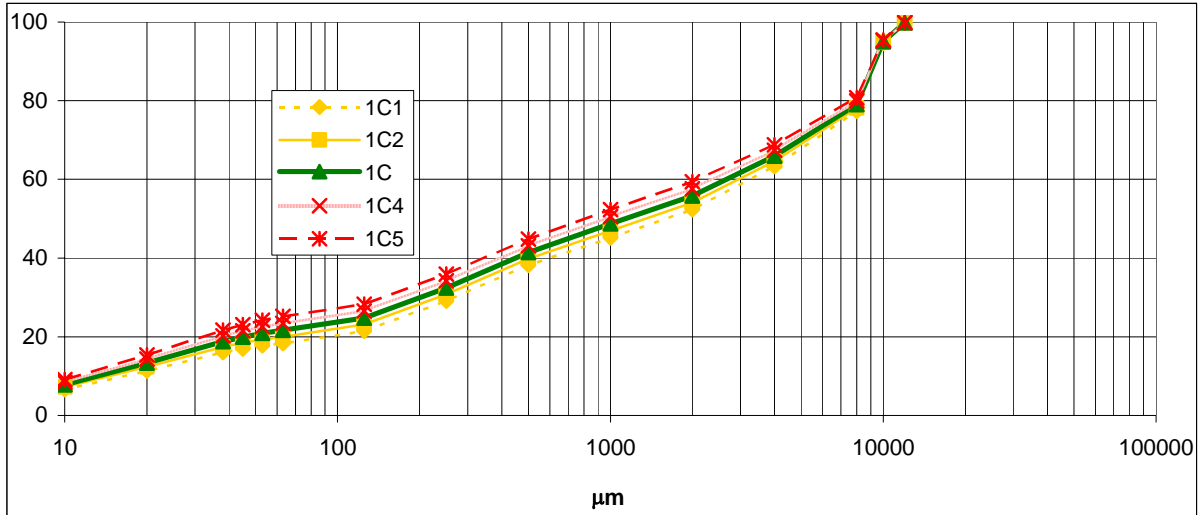


Fig. 4.14 Granulometría de los hormigones de la serie 1C

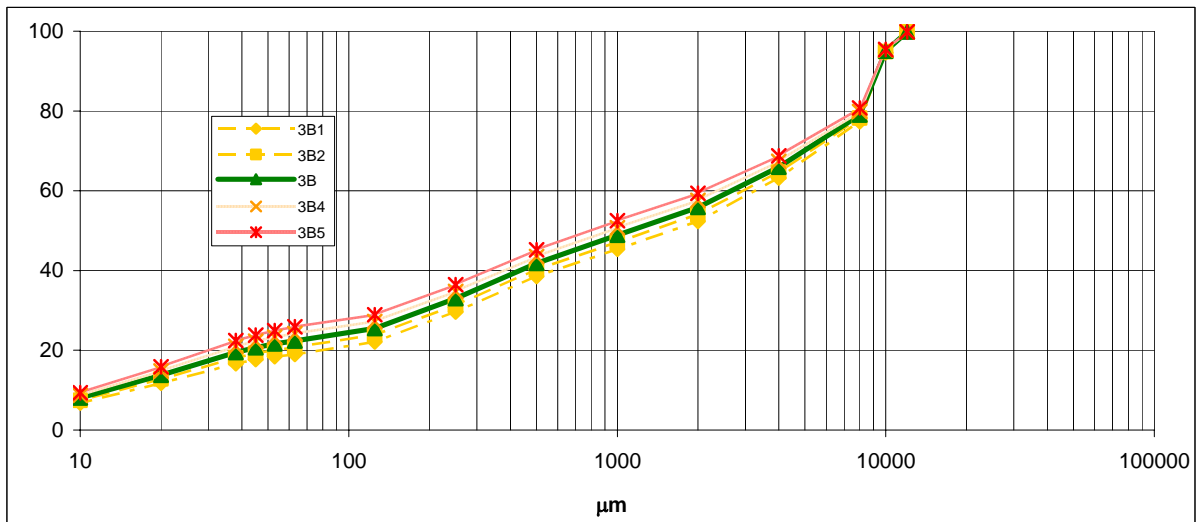


Fig. 4.15 Granulometría de los hormigones de la serie 3B

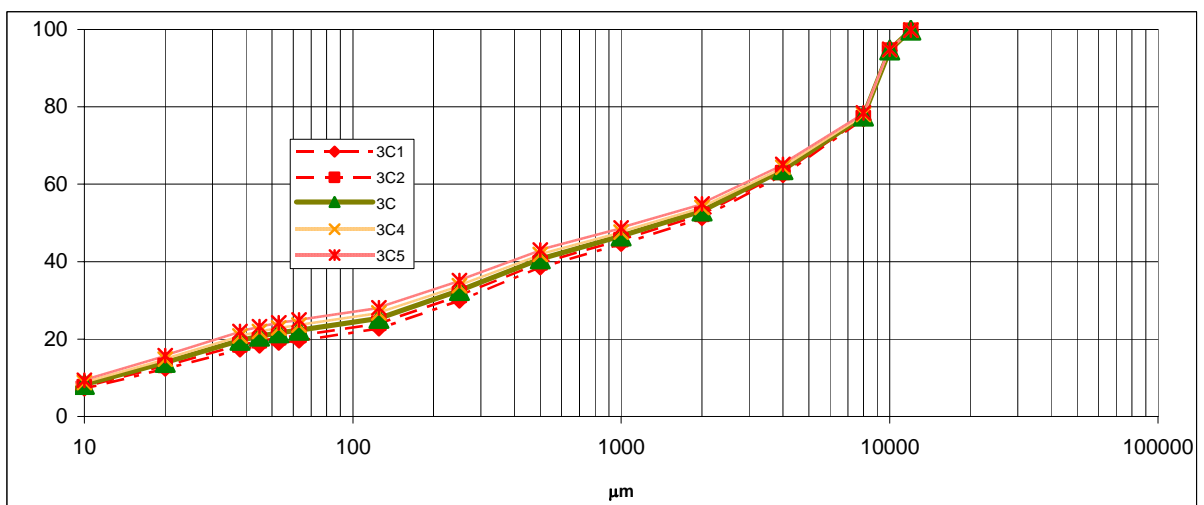


Fig. 4.16 Granulometría de los hormigones de la serie 3C

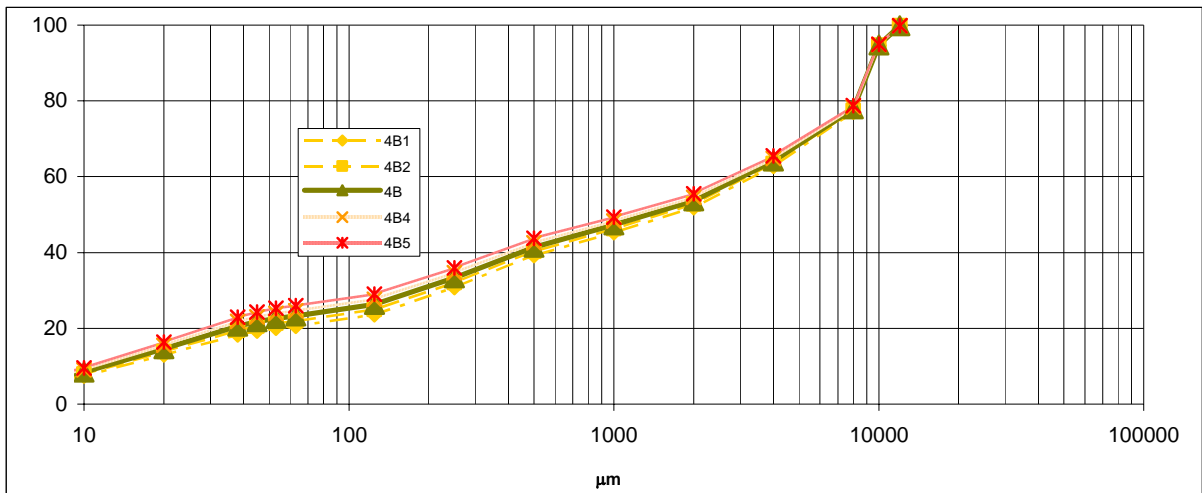


Fig. 4.17 Granulometría de los hormigones de la serie 4B

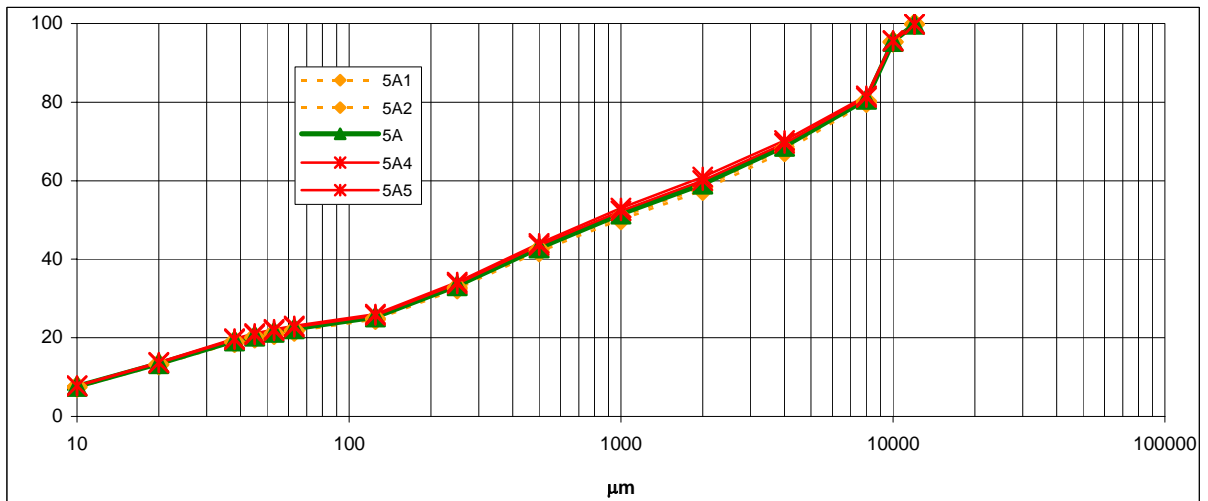


Fig. 4.18 Granulometría de los hormigones de la serie 5A

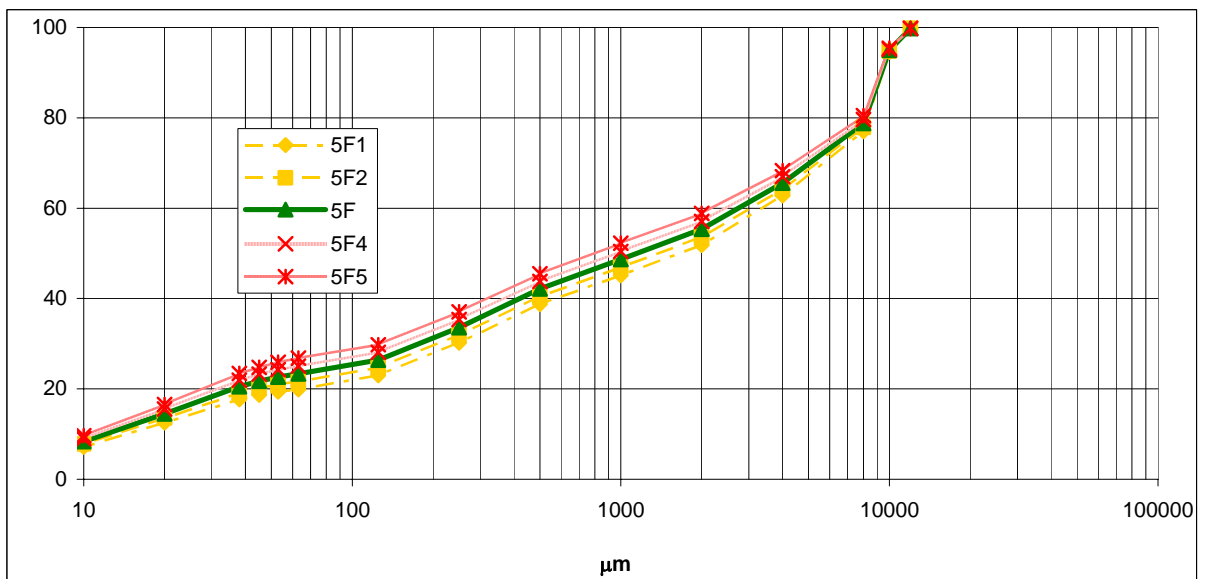


Fig. 4.19 Granulometría de los hormigones de la serie 5F

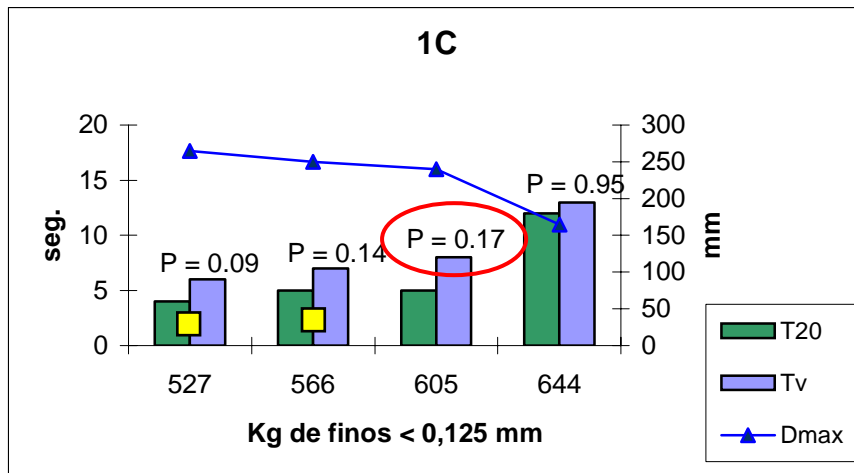


Fig. 4.20 Serie 1C resultado de ensayos en modelos reducidos.

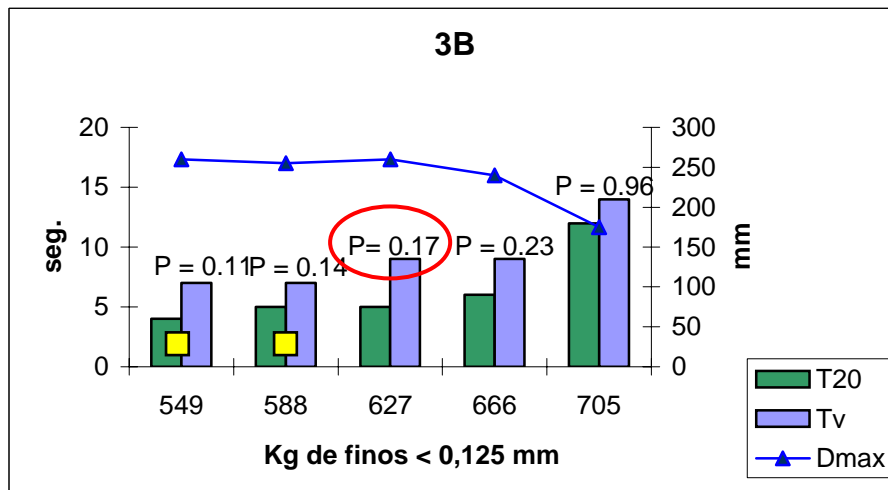


Fig. 4.21 Serie 3B resultado de ensayos en los modelos reducidos.

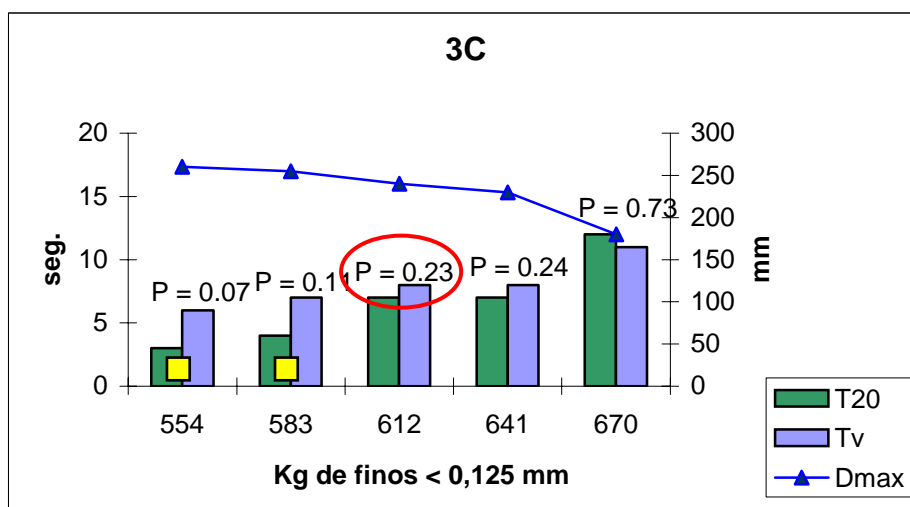


Fig. 4.22 Serie 3C resultado de ensayos en los modelos reducidos.

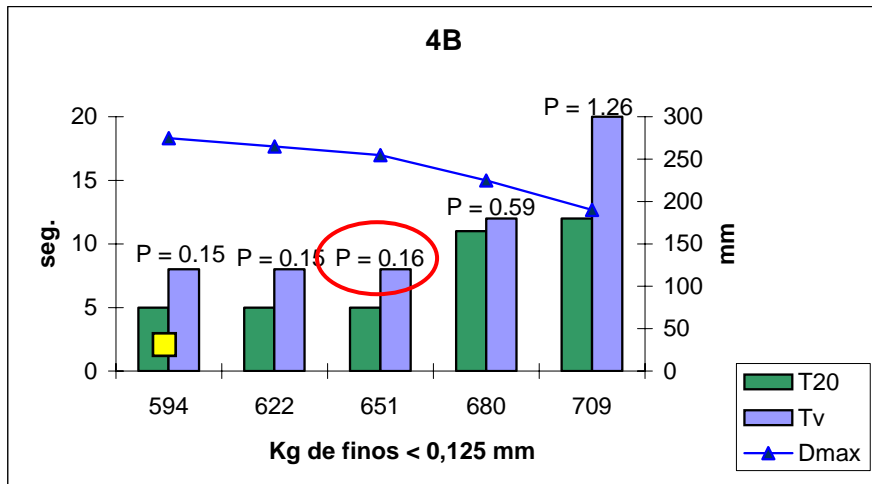


Fig. 4.23 Serie 4B resultado de ensayos en los modelos reducidos.

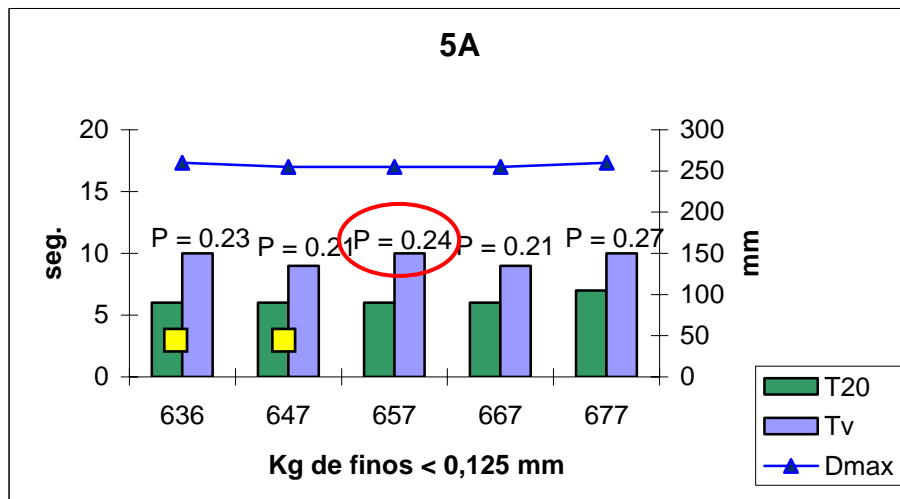


Fig. 4.24 Serie 5A resultado de ensayos en los modelos reducidos.

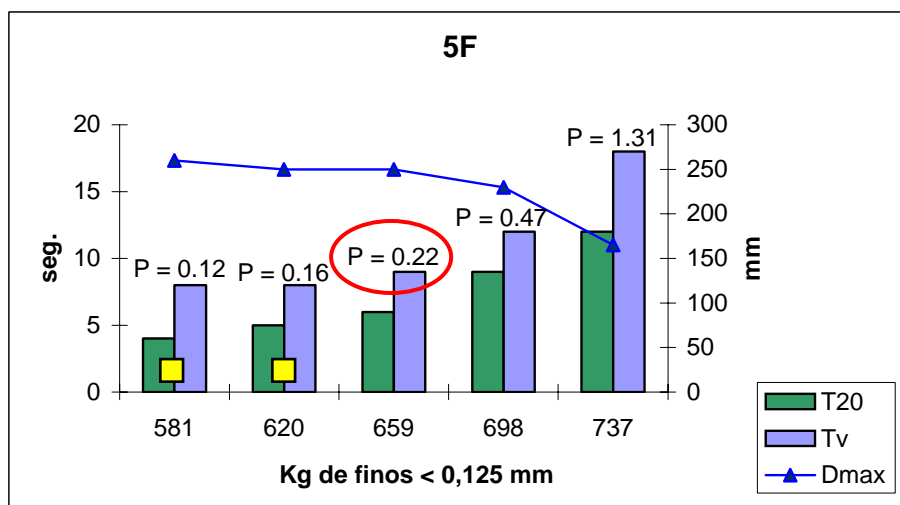


Fig. 4.25 Serie 5F resultado de ensayos en los modelos reducidos.

4.6 OPTIMIZACIÓN DE COMPOSICIÓN DE LOS ÁRIDOS EN UN HAC

En muchas aplicaciones, cuando se pretende dosificar un hormigón la relación a/c viene determinada por las exigencias de resistencia o durabilidad, y el contenido en cemento se reduce al máximo, dentro de los límites permitidos por los códigos, por motivos de economía. Dado que la selección de los áridos a emplear para la fabricación del hormigón también está muy condicionada por la disponibilidad en la zona, las posibilidades de optimización de un hormigón suelen reducirse a determinar las proporciones más idóneas en las que se puede mezclar los distintos áridos.

Cuando se pretende dosificar un HAC el planteamiento será similar si la producción pretende ser comercialmente viable. En este apartado se plantea un proceso simple de optimización de mezclas de áridos basado en el criterio de que la composición ideal corresponderá con aquella que permita una puesta en obra más fácil. Este criterio es coherente con las hipótesis planteadas por Baron- Lessage (1976).

El proceso a seguir consistirá en dosificar una mezcla base que cumpla las exigencias previas sobre la dosificación de cemento y a/c, y que cuente con un aditivo suficientemente eficaz y en dosificación adecuada para garantizar la autocompactabilidad. El contenido en finos se debe garantizar dentro de los criterios mínimos para evitar la segregación. Sobre esta mezcla base se variará la proporción relativa grava / arena y se determinará sus propiedades en estado fresco, seleccionando como óptima la dosificación para la que se obtenga los mejores parámetros en la medida de la autocompactabilidad.

La aplicación de este criterio tiene como ventaja el hecho de que la optimización se realiza sobre mezclas completas con todos los materiales que compondrán el HAC y con un sentido eminentemente práctico, sin menospreciar otros procedimientos más desarrollados científicamente, pero de aplicación menos directa en una producción industrial.

Como ejemplo práctico se realizó la optimización del esqueleto granular de dos mezclas con contenido en cemento de 350 y 400 kg/m³, relación a/c de 0,45 y 0,52, y contenido

en filler calizo añadido de 205 y 177 kg/m³ respectivamente. El volumen de agua utilizado fue de 180 litros y el porcentaje de aditivo 2% del peso del cemento.

Para la fabricación se utilizó la amasadora de morteros y se realizaron los ensayos de cono y embudo reducido. Se utilizó como áridos una arena 0/4 de río y una grava machacada 7/12. Durante los ensayos se varió la proporción relativa de grava sobre el conjunto (grava + arena), entre un 35 y un 65% con escalones del 5%. Los resultados se muestran en la figura 4.26

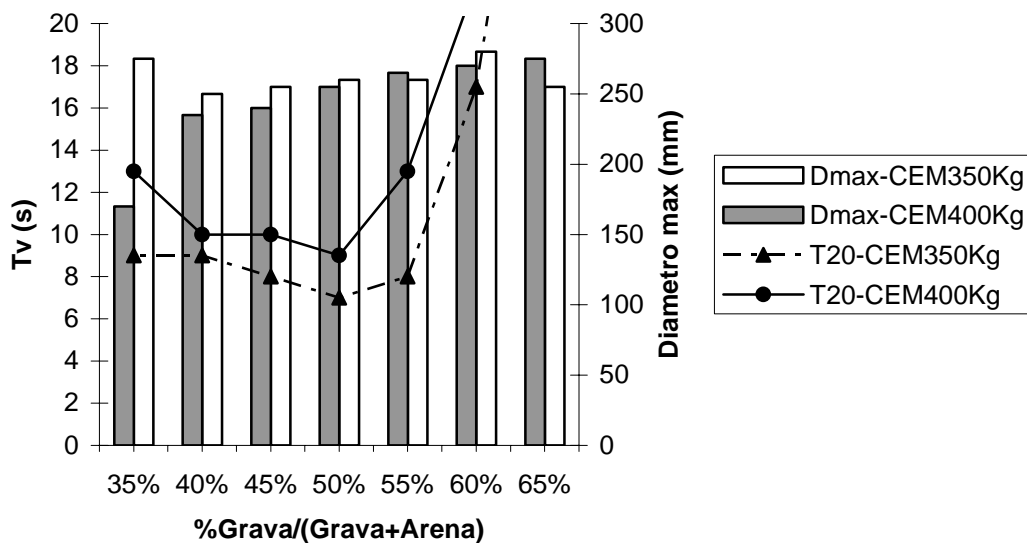


Fig. 4.26 Optimización del esqueleto granular

De acuerdo con los resultados obtenidos el tiempo medido en el ensayo de embudo reducido presentan una disminución importante cuando el contenido en grava pasa del 65 al 50 %. Esto evidencia que un exceso de grava causa el bloqueo del hormigón en el extremo de salida del embudo perjudicando el flujo del hormigón. Porcentajes de grava inferiores al 45% solo incrementan ligeramente los tiempos de embudo y el conjunto adopta un comportamiento similar al de un mortero. Estos resultados son similares para los dos hormigones analizados, con la única diferencia de que el punto mínimo de tiempos de embudo parece desplazarse ligeramente hacia contenidos en grava superiores cuando el contenido en cemento crece. Esta consideración es coherente con los resultados previos presentados.

La definición de óptimo según este criterio dependerá del planteamiento de los ensayos que deberá fijar dos aspectos importantes: el nivel de exigencias de resistencia al bloqueo del hormigón y el nivel de estabilidad que se pretenda dar a la mezcla.

Las exigencias de resistencia al bloqueo serán controladas por la abertura inferior del embudo. Cuanto más estrecha sea ésta más exigente será el ensayo, y por tanto la demanda de árido fino del hormigón crecerá.

El nivel de estabilidad de la mezcla se determinará por el criterio de selección del contenido en grava que se decida. La elección de un contenido en grava cercano al que presenta el mínimo tiempo de embudo producirá un hormigón con riesgos de atasco importantes ya que la pendiente de la curva es muy abrupta para contenidos en árido grueso mayores. Por ello se recomendará seleccionar contenidos en grava ligeramente inferiores a los que producen este mínimo.

El criterio propuesto no pretende plantear un hormigón óptimo con carácter universal sino adaptar su optimización al las necesidades de cada obra en concreto. Como ventajas que aporta en esta línea destacamos:

- adapta las exigencias de riesgo frente al bloque a las condiciones de obra
- optimiza la composición de los áridos sobre mezclas completas de hormigón considerando la influencia de la composición de las pastas, y los áridos a emplear.

Aunque en este apartado se han presentado ensayos sobre modelos reducidos los procedimientos y las conclusiones son extrapolables a hormigones con áridos de tamaño superior y ensayos en tamaño estándar. Para contrastar los resultados obtenidos se decidió compararlos con los de un criterio de optimización por medio de mezclas en seco de acuerdo con el método propuesto por Gomes (2001) basado en la norma ASTM C29/CM29. Para ello se utilizaron los mismos áridos empleados en el punto anterior.

La figura 4.27 muestra la densidad obtenida para las mezclas ensayadas. Se aprecia que porcentajes de grava inferiores al 40% o superiores al 70% producen descensos importantes de densidad, pero no se detecta un claro máximo en el intervalo central.

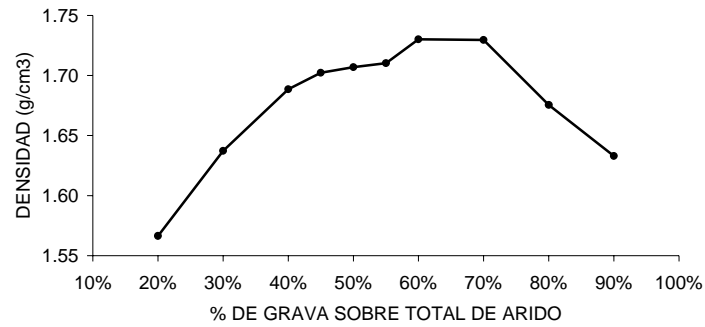


Fig. 4.27 Densidad de mezcla en seco – Influencia de la relación grava 7/12 mm / arena

Siguiendo con el criterio de buscar las mezclas de máxima densidad se decidió analizar la posibilidad de incluir otros áridos para conseguir mezclas más compactas. En la figura 4.28 se muestra las tendencias obtenidas en combinaciones de arena y grava 7-12 con la inclusión de una grava 4-7. Cada línea muestra las tendencias en función del contenido en grava 4/7 sobre el árido grueso, cuando el contenido en arena representa un 50, 55 y 60% respectivamente.

Se puede comprobar que la introducción del árido 4/7 no produce mejoras en la densidad del conjunto, y que puede incluso reducir esta densidad si el contenido en arena es elevado.

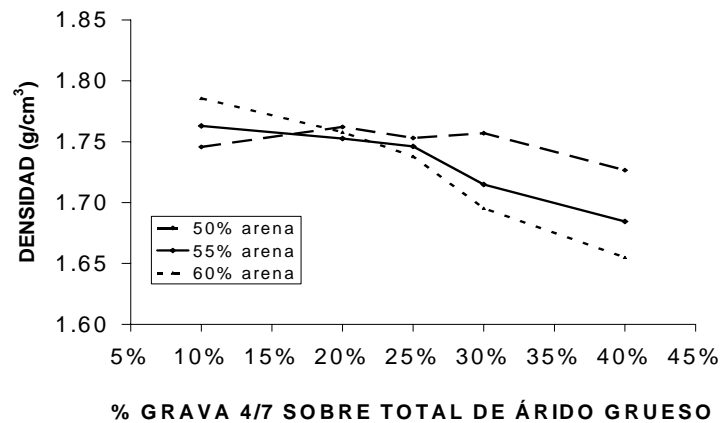


Fig. 4.28 Densidad de la mezcla en seco – influencia de la grava 4/7

4.7. EXTRAPOLACIÓN DE LOS CRITERIOS A LAS DOSIFICACIONES DE HORMIGONES CON ÁRIDOS DE TAMAÑO MÁXIMO SUPERIOR A 12 mm

Si bien no es el objetivo fundamental de este estudio, como extrapolación de los criterios y observaciones realizadas durante los estudios expuestos en este capítulo se pueden plantear unas recomendaciones para la dosificación de HAC en general:

- **Tamaño máximo de árido:** Viene condicionado por la dificultad de la puesta en obra del hormigón. Debe garantizar un paso fácil entre las armaduras. Se determinará el tamaño máximo del árido más grueso que se pretenda utilizar. Se recomienda su determinación con la mayor precisión posible.
- **La decisión del contenido en cemento mínimo, y de la relación agua / cemento** seguirá decidiéndose, como en los hormigones tradicionales a partir de las exigencias de resistencia y durabilidad, y con los inevitables condicionantes económicos.
- **El contenido en finos adicionales necesarios** se determinará por medio de un ajuste de la curva de Bolomey, fijando un parámetro “a” que se adapte al objetivo deseado. Se propone que un valor de “a” de 15-16 para hormigones de tamaño máximo de árido de 20 mm y del orden de 20 para hormigones de 12 mm de tamaño máximo de árido. La decisión de un parámetro de Bolomey mayor conducirá a dosificaciones con mayor riesgo de segregación por separación de lechada, mientras que una sobreestimación de este parámetro llevaría a dosificaciones con tendencia a la sedimentación. Esta decisión deberá fijarse en función de los riesgos de la aplicación concreta que pretenda abordarse.
- **La utilización de aditivos moduladores de la viscosidad** permiten la fabricación de hormigones con menor contenido en finos.

- El aporte de los finos necesarios se debe conseguir contando con el de los finos propios de las arenas empleadas, y en su caso con el aporte de filleres específicos.
- La distribución granulométrica de la fracción gruesa es menos importante, y puede lograrse hormigones autocompactables con granulometrías continuas o discontinuas.

Con criterios como los indicados aquí se han dosificado los hormigones que se han utilizados para los ensayos de robustez que se desarrollarán en el capítulo 07. Del análisis de estas dosificaciones puede deducirse que es viable el diseño de hormigones autocompactables de características diferentes. El éxito o fracaso de una aplicación dependerá de la adaptación del tipo de hormigón diseñado a las propiedades realmente necesarias.

CAPÍTULO 5

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y EFECTIVIDAD DE LOS ADITIVOS UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE LOS HAC

5. 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los aditivos son materiales imprescindibles a la hora de fabricar un HAC. Los mas utilizados son normalmente los derivados de éteres policarboxilicos, capaces de aportar la suficiente fluidez a la mezcla de hormigón.

Sin embargo la constante evolución de la industria química, unido la infinidad de combinaciones de cadenas químicas de estos polímeros, hacen que la variedad de productos en el mercado sea suficientemente grande como para exigir ajustes en la dosificación para garantizar la calidad del hormigón cuando se realiza un cambio en el aditivo suministrado.

Así, bajo el paraguas de una misma familia de aditivos nos encontramos con multitud de productos comerciales de efectividad muy diferente y con efectos secundarios muy variables.

Es difícil justificar estas diferencias a partir de ensayos químicos y físicos tradicionales. Los elementos que forman los aditivos y sus cadenas son similares o casi idénticos, y las características organolépticas proceden muchas veces de otros constituyentes sin utilidad desde el punto de vista de las funciones del aditivo y que se han añadido ya sea para diferenciar por el aspecto productos comerciales propios, o para dificultar posibles intentos de “copia” por parte de la competencia actuando como componentes “trampa”. Debido a que los HAC son muy sensibles a variaciones en cantidades o tipos de aditivos, se planteó un estudio de caracterización y análisis de la efectividad sobre aditivos utilizados en la fabricación de los HAC.

No es la finalidad de este estudio plantear métodos para conocer la composición interna de los aditivos, ni justificar su efectividad a partir de su composición.

Los objetivos se centran en constatar la diferentes efectividades de aditivos de la misma familia y comprobar la utilidad y eficacia de algunos ensayos de caracterización para diferenciar entre si, los aditivos reductores de agua de alto rango (RAAR). Con ello se pretende proponer criterios para verificar la continuidad de un suministro; es decir, comprobar que el producto recibido en cada momento coincide con el previamente elegido, sin entrar en discusiones sobre su influencia en la efectividad.

Se caracterizaron siete aditivos, fabricados a base de éter policarboxílico, procedentes de distintos suministradores.

Los ensayos analizados fueron la espectrofotometría infrarroja (FTIR), espectrometría RMN y la termogravimetría además de los ensayos clásicos como densidad, residuo sólido o pH.

5.2 PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

5.2.1 Ensayos de caracterización de los aditivos

Los aditivos fueron caracterizados según los siguientes procedimientos:

- De cada aditivo se registraba sus características organolépticas y se determinaba sus propiedades básicas (color, densidad, pH)
- Sobre los siete aditivos analizados se determinó el contenido en residuo sólido según norma UNE EN 480-8 por secado en estufa a 105°C hasta peso constante.
- Sobre los 4 aditivos seleccionados tras la primera fase del estudio de efectividad (véase 2.2) se realizaron ensayos de caracterización por medio de espectrometría infrarroja FTIR para intervalos de número de ondas entre 400 y 4000 cm^{-1} . Para ello se utilizó un espectrómetro de masas “Genesis II” (fig 5.1) y se trabajó sobre muestras de aditivos previamente liofilizadas (Velásquez 2002).
- Sobre los aditivos seleccionados se realizó un análisis termogravimétrico para temperaturas entre 35°C y 1000°C. Para ello se utilizó el equipo de termogravimetría TGA850 Melter Toledo (fig 5.2).



Fig. 5.1. Espectrometría Infrarroja FTIR

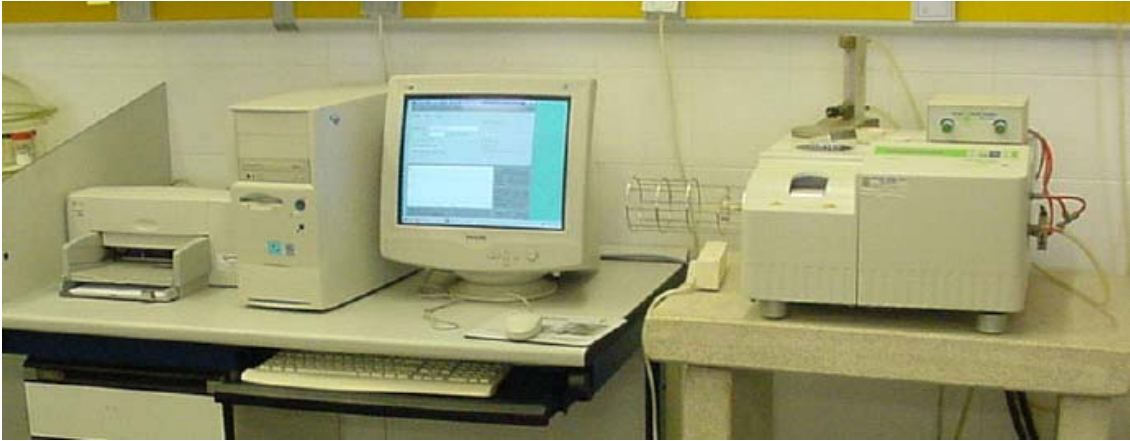


Fig. 5.2 Ensayo de termogravimetría

5.2.2 Determinación de la efectividad de los aditivos

Para analizar la efectividad de los aditivos y realizar una preselección de los mismos, éstos se analizaron utilizando el cono de Marsh (fig.5.3) y siguiendo el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 455.

Como variables se consideraron los porcentajes de aditivo y las relaciones a/c de acuerdo con lo indicado en la tabla 5.1.

Aditivo	% producto comercial en respecto al peso del cemento	w/c
A2		
A3	0,5	0,35
A4	1,0	0,40
A6	1,5	0,43
A7	2,0	0,45
A8	2,5	
A9		

Tabla 5.1. Variables analizadas en las pastas de cemento



Fig.5. 3 Cono de Marsh

A partir de estos ensayos se seleccionaron 4 de los aditivos y sobre ellos se realizó un análisis más intenso de efectividad por medio de estudios de fluidez con cono de Marsh, analizando el efecto del posible uso de filleres de distinta procedencia. La figura 5.4 muestra la granulometría de los filleres empleados. Se trata de filleres de distinta finura, lo que deberá ser tenido en cuenta en el análisis de resultados.

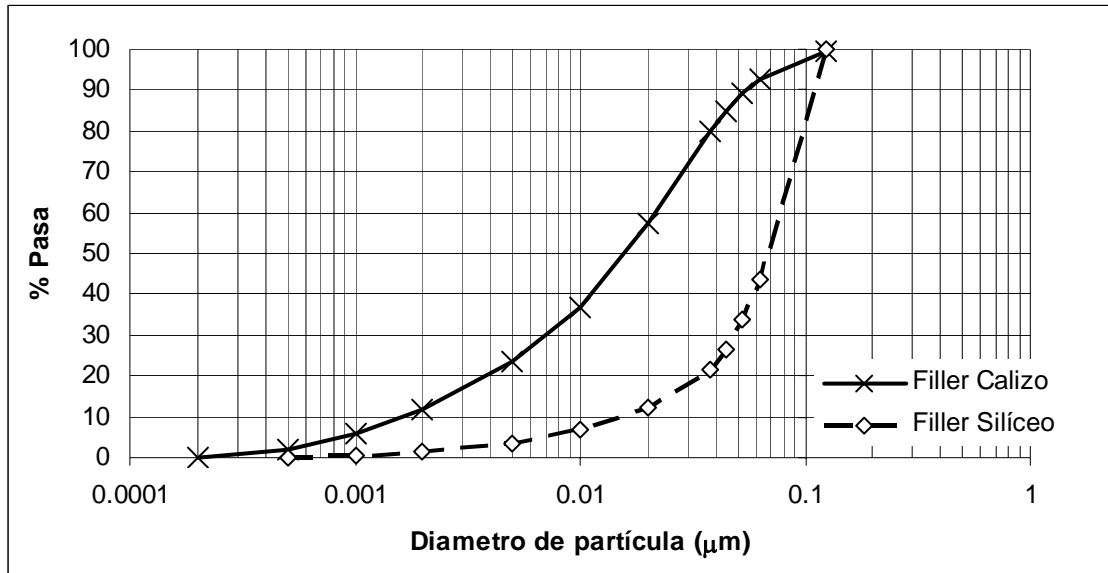


Fig.5.4 Granulometría Filler calizo y filler silíceo

Para completar el análisis de efectividad se caracterizó el comportamiento analizando la viscosidad de pastas por medio de un viscosímetro rotacional Bohlin Visco 88 BV (fig.5.5). En éste se mantuvo como variable la presencia o no de filler calizo junto con la dosificación de aditivo que fue valorada tanto sobre el contenido en cemento como sobre el contenido en finos totales, y considerando el residuo sólido del aditivo o el total de producto comercial.



Fig.5.5 Viscosímetro rotacional Bohlin Visco 88 BV

Para los estudios de fluidez de pastas con filleres se mantuvieron fijas las relaciones $a/c = 0,43$ y $\text{filler/cemento} = 0,28$. Se analizaron seis porcentajes distintos de aditivo. La tabla 5.2 muestra las combinaciones utilizadas en esta etapa. La tabla 5.3 presenta las variaciones propuestas para esta etapa.

Aditivo	% del producto comercial	w/c	Tipo de Filler
A3	0,5	0,43	Calizo o Silicio
A6	1,0		
A8	1,5		
A9	2,0		
	2,5		
	3,0		

Tab. 5.2. Variables evaluadas sobre las pastas de cemento + filler

Aditivo	Tipo de filler	Dosificación de aditivo		% del producto comercial
		% de residuo sólido sobre el peso del cemento	% de residuo sólido sobre el peso total de finos	
A3	Sin filler	0.160	0.160	---
A6	Calizo	0.206	0.160	
A8		0.308	0.240	
A9		---	---	0.5 – 1 – 1.5 – 2

Tab. 5.3. Pastas evaluadas utilizando el viscosímetro

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Pré selección de los aditivos:

Los resultados de la primera fase del estudio de efectividad de los aditivos están representados en las graficas de la figura 5.6. Se aprecia claramente, para todos los aditivos, que los tiempos de cono de Marsh decrecen a medida que aumentan las proporciones de aditivo o las relaciones a/c. El método de ensayo deja de ser discriminatorio cuando se utilizan pastas muy fluidas.

El cono de Marsh ha demostrado no ser efectivo a la hora de detectar variaciones de tiempos inferiores a 20 segundos. Por ello no se aprecian variaciones en la efectividad de los aditivos cuando se utilizan relaciones a/c más altas.

Para detectar diferencias de efectividad entre los productos utilizados se ha confeccionado la figura 5.7 en la que se presenta una comparación de los aditivos para las pastas fabricadas con los parámetros $a/c = 0.35$ y 0.5% de dosificación de aditivo sobre el peso del cemento. Se eligieron estos parámetros por ser éste el punto a partir del cual se detecta un cambio brusco de comportamiento de la pasta para la mayoría de los aditivos. Se observa que los aditivos A2, A4 y A7 presentan menor efectividad, mientras que los aditivos A6, A9, A3 y A8 presentan tiempos de cono mas bajo, indicando que éstos aportan mayor velocidad de flujo a las pastas.

La mayor efectividad de estos aditivos no es debido a un mayor contenido en residuo sólido tal como puede apreciarse en la tabla 5.4.

En esta etapa se seleccionaron los cuatro aditivos mas efectivos, es decir A3, A6, A8 y A9. Con estos aditivos se continuó el estudio de efectividad.

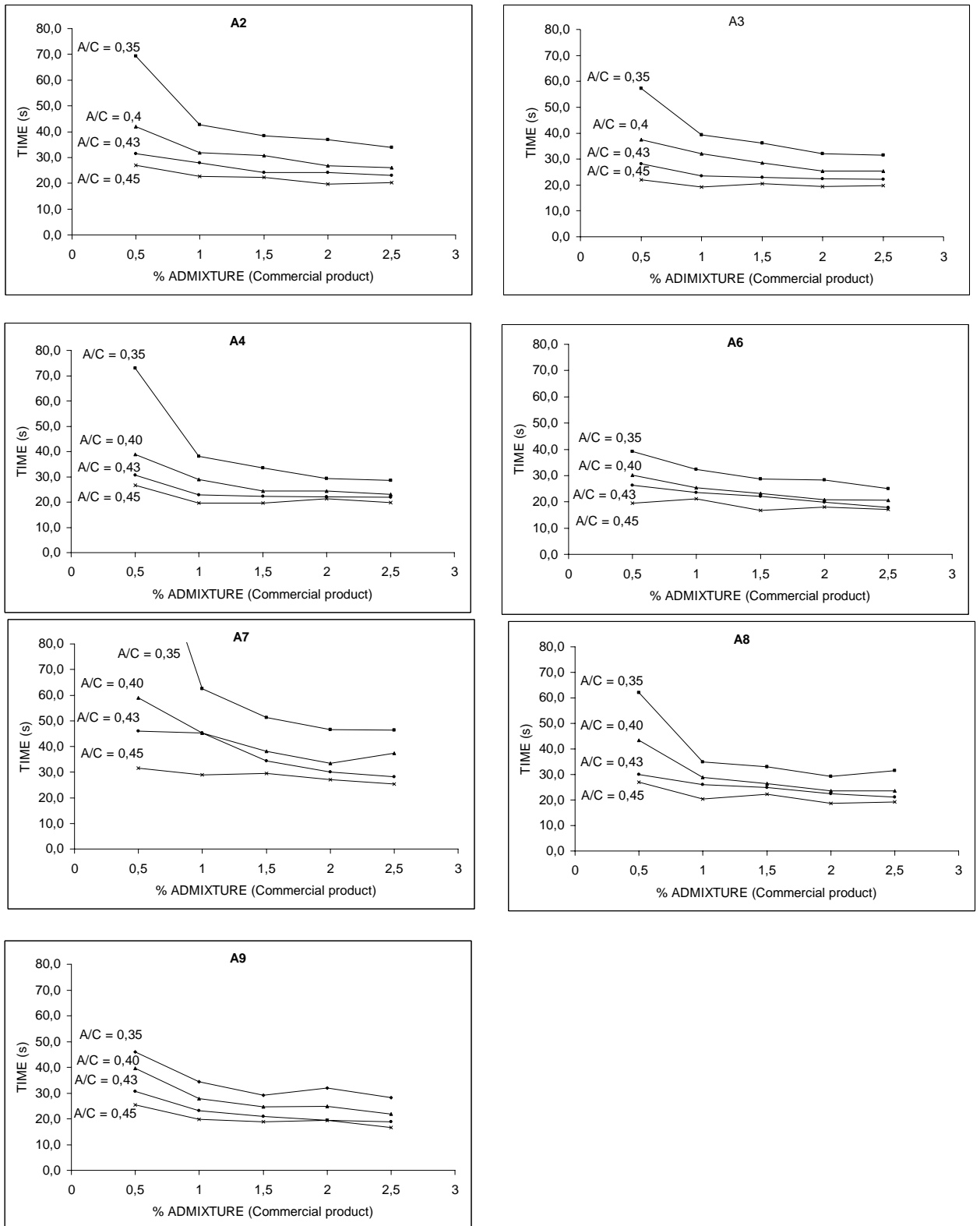


Fig. 5.6. Resultados de cono de Marsh para pastas fabricadas solo con cemento

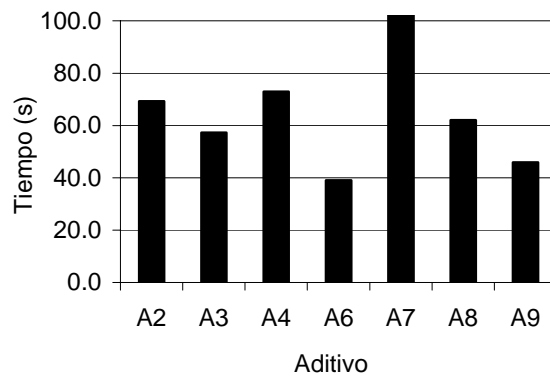


Fig.5.7 Tiempos de flujo de cono de Marsh para cada aditivo.
Relación a/c = 0,35 y aditivo al 0,5% sobre el cemento

5.3.2 Estudios de efectividad de los aditivos seleccionados por medio del Cono de Marsh

En la fig.5.8 se presentan los resultados de cono de Marsh para las pastas fabricadas con variaciones de filler, calizo y silíceo. Se aprecia que los tiempos de flujo se encuentran entre 30 y 35 segundos, excepto para la pasta fabricada con el aditivo A8 y filler calizo, donde el tiempo de flujo llega a superar los 45 segundos. Se observa que, en general, la adición de filler no ha afectado mucho a la fluidez de la pasta, ya que los tiempos encontrados para las pastas fabricadas con adiciones de filler se aproximan a los tiempos de las respectivas pastas fabricadas con solo cemento y mismas proporciones de aditivo y relación a/c.

Asimismo, se observa que las pastas fabricadas con filler calizo presentan tiempos algo superiores a las fabricadas con filler silíceo, lo que indica que el filler calizo presenta una adsorción más importante de aditivo que el filler silíceo. Este comportamiento puede deberse al hecho de que el filler calizo presenta una distribución granulométrica mucho más fina que la del filler silíceo.

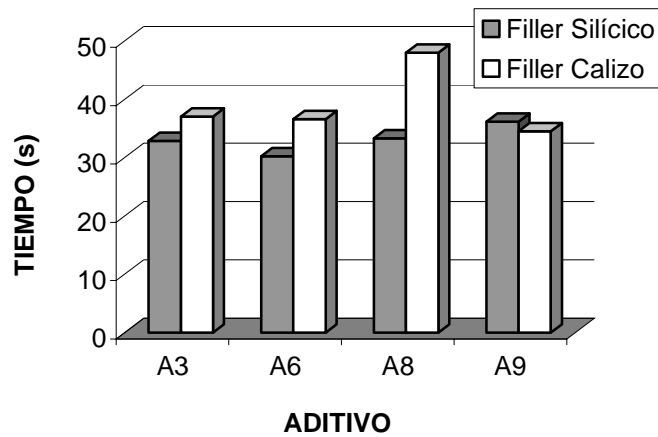


Fig.5.8 Resultados del cono de Marsh para pastas fabricadas con cemento + filler. Relación a/c = 0,43 y dosificación de aditivo = 1% sobre el cemento

5.3.3 Caracterización físico-química de los aditivos empleados

La tabla 5.4 muestra los resultados de residuo sólido para cada uno de los aditivos. Se observa que hay diferencias importantes entre éstos porcentajes, principalmente entre los aditivos A3 y A8. Considerando que todos los aditivos poseen el mismo principio activo estos resultados sugieren que dos pastas fabricadas con la misma proporción de producto comercial, de cada uno de estos dos aditivos, deberían presentar resultados distintos en el cono de Marsh. Sin embargo, y como se ha comentado anteriormente, los resultados encontrados en estas condiciones son muy similares, con lo que se confirma la poca efectividad del cono de Marsh a la hora de detectar diferencias entre pastas que presentan tiempos de fluidez inferiores a los 20 segundos.

Aditivo	A2	A3	A4	A6	A7	A8	A9
Residuo sólido %	29.64	36.21	36.08	28.48	30.85	20.53	30.59

Tabla 5.4. % de residuo sólido de los aditivos utilizados

La tabla 5.5 presenta los resultados de los ensayos de termogravimetría realizado sobre los aditivos seleccionados. Se puede observar que las pérdidas de masa para los rangos de 35°C a 600°C y de 600°C a 1000°C son similares entre las muestras, con lo que este criterio no puede ser utilizado para establecer diferencias entre los aditivos.

Sin embargo, las curvas del diferencial termogravimétrico (fig.5.9) muestran que los aditivos sufren diferentes procesos de descomposición a diferentes rangos de temperatura. A partir del espectro obtenido el análisis termogravimétrico detecta tres comportamientos distintos de pérdida de masa. Los aditivos A6 y A8 han mostrado un comportamiento similar entre sí, mientras que los aditivos A3 y A9 muestran curvas diferentes a las anteriores y entre sí.

Aditivo	Na ⁺ ppm	K ⁺ ppm	Termogravimetría, pérdida de peso en %	
			T ^a <600°C	600 < T ^a < 1000
A3	2600	28	90.45	4.65
A6	5600	7.5	86.23	6.58
A8	3500	6.7	88.35	6.07
A9	3300	1140	85.87	4.98

Tabla 5.5. Caracterización físico química de los aditivos

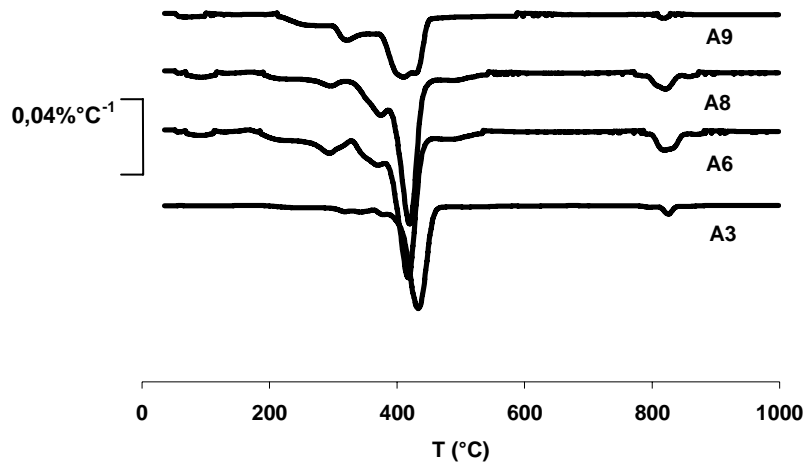


Fig.5.9. Curvas diferenciales (DTG) del ensayo termogravimétrico sobre muestras liofilizadas

5.3.4 Influencia en el comportamiento reológico de las pastas (Viscosímetro):

El viscosímetro ha mostrado ser un método de ensayo más potente que el cono de Marsh para detectar diferencias de comportamiento en las pastas

Las figuras 5.10 a 5.13 muestran los resultados de los ensayos realizados sobre pastas compuestas de cemento y filler para diferentes porcentajes de aditivos. Considerando como referencia de dosificación el porcentaje de producto comercial sobre el peso de cemento.

Para los porcentajes de aditivo de 0,5; 1,5 y 2% no se aprecia diferencias importantes entre los productos analizados. Dosificaciones bajas (0,5%) producen pastas muy viscosas con todos los aditivos, mientras que dosificaciones altas conducen a pastas muy fluidas con todos ellos (fig. 5.10, 5.12 y 5.13). Para una dosificación del 1% de producto comercial se detecta cambios de efectividad importantes entre los aditivos (fig 5.11). Con el aditivo A9 se consigue una viscosidad muy baja en todo el rango de esfuerzos de corte, mientras que el aditivo A8 presenta una viscosidad sensiblemente superior a los demás aditivos, que se colocan en una situación intermedia.

Si se representan los resultados considerando únicamente el residuo sólido de aditivo se obtiene las fig. 5.14, 5.15 y 5.16.

Al comparar las fig. 5.14 y 5.15 se aprecia que las pastas fabricadas con filler (fig.5.15) son más viscosas que las obtenidas con sólo cemento (fig.5.14) a pesar de que contienen una mayor dosificación de aditivo.

Este efecto del filler no había sido detectado con tanta claridad en los ensayos realizados con el cono de Marsh

Finalmente, la figura 5.16 muestra el comportamiento de las pastas para un porcentaje de residuo sólido del 0,308%. De acuerdo con esta grafica los aditivos A3 y A9 son los que presentan mayor y menor efectividad respectivamente, mientras que los aditivos A6 y A8 presentan exactamente el mismo comportamiento.

Estos resultados indican que los aditivos A6 y A8, procedentes de la misma marca comercial, son el mismo aditivo y que la única diferencia existente entre ellos es la concentración de residuo sólido en producto comercial. Además el comportamiento de los aditivos A6 y A8 caracterizados con el viscosímetro concuerda con los resultados las curvas diferenciales termogavimétricas, donde dichos aditivos también presentaron resultados similares entre ellos.

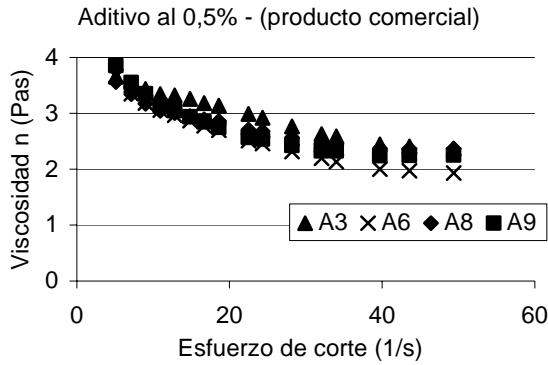


Fig. 5.10. Viscosímetro. Pastas de cemento y filler aditivo al 0,5%

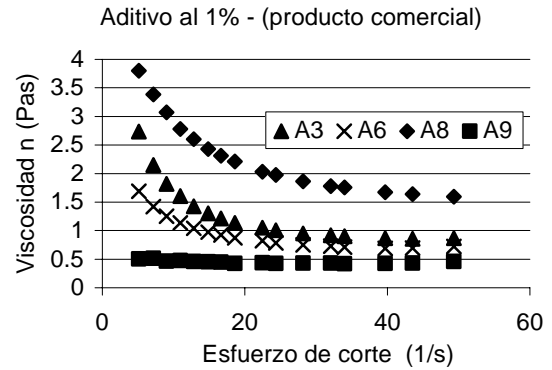


Fig. 5.11. Viscosímetro. Pastas de cemento y filler aditivo al 1%

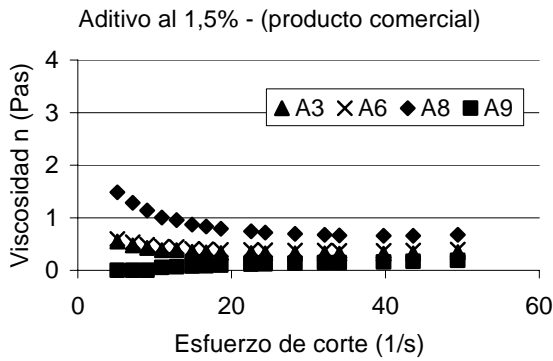


Fig. 5.12. Viscosímetro. Pastas de cemento y filler aditivo al 1,5%

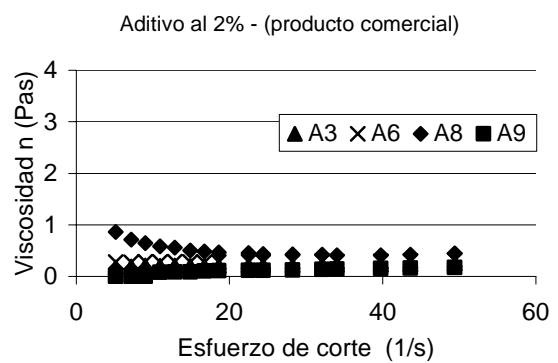


Fig. 5.13. Viscosímetro. Pastas de cemento y filler aditivo al 2%

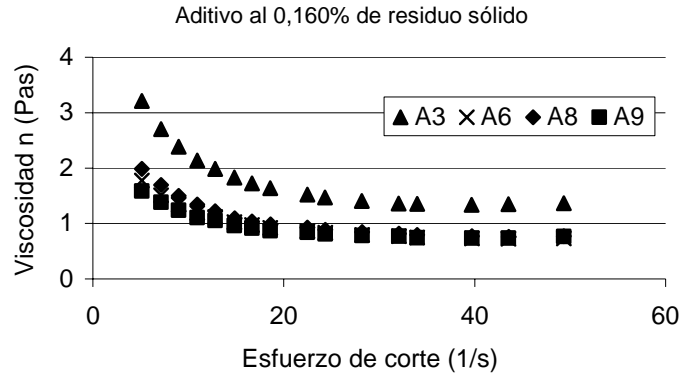


Fig. 5.14. Viscosímetro. Pastas de cemento. Aditivo al 0,160% de residuo sólido.

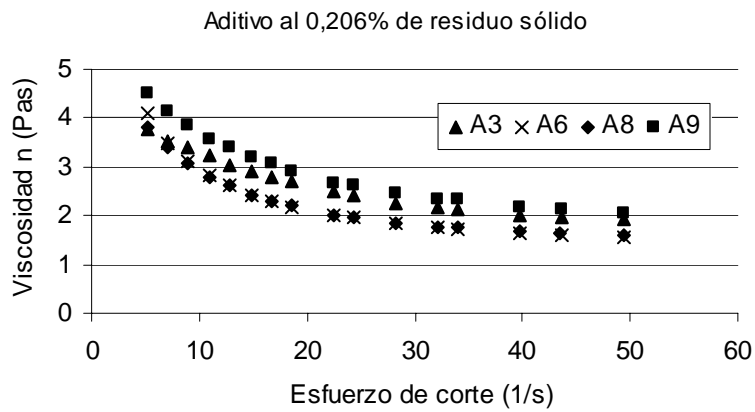


Fig. 5.15. Viscosímetro. Pastas de cemento y filler. Aditivo al 0,206% de residuo sólido.

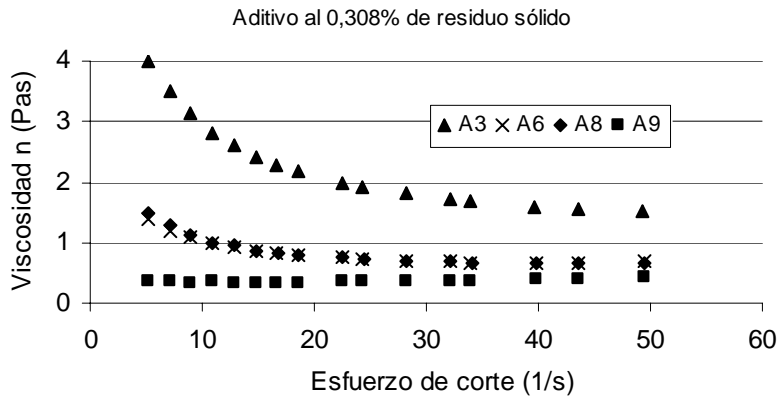


Fig. 5.16. Viscosímetro. Pastas de cemento y filler. Aditivo al 0,308% de residuo sólido.

5.4 CONSIDERACIONES FINALES

En este capítulo se estudiaron siete aditivos RAAR fabricados a base de éter policarboxílico.

Se analizaron las pastas de cemento utilizando el cono de Marsh y viscosímetro, se seleccionaron los cuatro aditivos mas efectivos para realizar estudios sobre pasta de cemento + filler.

La utilización del cono de Marsh como método para optimizar dosificaciones es válida por su bajo coste. El viscosímetro es una herramienta más potente pero con un mayor coste inmovilizado.

Los resultados sugieren, en general, que la adsorción del aditivo es mas importante cuando se utiliza el filler calizo y por tanto, la efectividad del aditivo se ve disminuida.

Se ha detectado diferencias importantes entre los aditivos en cuanto a residuo sólido. Estas diferencias deben tenerse en cuenta a la hora de dosificar el hormigón dado que este factor puede afectar de manera importante el precio final del producto.

Respecto a los ensayos físico-químicos el método analítico FTIR no ha presentado suficiente resolución para detectar diferencias dentro del mismo grupo de aditivos. Pero el análisis termogravimétrico ha detectado diferencias entre los aditivos. De acuerdo con los resultados de este método los aditivos A6 y A8 poseen un comportamiento muy similar lo que concuerda con los resultados del estudio de la viscosidad sobre estos mismos aditivos. Estos resultados nos llevan a concluir que la única diferencia entre estos dos aditivos es el volumen de agua existente en el producto comercial.

Considerando los resultados obtenidos en este estudio, se puede concluir que la combinación del ensayo de residuo sólido y del análisis termogravimétrico pueden ser utilizados para controlar el suministro de aditivo.

Dado el coste de estos ensayos se puede recomendar la conservación de una muestra del aditivo seleccionado para realizar los ensayo termogravimétricos y compararlos con los del suministro en caso de conflictos

CAPÍTULO 6

ESTUDIO DE LA ADHERENCIA DE LOS HAC EN ARMADURAS ACTIVAS

6.1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Se suele admitir que las propiedades adherentes del hormigón dependen fundamentalmente de su resistencia (Mitchell et al 1993, Cousins, Stalling y Simmons, 1994 y den Uijl, 1996). Sin embargo, el alto contenido en finos normalmente utilizado en la composición de los HAC puede plantear dudas sobre su comportamiento adherente en comparación al de los hormigones tradicionales al realizar la transferencia de tensión, o intentar anclar fuerzas adicionales.

Pensando en la aplicación de los HAC en la industria de los prefabricados se planteó analizar el comportamiento adherente de algunas dosificaciones tanto de hormigón tradicional, como de HAC y comparar las posibles variaciones.

Se utilizaron dosificaciones seleccionadas en etapas anteriores de este trabajo. Como referencia se han fabricado hormigones tradicionales de características similares para comparar los resultados.

En este análisis se utilizó el método de ensayo ECADA (Martí – 2000) que se presenta de forma breve en el capítulo 3 de este trabajo, y detalladamente en (Martí 2002 y Arbeláez 2006).

El principal objetivo en este capítulo es analizar, el comportamiento adherente de cordones de pretensado de 7 alambres, en transmisión y anclaje, en HACs con distintas características, fabricados con diferentes relaciones a/c, contenidos en cemento y con granulometrías variadas, y compararlo con HT equivalentes en cantidad de cemento y relación a/c.

6.2 DOSIFICACIONES ESTUDIADAS Y CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN

Para cubrir una amplia gama de hormigones se seleccionaron dosificaciones de HAC, previamente estudiadas, con distintos materiales, granulometrías y características, tanto en estado fresco como en estado endurecido. Por otra parte, se dosificaron hormigones tradicionales para realizar el control del estudio. Se buscó que los hormigones de control tuviesen parámetros de cantidad de cemento y relación a/c lo mas próximo posible de los HAC de una misma categoría.

La nomenclatura de las probetas se llevó a cabo diferenciando inicialmente el tipo de hormigón (**T** tradicional, **AC** autocompactante), seguido de la cuantía de cemento (**350**, **370**, **400**, **425** y **500**) y por último, en el caso de haber, el tipo de adición inerte (**M** marmolina, **F** filler, **MF** mezcla marmolina-filler).

Las dosificaciones empleadas se presentan en la Tabla 6.1.

Para cada dosificación se ensayaron probetas con distintas longitudes para determinar, con una precisión de 5 mm, las longitudes de transmisión y anclaje de la armadura.

Las tablas 6.2 Y 6.3 presenta las tandas y longitudes estudiadas para cada una de las dosificaciones de hormigones tradicionales o autocompactantes

Sobre cada uno de estos hormigones se realizó una batería de ensayos ECADA para determinar las longitudes de transmisión y anclaje.

El llenado de moldes de los hormigones tradicionales se realizó por vibración con energía adecuada a la consistencia de cada caso, garantizando la correcta compactación. En el caso de los HAC el hormigonado de las probetas se realizó por simple vertido.

Ref	Cemento "C" (kg/m ³)	Adición inerte (kg/m ³)		A/C	A/Finos A/F*	Aditivo % s/C	Áridos (kg/m ³)		
		Marmolina	Filler				Grava 7/12 mm	Grava 10/20 mm	Arena
T350	350	-	-	0.50	1.04	0.75	1028.11	-	901.85
AC350MF	350	150	150	0.52	0.86	2	703.27	-	792.27
T370	370			0.45	1.04	0.7	500	470	860
AC370	370	-	-	0.45	1.04	1+1.2 1.5	500	470	860
T400	400	-	-	0.45	0.98	0.5	998.26	-	875.67
AC400MF	400	130	130	0.46	0.84	2	704.32	-	792.32
AC400F	400	-	160	0.46	0.86	2	748.85	-	844.11
AC425	425	-	200	0.42	0.78	3.5	827	-	725
T500	500	-	-	0.36	0.85	0.5	952.54	-	892.30
AC500M	500	300	-	0.36	0.82	2	646.83	-	728.77
AC500MF	500	80	80	0.36	0.82	2	711.10	-	801.20
AC500F	500	-	100	0.36	0.83	2	742.30	-	836.07

Tabla 6.1 Dosificación de los hormigones utilizados.

* Relación Agua /Finos inferior a 125µm en volumen.

Ref	Tanda	Cem	Aditivo	Longitudes Adherentes (mm)
T350	1	52.5R	EP-1	700 / 750 / 800 / 850 / 900 / 950
	2			550 / 600 / 650
	3			400 / 450 / 500
T370	14	42.5R	EP-2	500 / 550 / 600 / 650 / 700 / 750
	17			550 / 600 / 650 / 700 / 750 / 800
	18			650 / 700 / 850 / 900 / 950 / 1000
	19			650 / 700 / 850 / 900 / 950 / 1000
	20	52.5	p	550 / 600 / 650 / 700 / 750 / 800
	21			750 / 800 / 850 / 900 / 950 / 1000
	22			130 / 135
	23			110 / 120
T400	1	52.5R	EP-1	450 / 550 / 650 / 750 / 900
	2			550 / 600 / 650
	3			500 / 600 / 700
	4			500 / 550 / 600 / 650 / 700 / 750
T500	1	52.5	EP-1	400 / 450 / 500 / 550 / 600

Tabla 6.2 Hormigones Tradicionales - Longitudes adherentes ensayadas

EP – Éter Policarboxílico
p - Polifuncional

Ref	Tanda	Cem	Aditivo	Longitudes Adherentes (mm)
AC350MF	1	52.5R	EP-1	650 / 700 / 750 / 800 / 850 / 900
	2			500 / 550 / 600
AC370	15	42.5R	EP-2 p	600 / 650 / 700 / 750 / 800 / 850
	16			750 / 850 / 950
	24	52.5R	EP-2	600 / 650 / 700 / 750 / 800 / 850
	25			550 / 600 / 650 / 700 / 750 / 800
	27			600 / 650 / 700 / 750 / 800 / 850
AC400MF	1	52.5R	EP-1	550 / 600 / 650 / 700 / 750
	2			400 / 450 / 500
AC400F	1			500 / 550 / 600 / 650 / 700 / 750
AC425F	28	52.5R	EP-2	500 / 550 / 600 / 650 / 700 / 750
	29			650 / 700 / 750 / 800 / 850 / 900
	30			650 / 700 / 750 / 850 / 900
AC500M	1	52.5R	EP-1	300 / 350 / 400 / 450 / 500 / 550
AC500MF	1	52.5R		400 / 450 / 500 / 550 / 600 / 650
AC500F	1	52.5R		400 / 450 / 500 / 550 / 600 / 650

Tabla 6.3 Hormigones Autocompactantes - Longitudes adherentes ensayadas

La consistencia de los hormigones tradicionales se determinó a través del cono de Abrams para los hormigones tradicionales equivalentes, y para medir la fluidez de los hormigones autocompactantes se realizaron ensayos de Escurrimiento (UNE 83361:2001) y embudo V (UNE 83364:2007). Los resultados se muestran en la Tabla 6.4.

Para caracterizar el comportamiento mecánico se realizaron ensayos de resistencia a compresión simple en probetas cúbicas de 10 x 10 x 10 cm, y de resistencia a tracción indirecta (ensayo Brasileño).

6.3 RESULTADOS

Las tablas 6.4 y 6.5 presentan, respectivamente, los resultados de los ensayos de caracterización y los resultados de los ensayos de adherencia según los criterios del método ECADA realizados sobre los hormigones utilizados.

Ref.	Cem	Aditivo	Consistencia (cm)	Flujo de cono $T_{50} \cdot \phi_{max}$	Embudo V (s)	f_c a 24h (MPa)	f_c 28d (MPa)	f_{ti} 7 d (MPa)	f_{ti} 28 d (MPa)
T350	52.5R	EP-1	11	-	-	35	60	2.2	-
AC350MF	52.5R	EP-1	-	4 - 640	9	35	59	3.8	-
T370	42,5R	EP-2	12	-	-	-	60	-	-
	52,5R	EP-2	11	-	-	35	60	-	-
		p	10	-	-	30	62	-	4.4
AC370	42,5R	EP-2 p	-	2 - 650	18	-	65	-	-
	52,5R	EP-2	-	650	-	31	69	-	4.8
T400	52,5R	EP-1	5	-	-	35	60	3.5	-
AC400MF	52,5R	EP-1	-	5 - 690	13	42	65	4.3	-
AC400F			-	4 - 740	8	45	60	4.8	-
AC425F	52,5R	EP-2	-	4 - 740	15	-	77	-	-
T500	52,5R	EP-1	2	-	-	58	76	4.0	-
AC500M	52,5R	EP-1	-	4 - 830	8	59	78	5.2	-
AC500MF			-	4 - 750	13	62	86	5.9	-
AC500F			-	4 - 770	12	60	91	-	-
			-	-	-	-	-	-	-

Tabla 6.4 Caracterización de los hormigones utilizados.

Ref.	a/c	CEM	Aditivo	f_c a 24 o 48* h (MPa)	Longitud de Transmisión (cm)	Longitud de Anclaje 1 (cm)	Longitud de Anclaje 2 (cm)
T350	0,50	52.5R	EP-1	35	55	55	70
AC350MF	0,52	52.5R	EP-1	35	55	60 - 65	> 75
T370	0,45	42,5R	EP-2	41*	70	60	>75
		52,5R	EP-2	45*	65	65	90
			p	45*	110	100	120
AC370	0,45	42,5R	EP-2 p	39*	> 95	85	> 95
		52,5R	EP-2	45*	70	60	85
T400	0,45	52.5R	EP-1	35	55	50	70
AC400MF	0,46	52.5R	EP-1	42	55	55	75
AC400F				45	55	55	75
AC425F	0,42	52,5R	EP-2	46*	65	65	90
T500	0,36	52.5R	EP-1	58	45	40	60
AC500M	0,36	52.5R	EP-1	59	45	40	60
AC500MF				61	45	40	60
AC500F				60	45	40	60
				-	-	-	-

Tabla 6.5 Resultados obtenidos.

Se observa que, para hormigones de mayor cuantía de cemento no hay diferencias sensibles en las características adherentes entre los hormigones tradicionales y los HAC. Además, en estos casos, la longitud de anclaje 1 es menor que la longitud de transmisión.

Con hormigones de menor resistencia se detecta que las longitudes de anclaje 1 y 2 son ligeramente mayores para los HAC, que para el hormigón tradicional, aunque la longitud de transmisión no se ve afectada por el tipo de hormigón.

Como factor que puede haber influido en estos resultados destacamos el hecho de que la resistencia a tracción indirecta en los HAC es superior a la de los hormigones tradicionales. Este incremento representa el 30% en término medio para los hormigones analizados, que poseen diámetro máximo de árido de 12 mm, y no es un reflejo de la resistencia a compresión, que apenas se ve afectada por el tipo de hormigón.

La comparación de los hormigones T370 Y AC370 fabricados con 370 Kg de cemento pone de manifiesto la importancia de la elección del aditivo a utilizar. En estos casos, aunque los resultados de resistencia sean similares, para las correspondientes categorías de cementos, los hormigones fabricados con el aditivo a base de éter policarboxílico presentan longitudes inferiores a aquellos fabricados con un aditivo polifuncional, tanto en HAC como en HT.

Las diferencias detectadas por el cambio de aditivo son muy superiores a las que se obtiene al pasar de HAC a HT. Por lo tanto deberá considerarse el tipo de aditivo como un factor principal en el estudio de comportamiento adherente.

En las fig. 6.1, 6.2 y 6.3 se presentan los deslizamientos de la armadura registrados durante la operación de arrancamiento. Se aprecia que los comportamientos son similares, independientemente del tipo de hormigón, para las cuantías analizadas.

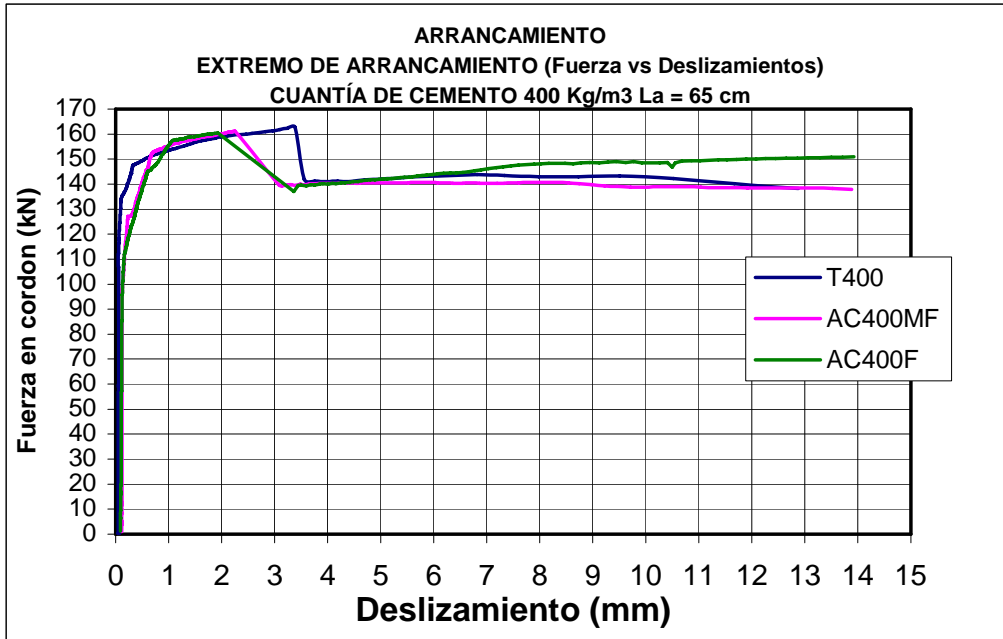


Fig.6.1. Deslizamientos durante el proceso de arrancamiento en el extremo de arrancamiento.

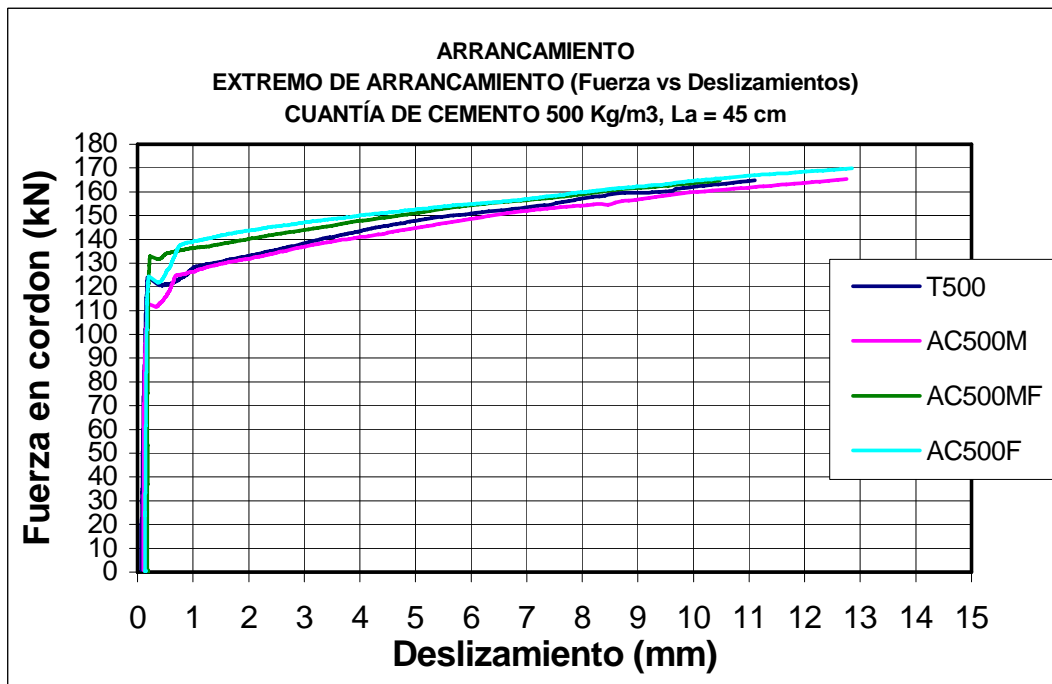


Fig.6.2. Deslizamientos en extremos de arrancamiento durante proceso de arrancamiento.

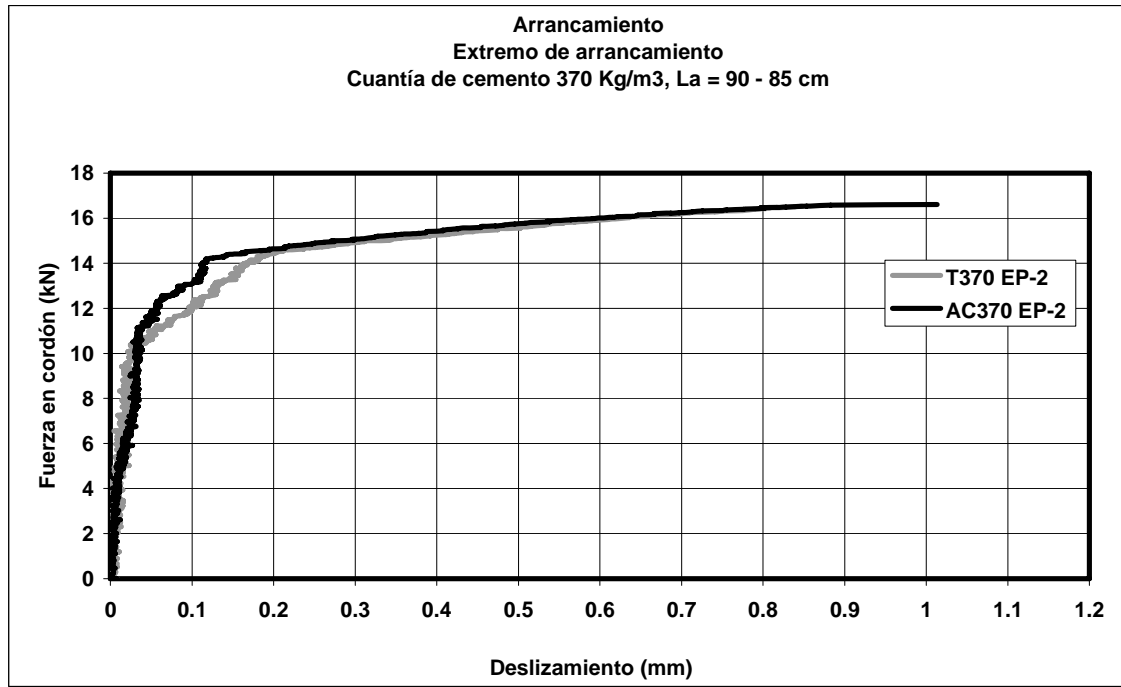


Fig.6.3. Deslizamientos durante el proceso de arrancamiento en el extremo de arrancamiento

6.4. CONSIDERACIONES FINALES

Como principales conclusiones de este capítulo se destacan los siguientes puntos:

- Los HAC y los HT equivalentes tienen una resistencia a compresión similar, pero la resistencia a tracción de los HAC ha sido superior.
- Las pérdidas de fuerza durante el destesado han sido siempre superiores en los HAC, especialmente cuando los contenidos en adiciones inertes es grande. Esta respuesta ha sido atribuida a la mayor retracción del hormigón y se ha calculado su efecto a partir de la evolución de los deslizamientos en el extremo tensionado. Esto conduce a plantear mayores pérdidas de pretensado cuando se utilice HAC, con independencia de su nivel de resistencia.
- Los HAC fabricados con dosificaciones más bajas de cemento muestran un comportamiento más dúctil en lo relativo al deslizamiento en el extremo libre durante el proceso de destesado. Sin embargo, tanto la longitud de transmisión como los deslizamientos finales en el extremo libre son similares para los HAC y los HT equivalentes.
- La longitud de anclaje ha sido analizada tanto aceptando deslizamientos relativos de la armadura en el extremo libre (longitud de anclaje con deslizamiento LA1), como sin permitir deslizamientos (longitud de anclaje sin deslizamiento LA2)
- Cuando la dosificación en cemento es baja las longitudes de anclaje son mayores para los HAC. Sin embargo, cuando la dosificación en cemento es alta no se han encontrado diferencias en las longitudes de anclaje. Los hormigones con baja relación a/c presentan una longitud de anclaje con deslizamiento menor que la longitud de transmisión. Cuando la relación a/c aumenta estas diferencias disminuyen.

- Se ha detectado una gran influencia del tipo de aditivo en las características adherentes de las armaduras activas del hormigón. Esta influencia es muy superior a la producida por otros factores como, por ejemplo, el hecho de utilizar HT o HAC

CAPÍTULO 7

ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE LOS HAC

7.1 INTRODUCCIÓN

Cuando se plantea el empleo de hormigones autocompactantes en obra es frecuente que se ponga en duda la “robustez” de su dosificación frente a los normales errores, dentro de las tolerancias admisibles, en las pesadas de los componentes del hormigón durante la producción a gran escala. Se teme que estos errores con sus dispersiones normales puedan generar riesgos de segregación o de pérdida de las propiedades de autocompactabilidad.

El objetivo básico de este capítulo es el de mostrar un estudio de sensibilidad para analizar los posibles cambios en las propiedades de los HAC, en estado fresco y endurecido, cuando se introducen variaciones en los valores de las pesadas de una dosificación patrón simulando los efectos de los errores en la producción a gran escala dentro de los límites que cubren las tolerancias aceptadas por las diferentes Instrucciones y las posibilidades de precisión dentro de un proceso normal de producción.

Para ello el trabajo realizado ha cubierto los siguientes aspectos:

- Análisis de las tolerancias en las pesadas de los distintos componentes durante la fabricación a gran escala de hormigones tradicionales aceptadas por las distintas Instrucciones.
- Selección de una serie de hormigones autocompactantes de referencia para analizar sobre ellos su robustez.
- Análisis experimental de la variación de propiedades tanto en estado fresco como endurecido de los hormigones de referencia cuando se imponen en su dosificación variaciones que simulan los errores permitidos por las instrucciones, o las previsibles en un proceso industrial.
- Análisis estadísticos de la producción en dos centrales de hormigón preparado, y de los errores registrados en las pesadas de los componentes del hormigón.
- Comparación de resultados de los análisis realizados y verificación de la robustez de las distintas dosificaciones analizadas.

Como planteamiento general se decidió centrar el estudio en hormigones de características próximas a las de los tradicionales de uso frecuente en edificación y obra pública. Se ha pretendido analizar hormigones aptos para niveles de resistencia nominal entre 25 y 40 MPa, contenido en cemento entre 300 y 400 kg/m³ y tamaño máximo de árido entre 10 y 20 mm. Se ha descartado por este motivo el estudio de la robustez de hormigones autocompactantes de altas resistencias. Tampoco se ha pretendido analizar el efecto de las adiciones activas, de uso poco frecuente en España, y se ha incluido, únicamente la posible adición de filler calizo como fórmula para considerar este componente que puede ser introducido tanto como material de aporte por separado, como finos presentes en los áridos, o como uno de los componentes de los cementos.

7.2 NORMATIVA SOBRE TOLERANCIAS DE PESADO DE MATERIALES EN LA PRODUCCIÓN DEL HORMIGÓN

La tabla 7.1 incluye las tolerancias admitidas por la Instrucción EHE 98 y el Código ACI 318.

Se constata que la Instrucción EHE es más permisiva, admitiendo errores de pesada de hasta el 3% en los distintos componentes. Se debe hacer constar que las tolerancias relativas al agua se refieren al agua total, incluyendo la aportada por humedad de los áridos o por los aditivos.

Materiales	Cemento	Áridos	Agua	Aditivo	Adiciones
EHE	3%	3%	3%	5%	3%
ACI	1%	2%	3%	3%	

Tabla 7.1. Tolerancias establecidas por la EHE y por el ACI

7.3 DEFINICIÓN DE LAS DOSIFICACIONES DE REFERENCIA

Se realizó el estudio sobre seis dosificaciones de HAC rápidas y cohesivas previamente ajustadas que presentan distintas características en fresco y endurecido. El tamaño máximo de árido de las cinco primeras era de 20 mm, y el de la última de 12 mm. Se ha intentado analizar estructuras granulares desde muy finas, en los límites máximos de contenido en finos permitido por las instrucciones hasta hormigones con dosificaciones clásicas para un hormigón tradicional.

La figura 7.1 muestra las curvas granulométricas de las dosificaciones de referencia.

La tabla 7.2 presenta las dosificaciones analizadas.

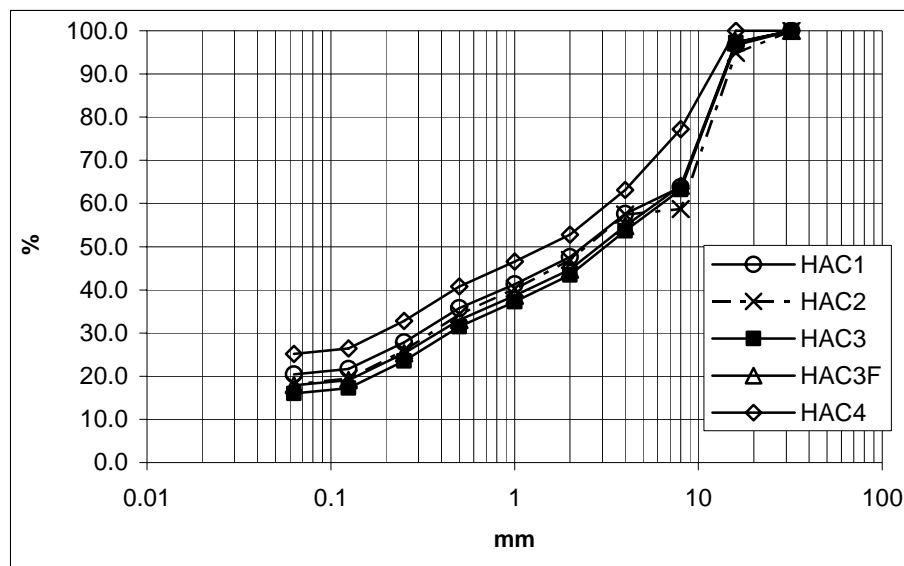


Fig. 7.1. Curvas granulométricas de las dosificaciones de referencia.

	Materiales	HAC1	HAC2	HAC3	HAC3F	HAC3C	HAC4
Cemento (kg/m ³)	Cem II/B-M(V-LL)N32,5		300				
	Cem II / B-V 42,5 R			370	370	370	400
	Cem I/52,5 R	300					
Agua (kg/m ³)		165	165	165	165	165	185
A/C		0,55	0,55	0,44	0,44	0,44	0,46
Grava (kg/m ³)	7/12 mm	300		500	500	500	750
	10/20 mm	575	875	470	470	470	
Arena 0/4 mm (kg/m ³)		840	890	860	860	860	845
Filler añadido (kg/m ³)		150	100	0	50	0	160
Tamaño máximo del árido (mm)		18	18	18	18	18	11
Volumen total de grava (l/m ³)		330	330	366	366	366	283
Volumen de pasta (l/m ³)		339	322	305	324	305	395
Volumen de mortero (l/m ³)		670	670	634	634	634	717
Finos calizos (kg/m ³)	que pasa por el tamiz 0,125 mm	205	158	56	106	56	215
	que pasa por el tamiz 0,063 mm	185	138	36	86	36	195
Finos totales (incluido cemento) (kg/m ³)		505	458	426	476	426	615
Relación agua / finos (en volumen)		0,95	1,05	1,18	1,04	1,18	0,88
Aditivos kg/m ³ (% s/c)	Superplastificante FM211	6	4.5				
	Superplastificante GLENIUN C355			4.44	4.44	5.55	8
	Plastificante POZZOLITH 607N			3.7	3.7		4
	Cohesionante RHEOMAC 890F					1.85	

Tabla 7.2. Dosificaciones utilizadas en el estudio de sensibilidad

Los criterios de definición de cada una de las dosificaciones de referencia han sido:

HAC 1

El contenido en cemento es relativamente bajo, sin embargo el contenido en finos calizos que pasan por el tamiz 0,063 está en el límite superior de lo permitido por la Instrucción EHE 98 (175 kg/m³). Para ello se adiciona filler.

HAC 2

Con la misma dosificación de cemento que la anterior, pero de clase de resistencia 32,5. La granulometría es discontinua, y el contenido en finos, aún siendo alto es inferior al de la anterior.

HAC 3

Se trata de una dosificación que puede considerarse adecuada para un hormigón tradicional para obra civil. Su contenido en cemento se ha aumentado hasta 370, siendo además de clase resistente 42,5, la más frecuente en plantas de hormigón preparado. No se realiza ninguna adición de filler, por lo que todos los finos de que dispone corresponden exclusivamente a los aportados por los áridos. No se ha tenido en cuenta los posibles filleres calizos incluidos en el cemento, pero en cualquier caso el total de finos que pasan por el tamiz 0,063 es escaso. La relación agua / finos en volumen es 1,18 muy alta para los valores alcanzados por los HAC frecuentemente utilizados.

HAC 3F

Es una variación de la anterior a la que se ha pretendido estabilizar (entiéndase reducir el riesgo de segregación) aumentando el contenido en finos por el aporte de filler calizo, pero manteniéndolo en los límites normalmente aceptados.

HAC 3C

Es asimismo una variación de la dosificación HAC 3 pero en la que para estabilizarla se ha incluido aditivo cohesionante. En el resto de componentes, y por tanto en su estructura granular coincide con la HAC 3

HAC 4

Se trata de una dosificación en la que se ha forzado una estructura granular muy fina, con 400 kg de cemento /m³. El contenido en finos supera los 600 kg/m³, y prácticamente el 40% del hormigón está constituido por pasta. La relación agua / finos es apenas de 0,88. Se pretendía, por tanto, conseguir una dosificación que debería ser muchos más estable que las anteriores.

Para caracterizar las curvas se ha utilizado, además de los parámetros de dosificación indicados en la tabla 1, otros como el módulo granulométrico o el parámetro “a” de una curva de Bolomey ajustada a su distribución granulométrica.

La curva de Bolomey sigue la ecuación que da el valor “y” del volumen de material sólido (incluido cemento) que pasa por cada tamiz de abertura “d” por medio de la ecuación:

$$y = a + (100 - a) (d / D)^{1/2}$$

donde:

“D” es el tamaño máximo de árido del hormigón y

“a” es un parámetro que depende de la consistencia deseada y del tipo de árido empleado (tabla 7.3)

Parámetro “a” de Bolomey		
Árido	Consistencia	a
Rodado	S – P	10
	B	11
	F	12
Machacado	S – P	12
	B	13
	F	14

Tabla 7.3. Parámetro “a” propuesto para la curva de Bolomey

El parámetro “a” es un índice del contenido en finos (incluido cemento) que se propone para cada dosificación.

Para caracterizar las granulometrías de las dosificaciones de referencia una curva de Bolomey ha sido ajustada por mínimos cuadrados a cada curva mezcla dejando variar el parámetro “a”.

Las figuras 7.2 a 7.6 presentan cada una de las granulometrías de referencia y la curva de Bolomey ajustada. Se indica asimismo el valor del parámetro “a”, y el modulo granulométrico de la curva mezcla.

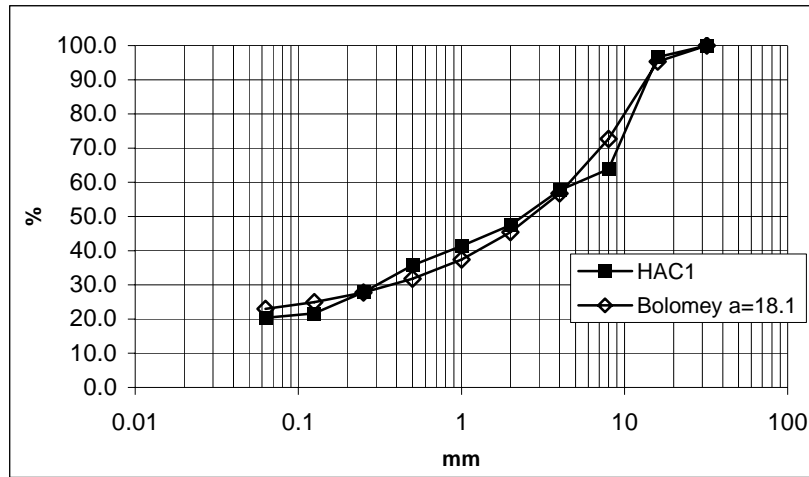


Fig.7.2. Distribución granulométrica y ajuste de la curva de Bolomey a la dosificación de referencia HAC1

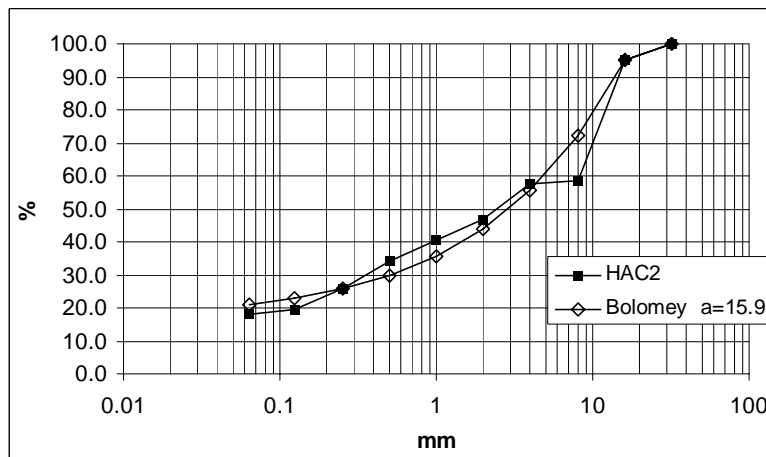


Fig.7.3. Distribución granulométrica y ajuste de la curva de Bolomey a la dosificación de referencia HAC2

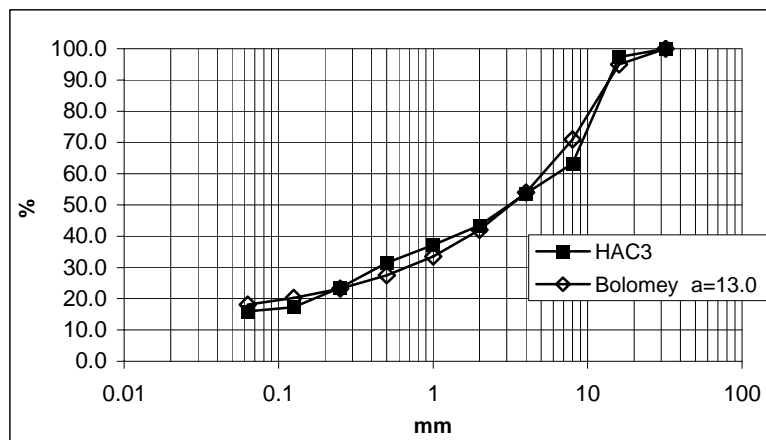


Fig.7.4. Distribución granulométrica y ajuste de la curva de Bolomey a la dosificación de referencia HAC3

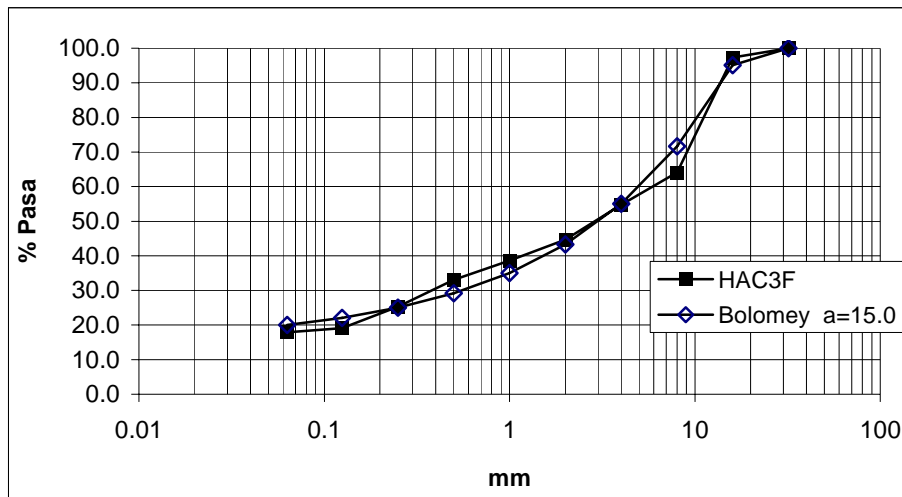


Fig.7.5. Distribución granulométrica y ajuste de la curva de Bolomey a la dosificación de referencia HAC3F

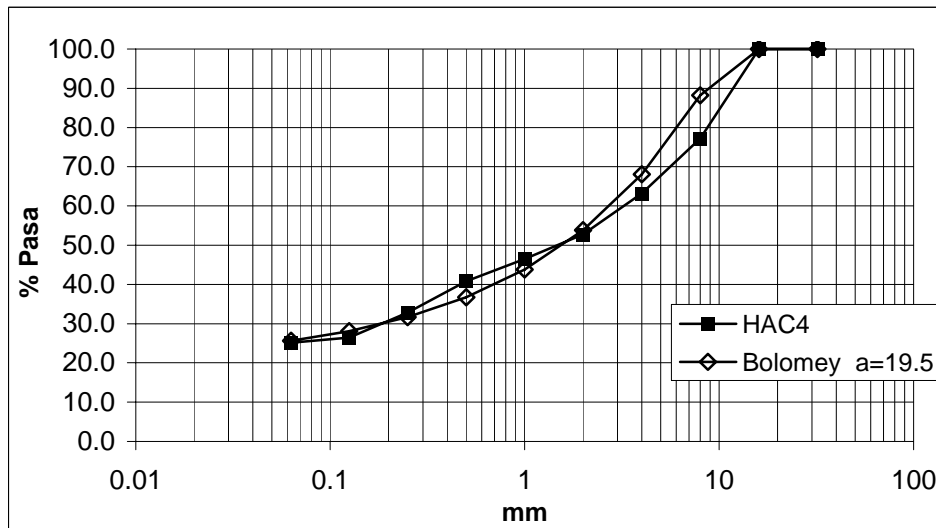


Fig.7.6. Distribución granulométrica y ajuste de la curva de Bolomey a la dosificación de referencia HAC4

Se observa que efectivamente las dosificaciones HAC3 y HAC3C tienen la misma distribución granulométrica y se ajustan a una curva de Bolomey con $a = 13$, que sería compatible con un hormigón fluido de acuerdo con los criterios tradicionales. Las dosificaciones HAC3F y HAC2 presentan un valor de “a” algo superior, y finalmente las dosificaciones que se han planteado como muy finas (HAC1 y HAC4, esta última con tamaño máximo 11) se ajustan a curvas con valor de “a” alto, 18,1 y 19,5 respectivamente.

Las propiedades en estado fresco y endurecido de los hormigones de referencia obtenidos se indican en la tabla 7.4.

Propiedades de los hormigones de referencia		HAC1	HAC2	HAC3	HAC3F	HAC3C	HAC4
Flujo de cono	T50 (s)	2	2	2	2	2	2
	Dmax (mm)	700	740	650	635	620	700
J Ring	T50 (s)	2	3	2	3	5	3
	Dmax	730	720	610	570	560	685
Embudo V (s)		10	10	9	14	14	7
Caja L	Tf(s)	8					
	H1/H2	0,75					
Resistencia 28 días (MPa)		55	35	53	55	60	54

Tabla 7.4. Características de las dosificaciones utilizadas en el estudio de sensibilidad

7.4 PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO DE SENSIBILIDAD. DISEÑO ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO

Una vez seleccionadas las dosificaciones de referencia la intención es analizar la sensibilidad de cada uno de estos HAC debido a variaciones aplicadas a su dosificación. Para ello se plantea la reproducción de una serie de amasadas que incluyan estas variaciones con el objetivo de analizar estadísticamente sus efectos en las propiedades del hormigón.

Cada uno de los componentes del hormigón será considerado como un “factor”, o variable controlable experimentalmente que puede tener influencia sobre otra, que a su vez es conocida como variable respuesta. Las variables respuesta serán las propiedades del hormigón de las que se desea conocer la sensibilidad.

Los factores así definidos serán las dosificaciones en cemento, arena, grava, agua y aditivo. Se ha decidido incluir como factor adicional el contenido en filler. En este último concepto se incluyó el filler adicionado como materia prima y los finos incluidos en los áridos.

El planteamiento de un diseño estadístico conlleva la definición de los niveles de variación a los que se desea estudiar cada factor. Cuanto mayor sea el número de niveles a los que se desea estudiar un factor mayor será el número de ensayos que se deba realizar para un estudio completo. Así, si se seleccionan como niveles de estudio los de la tabla 7.5, un estudio completo exigiría un total de 1296 ensayos.

Factor	HAC1	
	Niveles	Variaciones
Filler	4	-6%; -2%; 2%; 6%
Cemento	3	-3%; 0%; 3%
Arena	4	-6%; -2%; 2%; 6%
Grava	3	-3%; 0%; 3%
Agua	3	-3%; 0%; 3%
Aditivo	3	-5%; 0%; 5%

Tabla 7.5 Niveles y variaciones consideradas para cada factor.

Un planteamiento como este con la intención de extenderlo a seis hormigones de referencia es claramente inabordable. Por ello, para obtener la mayor cantidad de información minimizando la producción de amasadas, se realizó un diseño estadístico del experimento, utilizando el concepto de las matrices ortogonales y analizando posteriormente los resultados por medio del análisis de varianza (ANOVA) con el paquete informático Stargraphics. (Anexo II)

Esencialmente este planeamiento consiste en seleccionar un número limitado de entre todas las combinaciones posibles, realizar la fase experimental únicamente con esas combinaciones y acabar con un análisis de resultados que podrá generalizarse a toda la población. En el anexo II se presenta una exposición de los criterios, las condiciones y procedimiento para realizar la selección de combinaciones a analizar para que el estudio sea estadísticamente correcto, y las bases conceptuales y procedimentales del diseño.

Al mismo tiempo, y dado que se analizaron seis dosificaciones diferentes, y que paralelamente al estudio experimental de la sensibilidad se realizó el estudio estadístico de la precisión de dosificaciones, los resultados experimentales previos y los del estudio estadístico de producción aconsejaron la modificación de los factores o de los niveles del estudio a aplicar en las sucesivas fases experimentales. Se planteó por tanto un proceso interactivo que justificó estas modificaciones.

La figura 7.7 muestra un esquema del proceso, y la tabla 7.6 indica los factores analizados y niveles de variación que finalmente se analizaron en cada etapa. Su justificación se expondrá a lo largo de este capítulo, en función de los resultados de las fases previas.

Factor	HAC1		HAC2		HAC3, HAC3F HAC3C, HAC4	
	Niveles	Variaciones	Niveles	Variaciones	Niveles	Variaciones
Filler	4	-6%; -2%; 2%; 6%	3	-6%; 0%; 6%	3	-6%; 0%; 6%
Cemento	3	-3%; 0%; 3%	3	-3%; 0%; 3%	0	0%
Arena	4	-6%; -2%; 2%; 6%	3	-3%; 0%; 3%	0	0%
Grava	3	-3%; 0%; 3%	3	-3%; 0%; 3%	0	0%
Agua	3	-3%; 0%; 3%	3	-3%; 0%; 3%	3	-6%; 0%; 6%
Aditivo	3	-5%; 0%; 5%	3	-5%; 0%; 5%	0	0%

Tabla 7.6 Niveles y variaciones consideradas para cada factor de cada hormigón analizado.

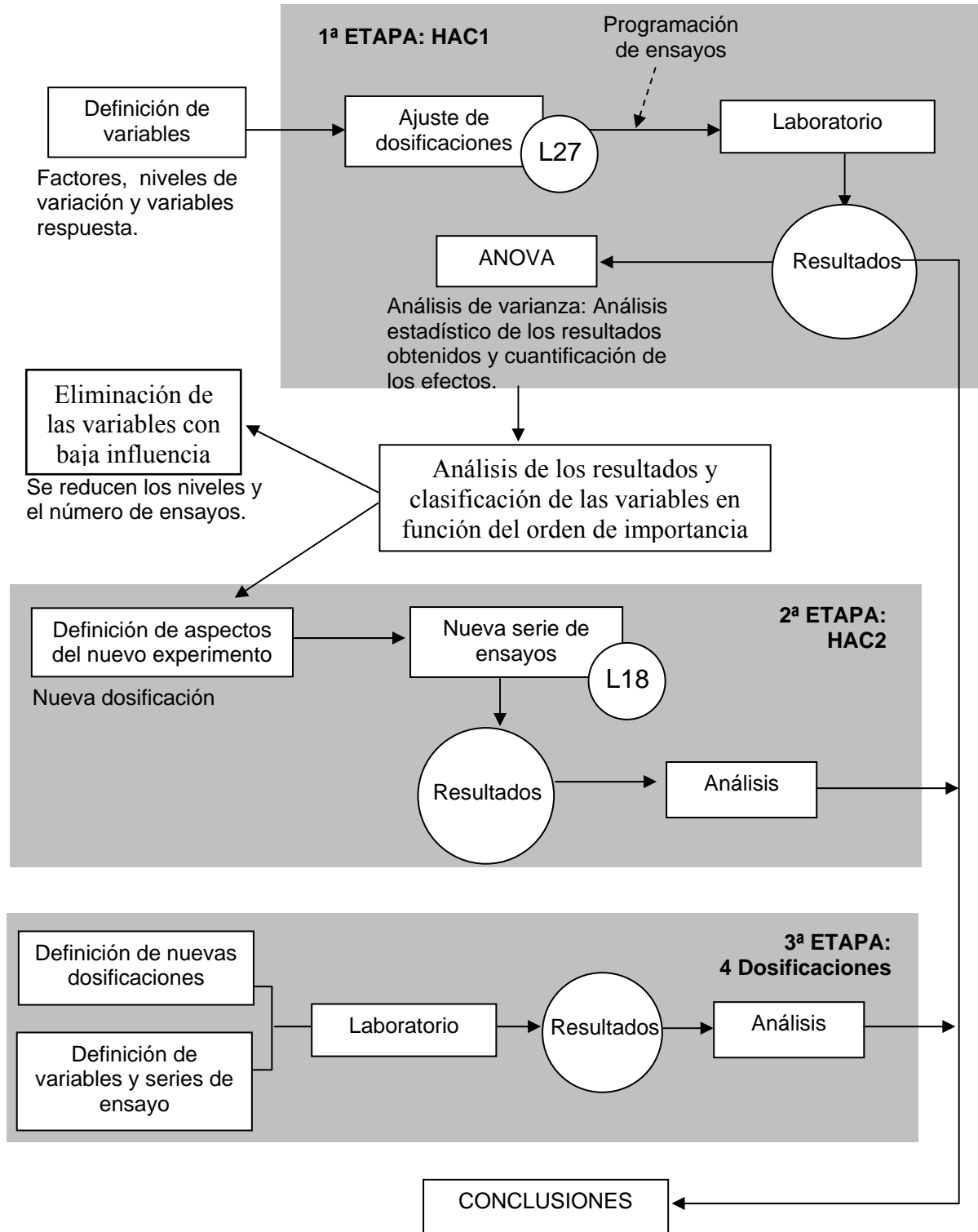


Fig 7.7 representación esquemática de las distintas etapas utilizadas

Como se puede observar en la tabla 7.6 se consideraron como factores todos los materiales utilizados en la fabricación de los HAC y, a cada uno de ellos se aplicaron distintos niveles de variación.

Sin embargo, en el caso de los HAC el filler es un material que puede afectar de manera importante el comportamiento del hormigón, sobretodo en su estado fresco. Por ello en este estudio se ha decidido analizar la variación del filler a cuatro niveles, $\pm 2\%$ y $\pm 6\%$.

En principio un 6% puede parecer una variación demasiado grande, pero errores de esta magnitud deben ser considerados si tenemos en cuenta que las arenas utilizadas para fabricar los HAC suelen tener un alto contenido en finos. En estos casos, un error de un 1% en la medición de los finos, sobre cuantías de arena del orden de 900 Kg justifica el parámetro del 6% utilizado en este estudio.

De acuerdo con lo indicado en la figura 1 el programa experimental se desarrolló en tres fases. En la primera se estudió la robustez de la dosificación de referencia HAC1, para lo que se generó una serie de 27 dosificaciones (L1 ... L27) modificando la matriz ortogonal L27 propuesta por Burman (ref.). La tabla 7.7 muestra las combinaciones realmente ensayadas, según los niveles indicados en la tabla 7.6.

L	Filler (%)	Cemento (%)	Arena (%)	Grava (%)	Agua (%)	Aditivo (%)
1	2	0	2	0	0	0
2	2	3	-6	3	3	5
3	2	-3	-6	-3	-3	-5
4	-2	0	-2	0	3	-5
5	-2	3	6	3	-3	0
6	-2	-3	-6	-3	0	5
7	-2	0	-2	0	-3	5
8	-2	3	-6	3	0	-5
9	-2	-3	6	-3	3	0
10	6	0	6	-3	3	5
11	6	3	-6	0	-3	-5
12	6	-3	-2	3	0	0
13	-6	0	-6	-3	-3	0
14	-6	3	6	0	0	5
15	-6	-3	-2	3	3	-5
16	-6	0	-6	-3	0	-5
17	-6	3	-6	0	3	0
18	-6	-3	2	3	-3	5
19	6	0	6	3	-3	-5
20	6	3	-2	-3	0	0
21	6	-3	-6	0	3	5
22	-6	0	-6	3	0	5
23	-6	3	2	-3	3	-5
24	-6	-3	-6	0	-3	0
25	-6	0	-6	3	3	0
26	-6	3	-2	-3	-3	5
27	-6	-3	6	0	0	-5

Tabla 7.7 Variaciones propuestas a la dosificación de HAC1 siguiendo el diseño estadístico del L27

En la segunda etapa se analizó la dosificación de referencia HAC2. La propuesta fue la misma, pero al reducir el número de niveles de estudio del filler y la arena se pudo realizar el diseño modificando una matriz L18, también propuesta por Burman. Con lo que el número de amasadas ensayadas fue sólo de 18. Las combinaciones propuestas para HAC2 se presentan en la tabla 7.8.

Finalmente en la tercera etapa se utilizaron las otras cuatro dosificaciones. De acuerdo con los resultados previos se redujo los factores únicamente a los porcentajes de agua y filler. La tabla 7.9 presenta las combinaciones propuestas para esta etapa.

L	Filler (%)	Cemento (%)	Arena (%)	Grava (%)	Agua (%)	Aditivo (%)
1	0	0	0	0	0	0
2	0	3	3	3	3	5
3	0	-3	-3	-3	-3	-5
4	6	0	0	3	3	-5
5	6	3	3	-3	-3	0
6	6	-3	-3	0	0	5
7	-6	0	3	0	-3	5
8	-6	3	-3	3	0	-5
9	-6	-3	0	-3	3	0
10	0	0	-3	-3	3	5
11	0	3	0	0	-3	-5
12	0	-3	3	3	0	0
13	6	0	3	-3	0	-5
14	6	3	-3	0	3	0
15	6	-3	0	3	-3	5
16	-6	0	-3	3	-3	0
17	-6	3	0	-3	0	5
18	-6	-3	3	0	3	-5

Tabla 7.8 Variaciones propuestas a la dosificación de HAC2 siguiendo el diseño estadístico del L18

L	Filler (%)	Cemento (%)	Arena (%)	Grava (%)	Agua (%)	Aditivo (%)
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	6	0
3	0	0	0	0	-6	0
4	6	0	0	0	0	0
5	-6	0	0	0	0	0

Tabla 7.9 Variaciones propuestas para las dosificaciones HAC3, HAC3F, HAC3C, HAC4.

7.5 VARIABLES RESPUESTA Y PROGRAMA DE ENSAYOS

La tabla 7.10 muestra las variables respuesta analizadas durante el programa experimental sobre las que se pretende analizar la sensibilidad del hormigón.

Ensayo	Variable Respuesta	Parámetro evaluado
Flujo de Cono	T50; Dmax	Capacidad de Flujo
Embudo en V	Tf	Viscosidad
Caja L	H2/H1	Capacidad de paso
Anillo J	Dmax; H2/H1; T50	Capacidad de paso
Resistencia	Resistencia a 28 días Rango de resistencia	Resistencia
Segregación	Profundidad de Segregación	Estabilidad
Permeabilidad	Profundidad de penetración de agua: Máxima y media	Permeabilidad

Tabla 7.10 Ensayos llevados a cabo y parámetros analizados

Los ensayos realizados fueron modificados en cada etapa en función de los resultados previos, de acuerdo con el siguiente programa:

1ª Etapa:

Sobre la dosificación de referencia HAC1, para cada una de las variaciones seleccionadas se fabricaron dos amasadas, llamadas amasada A y amasada B, con la intención de, por un lado, producir el volumen de hormigón necesario para la realización de los ensayos propuestos y por otra parte, aumentar la fiabilidad de los resultados obtenidos por medio de la repetición de los ensayos de Flujo de cono y Embudo en V. Cada amasada tenía un volumen de 30 litros con los cuales se realizaron los ensayos en fresco y se fabricaron probetas cilíndricas de 15x30 cm descritos en los esquemas de las figuras 7.8 y 7.9.

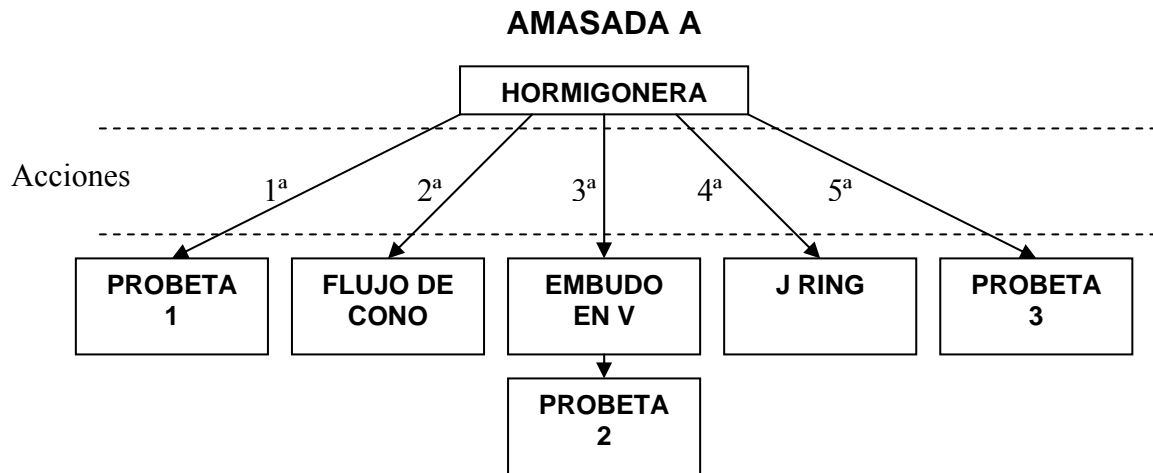


Fig.7.8. Esquema de ensayos realizados con la amasada A

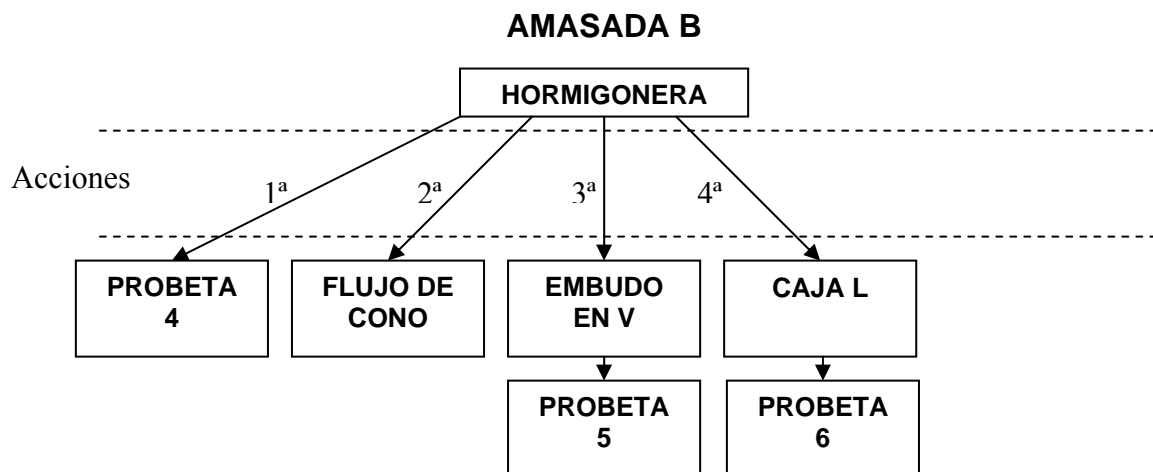


Fig.7.9. Esquema de ensayos realizados con la amasada B

Las probetas se fabricaron en diferentes momentos durante la realización de los ensayos con el propósito de evaluar la estabilidad del hormigón. Dicha estabilidad se evaluó en estado fresco, visualmente, considerando el aspecto del hormigón y en estado endurecido, utilizando los resultados de los ensayos de compresión para calcular la variable “Rango” definida por siguiente ecuación

$$rango = \frac{\max(R1, R2, R3) - \min(R1, R2, R3)}{\text{promedio}(R1, R2, R3)}$$

donde R1, R2 y R3 son las resistencias de las probetas 1,2 y 3 de la amasada A.

Se espera que el Rango pueda aportar información sobre la influencia de factores como la manipulación, el transporte o el tiempo de amasado pueden afectar en el comportamiento resistente del hormigón.

La tabla 7.11 presenta los ensayos realizados tras 28 días de curado en cámara húmeda de las probetas

Ensayo	Probeta	Variables respuestas
Compresión	1, 2, 3	Resistencia a 28 días
Permeabilidad	4,6	Profundidad de penetración máxima Profundidad de penetración media
Segregación	4,5,6	Profundidad de segregación

Tabla 7.11 Ensayos realizados sobre probetas cilíndricas.

2ª Etapa:

En función de los resultados encontrados en la 1ª etapa, el número de variaciones a aplicar sobre la dosificación HAC 2 pudo reducirse a 18.

Además, en el estado fresco se realizaron únicamente los ensayos de Flujo de cono, Embudo en V y Anillo J. Debido a su difícil ejecución y a que los parámetros medidos en el anillo J aportaba información similar, se decidió excluir el ensayo de caja L a partir de esta etapa.

Con este planteamiento se decidió fabricar amasadas con un volumen de 35 litros de hormigón y seguir el mismo procedimiento especificado para la amasada A de la 1ª etapa. Fig 2.

Con relación al estado endurecido, en esta etapa se fabricaron únicamente tres probetas cilíndricas 15 x 30 cm. Éstas, inicialmente se rompieron a compresión y, posteriormente se partieron por la mitad para realizar el análisis de la segregación.

3ª Etapa:

A partir de los resultados obtenidos en las dos etapas anteriores se planteó analizar el comportamiento de cuatro dosificaciones distintas variando únicamente los dos factores considerados más influyentes, filler y agua.

Siguiendo el mismo planteamiento establecido en la 2ª etapa, se fabricaron amasadas con un volumen de 35 litros de hormigón siguiendo el mismo procedimiento y realizando los mismos ensayos especificados en la fig 7.8.

7.6. RESULTADOS

7.6.1 Análisis estadístico de errores en la producción en plantas de hormigón preparado

Para obtener estos resultados se han analizado los registros de las plantas de hormigón preparado en los que consta, para cada componente:

- el peso que se pretende dosificar, y
- el peso realmente introducido en la hormigonera.

El estudio ha cubierto un total de 631 suministros de hormigón sobre los que se ha obtenido para cada componente el error de pesado, calculando posteriormente los valores estadísticos de la producción

La tabla 7.12 presenta los resultados del análisis realizado sobre los datos suministrados por dos plantas de hormigón comparados con las tolerancias establecidas por los códigos EHE y ACI, y con las recomendaciones Europeas para la fabricación de HAC.

Materiales	Error para el 90% del peso real	Tolerancias en Códigos		“The European Guidelines”
		EHE	ACI	
Cemento	0,8%	3%	1%	
Arena	1,5%	3%	2%	
Grava	3,5%			
Agua	-----	3%	3%	± 10 litros (≈6%)
Aditivo	0,8%	5%	3%	

Tabla 7.12 Resultados sobre datos suministrados por plantas de hormigón

Estos resultados indican que a la hora de pesar el cemento y el aditivo los fabricantes de hormigón tienden a ser bastante precisos incluso superando los límites establecidos por los códigos. Para las arenas y gravas, estos valores se ajustan relativamente bien. En los áridos únicamente presentan errores significativos cuando las dosificaciones incluyen pesos muy bajos de alguno de los áridos. Esto se debe a que los sistemas de apertura y cierre de las compuertas de los silos no son lo suficientemente rápidas y en muchos

casos dejan pasar una cantidad de material superior a la deseada, haciendo que los errores se incrementen. Dado que para llenar un camión se suele realizar varias pesadas es normal que las plantas tengan dispositivos que corrijan estos errores. Evidentemente esto será más difícil con suministros de poco volumen.

La poca variabilidad de los pesos de estos componentes en la producción a gran escala nos ha llevado a eliminarlos como factores en la tercera etapa del estudio.

En el caso del agua, los datos de los productores reflejan, por lo general, el agua añadida y no su peso total. Por ello es difícil verificar la cantidad de agua realmente introducida ya que la humedad de los áridos no queda registrada. Sin embargo parece poco creíble que se dosifique con la precisión exigida por los códigos. El hecho de que se considere como una buena producción aquella que presenta un coeficiente de variación del 10% en la resistencia obtenida equivale a asumir que el pesaje del agua se realiza con un margen superior al 3% preconizado en los códigos. Esta apreciación es coherente con el criterio expuesto en (EFNARC) que define una dosificación de HAC es suficientemente robusta cuando es capaz de soportar una variación de hasta 10 litros de agua sin cambiar la categoría para la cual ha sido inicialmente diseñado. Evidentemente 10 litros suelen representar variaciones del orden del 6% en hormigones con bajo contenido en agua. Por ello en la 3ª etapa del estudio experimental se amplió la variación del contenido en agua hasta el 6%.

7.6.2 Análisis estadístico e interpretación de los resultados experimentales de Robustez.

Los resultados experimentales de todos los ensayos realizados en esta fase se presentan en el anexo III.

7.6.2.1 Análisis de varianza sobre las dosificaciones de referencia.

En la tabla 7.13 se muestran los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la dosificación HAC1 y HAC2 indicando los factores influyentes para cada propiedad.

Como resultado de este análisis se han identificado los materiales que justifican, con un margen de confianza del 95%, las variaciones detectadas en cada uno de los ensayos realizados. Así, por ejemplo se aprecia que para la variable respuesta “Rango” solamente se ha detectado dependencia del contenido en finos (filler o cemento), siendo esta propiedad insensible a las variaciones del resto de los componentes del hormigón siempre que éstas se mantengan en los niveles de variación aquí analizados. En cambio el diámetro máximo del ensayo de escurrimiento se ve influenciado por las variaciones en los contenidos de cemento, agua y aditivo, pero ninguno de los áridos afecta sensiblemente a esta propiedad.

Parámetro	Filler	Cemento	Arena	Grava	Agua	Aditivo
T50 (Flujo de cono)	X X	XX			X -	
Dmax (Flujo de cono)		X -			X -	X -
Tv (Embudo V)		XX			X -	- X
H2/H1 (Caja L)		X -				
T50 (Anillo J)	- X	XX	X -		X -	- X
Dmax (Anillo J)	- X	- X	X -		X -	- X
H2/H1 (Anillo J)						- X
Resistencia a compresión		- X			- X	
Rango	X -	- X				

Tabla 7.13. Resultado del ANOVA para las dosificaciones HAC1 y HAC2.

(X -) influyente en HAC1; (- X) influyente en HAC2; (XX) influyente en ambas dosificaciones

Esta tabla deja constancia de que ni los errores en el pesaje de grava ni los de la arena influyen en ninguna de las propiedades analizadas cuando se ciernen a las tolerancias exigidas por los códigos.

Sólo cuando se superan las tolerancias llegando a $\pm 6\%$ en el contenido en arena, estos errores pueden influir en los resultados del ensayo con el anillo J. Pero esta opción no es esperable de acuerdo con los resultados del estudio en la producción a gran escala.

El efecto de las variaciones dentro de las tolerancias en las dosificaciones de aditivo y cemento son importantes en casi todas las propiedades. El aditivo muestra una influencia en una u otra dosificación en algunas propiedades, y nunca en las dos dosificaciones sobre la misma propiedad. Además la variación analizada en el estudio es de $\pm 5\%$, cuando las variaciones realmente detectadas son de apenas el $\pm 0,8\%$. Este hecho nos permite suponer que no será ésta la razón de la falta de robustez de los HAC. En cambio el cemento influye prácticamente en todas las propiedades, y por ello el control de su dosificación debe retenerse como un importante factor de riesgo. Sin embargo también en este caso el nivel de precisión de pesaje es cuatro veces superior a las tolerancias analizadas. Por ello, y sin dejar de conservar la idea que es un factor importante, se ha descartado para el resto del estudio.

La influencia de los componentes es diferente para cada una de las dosificaciones. Así en HAC1 (una dosificación rica en finos) las variaciones de agua influyen en las propiedades en estado fresco, pero no en la segregación. Esta dosificación necesita mucho aditivo y las variaciones impuestas en agua hacen pasar la mezcla de muy cohesiva a muy rápida, pero sin llegar a provocar segregación. Este hecho puede indicar que la dosificación HAC 1, por el exceso de finos puede seguir siendo estable con una mayor dosificación de agua o con una menor dosificación en finos, es decir aumentando la relación agua / finos. En cambio en la dosificación HAC2 el agua sólo muestra influencia sobre la resistencia.

Las variaciones impuestas en estas fases al agua se han limitado al $\pm 3\%$, mientras que por lo comentado en el estudio de producción a gran escala parece previsible que estas variaciones se superen en la producción real, y que la influencia real del agua sea superior a la analizada en este apartado. Por ello en la tercera fase se amplió la variabilidad al $\pm 6\%$, el mismo nivel de variación que el que se aplicará al otro componente, el contenido en filler.

La tabla 7.14 presenta los resultados del análisis de varianza para las dosificaciones HAC3, HAC3F, HAC3C Y HAC4. En esta fase se realizó el análisis de la varianza considerando conjuntamente las cuatro dosificaciones. Si se realiza éste análisis con valores absolutos de las propiedades, es evidente que el factor más influyente habría sido el tipo de dosificación dado que las propiedades de cada una de ellas son diferentes.

Para evitar este problema se trabajó con las variables tipificadas. La tipificación de las variables se obtiene por medio de la ecuación:

$$V_{ti} = \frac{V - \bar{x}}{S}$$

donde:

V_{ti} = el valor tipificado

V = el valor de la variable

\bar{x} = el promedio

S = la desviación estándar

Parámetro	Filler	Agua
T50 (Flujo de cono)		X
Dmax (Flujo de cono)		X
Tv (Embudo V)		X
H2/H1 (Caja L)		X
T50 (Anillo J)		X
Dmax (Anillo J)		X
H2/H1 (Anillo J)	X	
Resistencia a compresión		
Rango	X	

Tabla 7.14. Resultado del análisis de varianza (HAC3, HAC3F, HAC3C y HAC4).

Se aprecia que el agua ha demostrado ser un factor influyente sobre la mayoría de las propiedades del hormigón fresco, mientras que el filler solo ha presentado influencia sobre la relación H2/H1 en el ensayo del anillo J y sobre el rango. El tipo de dosificación no presenta influencia sobre ninguno de los resultados.

7.6.2.2 Análisis estadísticos de resultados de las dosificaciones HAC1 y HAC2

El conjunto de resultados de cada una de las dosificaciones de la 1ª y 2ª etapa se analizaron estadísticamente como una población. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.15. Se indica para cada una de las amasadas de referencia el valor obtenido en la dosificación original comparado con el valor medio de todas las variaciones analizadas y su coeficiente de variación. Se incluye además el intervalo de confianza en el que se encuentra el 90% de los resultados.

Para el análisis de esta tabla debe tenerse en cuenta que el análisis realizado no corresponde a un muestreo real, sino a una serie de variaciones diseñadas artificialmente. El análisis realizado considera la misma probabilidad de ocurrencia para todas las variaciones, y esta opción no es real tal como se ha visto en el punto 7.1. En consecuencia los resultados darán una visión pesimista de la sensibilidad en la dosificación HAC2 ya que todos los niveles superan las tolerancias esperables, especialmente las que afectan al cemento y al aditivo. En la dosificación HAC1 estas variaciones deben considerarse también por encima de lo esperable.

Sin embargo las variaciones aplicadas al agua en estas fases han sido exclusivamente de $\pm 3\%$, (tolerancia máxima en los códigos), cuando tal como se ha visto es previsible que pueda alcanzar niveles de $\pm 6\%$.

En la tabla se incluye los límites propuestos por la guía EFNARC.

		Flujo de Cono		Embudo V	Caja L		Anillo J			Resistencia	
		T ₅₀ (s)	D _{max} (mm)	T _v (s)	H ₂ /H ₁ %	T _f (s)	T ₅₀ (s)	D _{max} (mm)	H ₂ /H ₁ %	MPa	Rango %
HAC1	Promedio	2	701	11	68	8	3	685	59	44,5	28
	CV(%)	35	5	48	22	71	54	10	34	17,5	76
	Dos. Orig.	2	700	10	75	8	2	730		55,0	
	90% Inter	$\pm 1,2$	± 61	± 8		± 9	$\pm 2,5$	± 110	± 33	± 13	± 35
	Límites		± 80	± 3	>75						
HAC2	Promedio	2	681	9			2,5	648	60	34,0	10
	CV(%)	43	13	25			45	19	14	9,2	57
	Dos. Orig.	2	740	10			3	720		35	
	90% Inter	$\pm 1,3$	± 155	± 3			$\pm 1,5$	± 200	± 15	± 5	± 10

Tabla 7.15. Estadísticos calculados para las dosificaciones HAC1 y HAC2.

Los valores de T50 en el ensayo de flujo de cono son muy constantes en ambas dosificaciones. El alto coeficiente de variación se debe a que el valor de referencia es de sólo (2 s), con lo que variaciones de apenas 1 s son significativas en términos de coeficiente de variación.

Las figuras 7.10 y 7.11 presentan los resultados de Dmax en el ensayo del Flujo de cono para todas las amasadas de la serie HAC1 y HAC2 respectivamente. Se aprecia la repetitividad de resultados en la serie HAC1, en la que los ensayos se realizaron en dos amasadas diferentes (A y B) para cada variación.

El escurrimiento en el ensayo de flujo de cono (D_{max}) también presenta una gran robustez en el hormigón HAC1, con un coeficiente de variación del 5%. En cambio en el hormigón HAC2 se detecta una mayor sensibilidad. La amasadas “11, 13 y 14” son las causantes de este hecho y sólo ellas provocan un descenso importante del escurrimiento medio del grupo de amasadas. La razón de este efecto no es el exceso de agua ya que cada una de las amasadas presenta una situación diferente en este factor, sino los excesos en cemento, o los defectos en aditivo, que como vimos es superior a lo esperable. Esta dosificación es por tanto más sensible a los errores que producen reducción en el flujo.

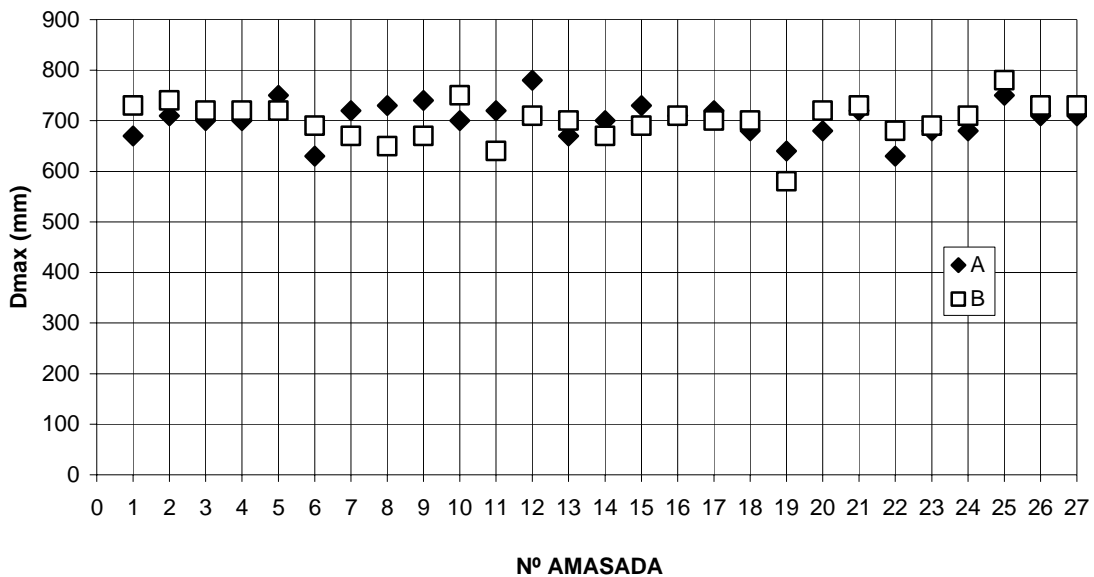


Fig.7.10 Resultados del Dmax en el ensayo del Flujo de Cono para la dosificación HAC1

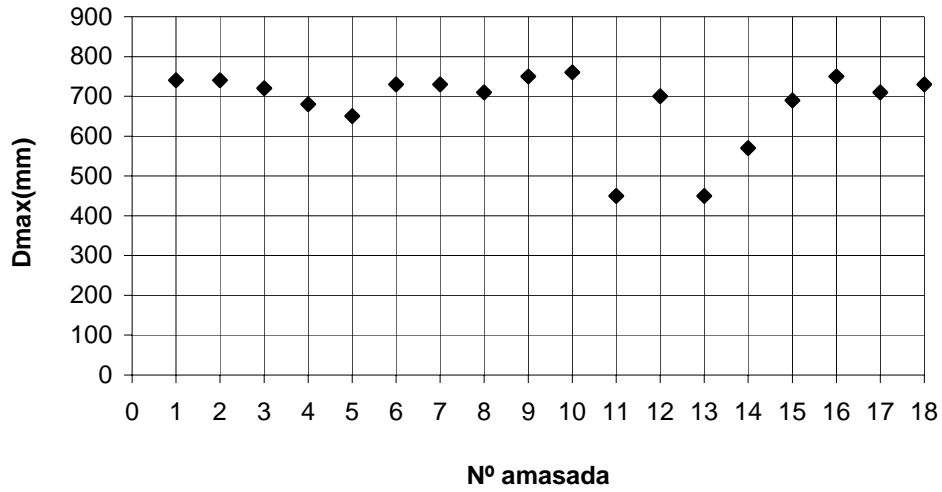


Fig.7.11 Resultados del Dmax en el ensayo del Flujo de Cono para la dosificación HAC2

Las figuras 7.12 y 7.13 presentan los resultados de Tv en el ensayo del embudo para todas las amasadas de la serie HAC1 y HAC2 respectivamente.

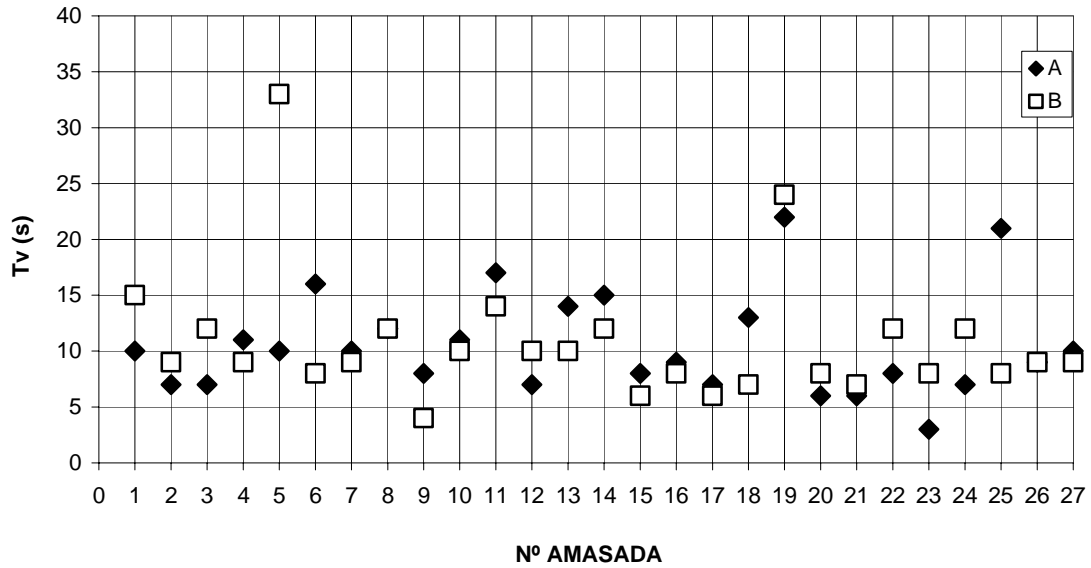


Fig.7.12 Resultados del Tv en el ensayo del Embudo en V para la dosificación HAC1

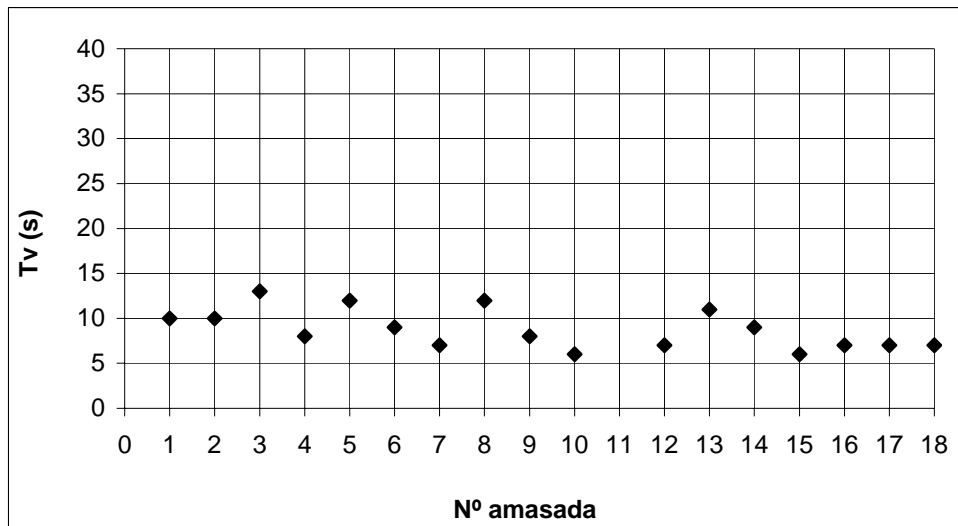


Fig.7.13 Resultados del Tv en el ensayo del Embudo V para la dosificación HAC2

El tiempo detectado en el ensayo del embudo en V presenta una tendencia contraria al del escurrimiento. Ahora la dosificación HAC2 muestra un resultado muy robusto, donde incluso con los excesos de variación analizados todos los resultados obtenidos entran en tolerancia. Sin embargo la dosificación HAC1 muestra algunas dispersiones a considerar. Por una parte los resultados son menos repetitivos y es relativamente frecuente que dos amasadas del mismo hormigón difieran en 10 segundos.

En la dosificación HAC2 sólo la amasada 11 muestra un valor fuera de tolerancia no llegando a pasar por el embudo, por lo que no sale en la gráfica, otra vez corresponde a un caso con defecto de agua y aditivo y con exceso de cemento por encima de los límites esperables.

En cambio en la dosificación HAC1 muchas variaciones superan las tolerancias, siempre por exceso de tiempo de flujo, y siempre a causa excesos de cemento o filler o defectos de aditivo.

En el ensayo del Anillo J los resultados del diámetro máximo presentan las mismas tendencias encontradas en el Flujo de Cono con los resultados potencializados (fig.7.14).

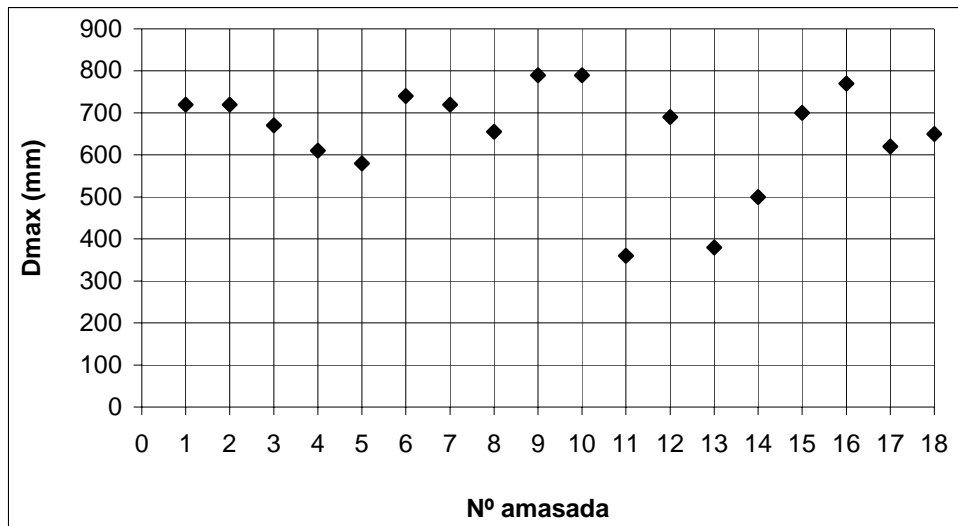


Fig.7.14 Resultados del Dmax en el ensayo del Anillo J para la dosificación HAC2

A pesar de que la dosificación HAC2 tiene un contenido limitado en finos y granulometría discontinua, muestra poca tendencia a segregación y mucha adaptabilidad a las condiciones de puesta en obra, lo que queda reflejado en los valores del rango y en que la resistencia media de todas las amasadas coincide con la de la amasada original.

La figura 7.15 presenta los resultados de rango y profundidad de segregación realizados sobre las probetas del hormigón de referencia HAC2. Se aprecia una clara coincidencia de valores de manera que cuando existe a una cierta tendencia a la segregación el rango crece, evidentemente porque las probetas fabricadas en condiciones desfavorables dan valores de resistencia bajos. Como consecuencia las resistencias de estas amasadas quedan por debajo del valor de referencia, pero prácticamente sin afectar al valor medio del conjunto.

Sólo las amasadas 9, 10 y 16 presentan rangos muy superiores a las demás. Estas tres fueron las mismas que presentaron tendencias a la segregación en estado fresco y en la profundidad de segregación.

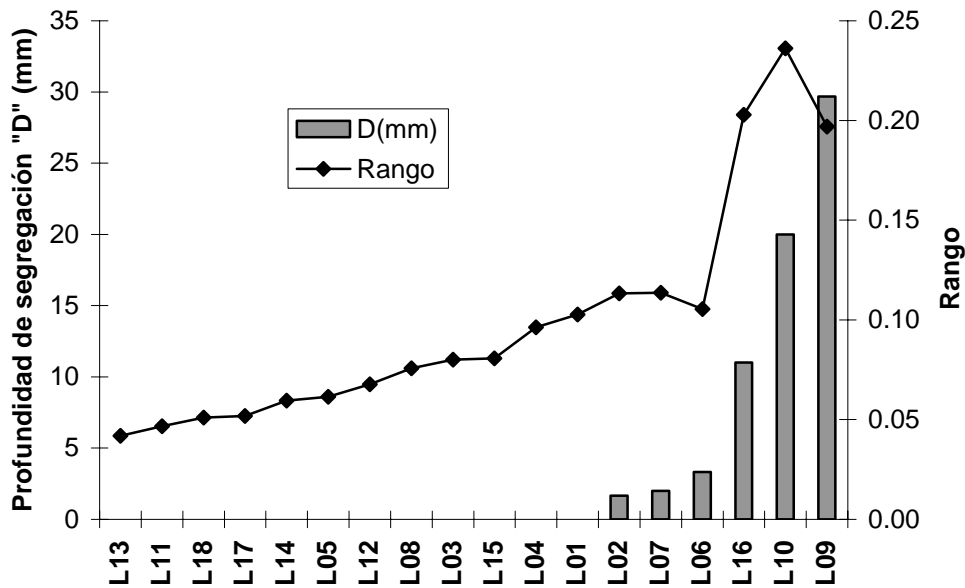


Fig. 7.15 Profundidad de segregación y rango de las probetas de la dosificación HAC2

Para justificar el comportamiento de las amasadas 9, 10 y 16 se puede hacer alusión a un alto contenido en aditivo o un defecto excesivo de cemento o filler por encima de lo normalmente aceptable.

En la dosificación HAC1 no se repite este paralelismo de resultados entre rango y segregación. En este caso la segregación se produce en un mayor número de amasadas, pero apenas se aprecia en estados fresco durante los ensayos de escurrimiento y embudo V. Al ser una dosificación rica en finos la segregación se produce por sedimentación, a medio plazo, de los áridos gruesos, y apenas se aprecia en superficie que da apariencia de lisa.

En esta dosificación las amasadas que muestran segregación no siempre coinciden con las de mayor rango. Así en las amasadas 9, 10 o 21 de esta serie que presentan segregación el rango es muy bajo, mientras que la 20, 22 o 26 con valores altos de rango no dan señales de segregación. Tampoco se ha podido detectar una dependencia clara de alguno de los componentes en la segregación.

El valor medio de resistencia de la dosificación HAC1 queda por debajo de la resistencia de referencia debido al mayor rango de las amasadas que da lugar un descenso de los valores de resistencia de cada amasada. Además el coeficiente de variación de la resistencia a compresión de esta serie es de un 17,5 %. Evidentemente este resultado no se habría detectado en un control de calidad de una obra ya que en ese caso las probetas se habrían fabricado en condiciones normales, y nunca con el resto de un ensayo de embudo V.

En la serie HAC2 el coeficiente de variación de la resistencia a compresión es menor, del 9,2 %, en la línea de una buena producción de hormigón. Como conclusión ésta dosificación, con menor contenido en finos ha demostrado ser más robusta que la HAC1 en casi todas las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, sólo el escurrimiento es un ensayo más exigente en este hormigón que en el HAC1.

En este punto debemos recordar las condiciones en las que se analiza estos resultados, y por tanto podemos considerar que las amasadas son suficientemente robustas en el margen de tolerancia admitidas en los distintos códigos.

7.6.2.3 Análisis de resultados de las series HAC3 y HAC4

Como consecuencia de los resultados previos y del estudio estadístico de producción a gran escala se limitaron las variaciones a aplicar sobre el resto de dosificaciones al agua y el contenido en finos, pero en ambos casos aplicando un nivel de variación de $\pm 6\%$. Se pretende con ello eliminar los efectos de las variaciones sobre componentes cuya dosificación se sabe que se realiza con mayor precisión de lo exigido por los códigos, pero también analizar si el efecto de la mayor variabilidad del contenido en agua permite mantener las conclusiones del apartado anterior.

Las figuras 7.16 y 7.17 muestran la evolución del Dmax en el ensayo de Flujo y el Tv en el Embudo V en función de la relación agua/finos para las dosificaciones HAC3, HAC3F, HAC3C y SCC4.

La semejanza de las pendientes encontradas para las dosificaciones HAC3 en el ensayo del flujo de cono indica que dichas dosificaciones presentan la misma sensibilidad frente a las variaciones del agua utilizadas en esta etapa. Se puede concluir que para

Dmax las variaciones entre las dosificaciones HAC3, HAC3F Y HAC3C en lo relativo a finos o cohesionante se compensan por variaciones en el contenido en superplastificante ajustados en la dosificación base.

Las cuatro dosificaciones muestran suficiente robustez en el ensayo de escurrimiento, con variaciones inferiores a ± 50 mm. Esta misma conclusión se puede aplicar al ensayo de embudo en V donde los resultados se encuentran en todos los casos en márgenes de ± 3 seg. Sólo la dosificación HAC3F muestra valores discordantes con esta tendencia. Esto coincide con los resultados obtenidos en la primera y segunda etapa donde se encontraba también que un hormigón de tamaño máximo 20 mm se hacía más sensible especialmente en lo relativo al resultado del embudo en V a cuando el contenido en finos era elevado.

Por otro lado, la utilización de cohesionante (dosificación HAC3C) genera un resultado más estable que el obtenido en la dosificación en la que se amplió el contenido en finos (HAC3F), pero es más sensible a la variación del contenido en agua que la dosificación original (HAC3), lo que se detecta por un ligero incremento de la pendiente de las curvas de tendencia.

Analizando HAC4 se observa mayor sensibilidad del Dmax a la variación de agua. Sin embargo, no presenta variaciones importantes, en la grafica de Tv. Esto se debe a que utiliza un tamaño máximo de árido de 12 mm, con lo cual, la posibilidad de bloqueo de los áridos es muy baja.

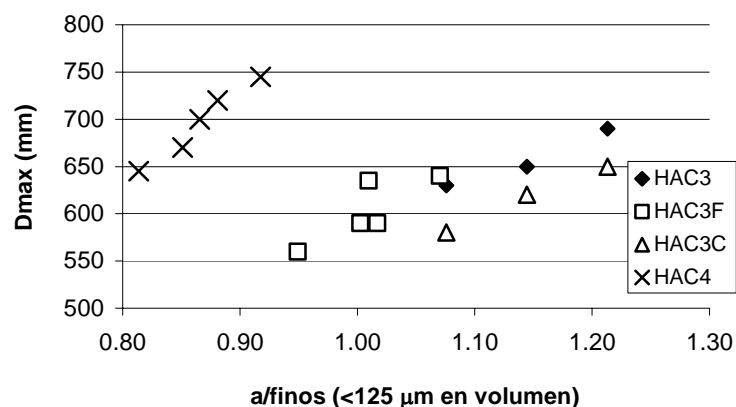


Fig.7.16 Evolución del escurrimiento

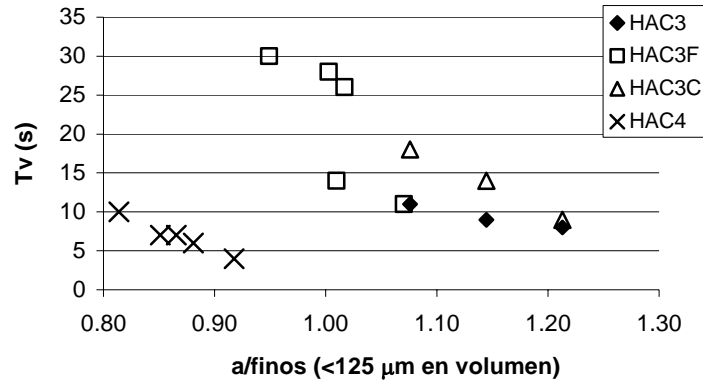


Fig. 7.17 Evolución del embudo V

Ninguna de las amasadas ha mostrado el menor síntoma de segregación, ni en los ensayos específicos de segregación ni por disminución de la resistencia respecto al hormigón de referencia. Evidentemente se puede considerar que estas dosificaciones son suficientemente robustas, salvo lo comentado para HAC3F.

7.7 CONSIDERACIONES FINALES

Tras los estudios y ensayos realizados se puede concluir:

- Los márgenes de error cometidos en plantas de hormigón preparado en lo relativo a la dosificación de materiales sólidos y aditivos, se adaptan o mejoran las tolerancias exigidas por los códigos, especialmente en cemento y aditivos.
- La influencia de estos últimos sería importante si la dispersión en su dosificación se ampliara a los márgenes permitidos, pero en los niveles de calidad de una buena central de hormigón preparado su influencia en las propiedades de los HAC no debe presentar especial impotencia. Ampliar el estudio a márgenes de variación más reducidos sería conveniente para confirmar esta opinión.
- Los errores de pesaje en arenas y gravas no afectan a ninguna de las propiedades estudiadas.
- Únicamente la precisión en la dosificación de agua total o de finos parece plantear dudas en su precisión ya que pueden ser aportados por distintos componentes, y especialmente su presencia en los áridos no suele estar controlada con suficiente precisión.
- La precisión en la dosificación del agua es el factor fundamental en la robustez de un SCC. Si se garantiza una tolerancia del $\pm 6\%$ en el contenido de agua total (el doble de la tolerancia normalmente exigida en los códigos) se puede conseguir HAC que muestran suficiente robustez.
- La sensibilidad a los errores varía para las distintas dosificaciones. La mejora de la estabilidad del Flujo de cono a base de añadir finos puede generar dosificaciones más sensibles en las propiedades relacionadas con la velocidad de movimiento (el Tv) especialmente en hormigones con tamaño máximo de árido de 20 mm. Este planteamiento puede llevar a dosificaciones aparentemente

estables pero con riesgo de segregación por sedimentación y con pérdida de resistencia si se utilizan en elementos difíciles de hormigonar.

- Cuando se pretenda obtener hormigones más cohesivos es preferible optar por el uso de aditivos específicos, o por reducir el tamaño máximo del árido, pero siempre manteniendo una estructura granular adecuada, sin exceso de pasta o mortero.

CAPÍTULO 8

APLICACIÓN: DOSIFICACIÓN Y CONTROL DE EJECUCIÓN DEL HAC UTILIZADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE LAS PILAS DEL PUENTE EN LA RONDA NORTE DE VALENCIA

8.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se presenta un caso real de aplicación de HAC en obra.

Se trata de la construcción de las 6 pilas del puente de la carretera CV 350 (Av.Cortes Valencianas) sobre la Ronda Norte de Valencia.

Factores como la urgencia en los plazos de ejecución, la necesidad de vertido de todo el hormigón de cada pila en una sola puesta, el encofrado ya preparado, el armado intenso, que impedía el acceso para la vibración, así como la falta de visibilidad para verificar la correcta compactación y la puesta en obra por bombeo llevaron a plantear la utilización del HAC como solución constructiva.

El intenso tráfico que soporta el cruce en obras exigía actuaciones rápidas. Por ello los plazos impuestos fueron cortos y estrictos, exigiendo iniciar el vertido de la primera pila en el plazo de una semana, y continuando a un ritmo de una pila cada 6 días naturales.

Este capítulo describe la justificación de las actuaciones, el diseño de la mezcla de hormigón empleada en la obra, la definición de los criterios de ejecución del hormigón y su puesta en obra, así como el control de calidad realizado durante el vertido de todas las pilas.

8.2 DESCRIPCIÓN DE LA OBRA

Las pilas objeto de este trabajo corresponden al puente situado en el tramo Benimamet – Ciudad Fallera de la Ronda Norte de Valencia.

Se trata de 6 pilas cuya sección tiene la forma indicada en la fig. 8.1, con un área de 3,91 m² y 12,30 m de altura.

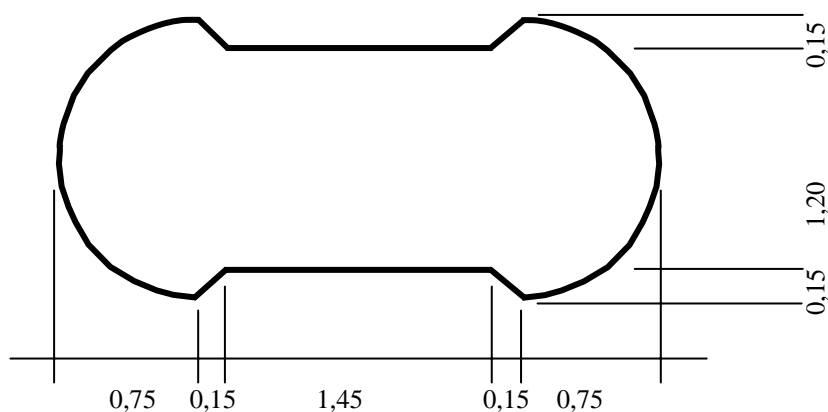


Fig. 8.1. Dimensiones de la sección de las pilas

La disposición de armaduras queda reflejada en las figuras 8.2 y 8.3 donde se aprecia la gran concentración de barras en el perímetro (fig.8.4). La distancia entre ejes de armaduras verticales en el perímetro es de apenas 10 cm. Por tanto el espacio libre apenas alcanza los 7 cm, distancia que se reduce sensiblemente en la zona de solapes. La disposición de armaduras en los planos horizontales, aunque de menor diámetro, generan una malla que impide el acceso de personal para garantizar la puesta en obra y compactación del hormigón por métodos tradicionales. Por otra parte la altura de la pila (fig.8.5) dificulta su iluminación durante la ejecución para garantizar un control visual fiable de la correcta puesta en obra y compactación.

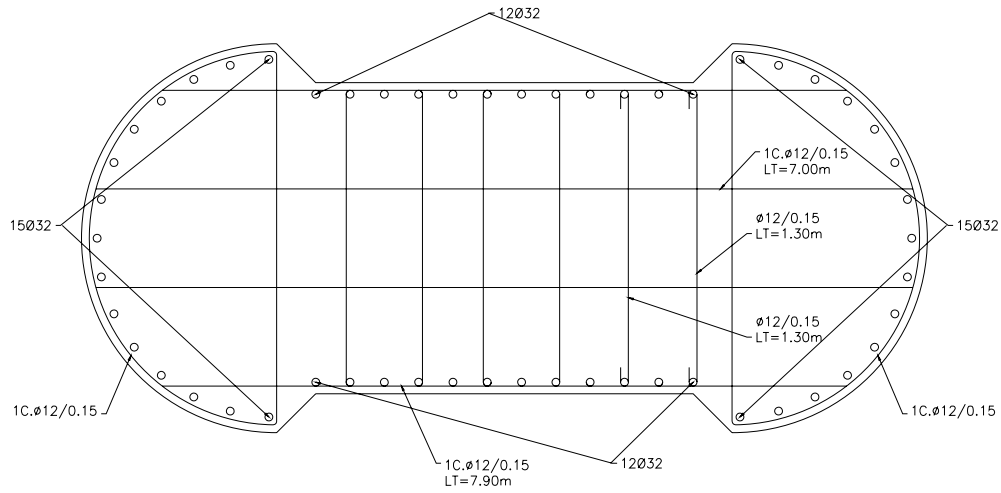


Fig. 8.2 Detalle de armado de las pilas. Sección básica

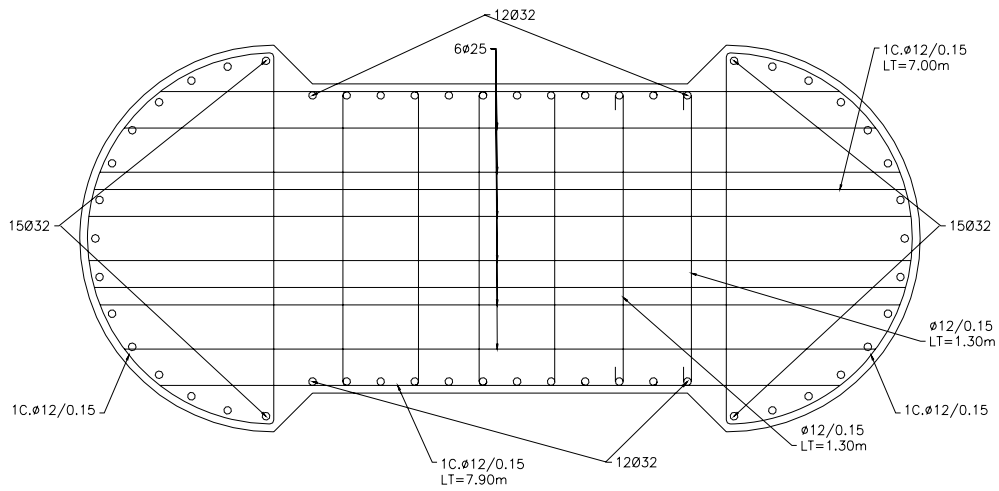


Fig. 8.3 Detalle de armado de las pilas. Sección en Cabeza de pila

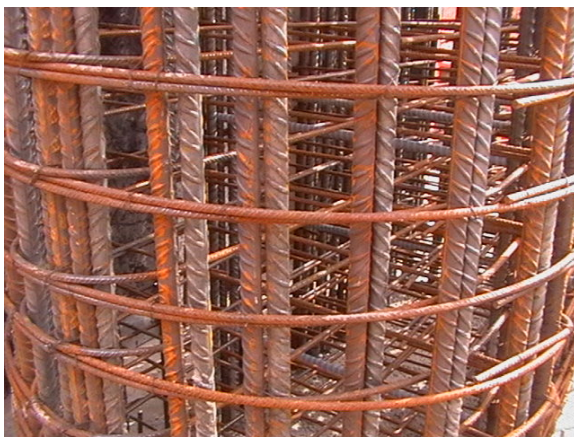


Fig. 8.4. Disposición de armaduras



Fig. 8.5. Encofrado

8.3 JUSTIFICACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN EMPLEADA

8.3.1 Ideas iniciales

Las dosificaciones, ya clásicas, de hormigones autocompactantes se han basado en:

- Contenidos altos en cemento,
- Dosificaciones elevadas en finos,
- Tamaños máximos de árido relativamente pequeño (del orden de 12 mm)
- Alta relación arena / grava

En general este modo de actuar facilita la puesta en obra del hormigón y sobre todo la capacidad de paso del hormigón a través de los espacios entre las armaduras cuando éstos son demasiado pequeños, y la capacidad para rellenar completamente los encofrados. Se puede conseguir con estos hormigones valores de escurrimiento superiores a 700 mm y al mismo tiempo conduce a hormigones de niveles altos de resistencia. Sin embargo el comportamiento del hormigón endurecido puede verse modificado, presentando mayores retracciones, mayor calor de hidratación, y mayores deformaciones especialmente en lo relativo a las deformaciones diferidas.

Sin embargo la obra a realizar no exigía alta resistencia, y las distancias entre armaduras, aún siendo muy pequeñas, pueden permitir el paso de áridos a emplear (20 mm). Sólo el relleno de los recubrimientos presenta una dificultad considerable.

Dada la premura de las actuaciones parecía poco recomendable plantear una serie de ensayos con materiales nuevos, o con dosificaciones teóricas no experimentadas. Por ello se decidió actuar sobre dosificaciones ya utilizadas con los mismos equipos, con el mismo suministrador de hormigón y con los mismos materiales empleados previamente para la obra.

Se decidió tomar como referencia un hormigón empleado en la ejecución de pilotes cuya dosificación se indica en la tabla 8.1.

Material	Tipo	Dosificación Kg/m ³	Observaciones
Cemento	CEM /II B-V 42,5 R	370	
Agua total		177	(a/c = 0,48)
Arena Seca 0/4	Machaqueo	140	12% de finos
Arena Lavada 0/4	Machaqueo	850	3 % de finos
Grava 12/20	Machaqueo	870	
Plastificante	Polifuncional (1% s/C)	3,6	
Superplastificante	Eter policarboxilico(0,7 % s/C)	2,5	

Tabla 8.1. Dosificación previa para pilotes

Con esta dosificación se tenía experiencia en dosificaciones muy fluidas (cono de Abrams superior a 18 cm), con resistencia similar a la deseada.

A partir de esta dosificación se plantearon los siguientes criterios de actuación:

- Mantener una estructura granular similar a la del hormigón de pilotes, sin incrementar sustancialmente el contenido en pasta, y manteniendo el tamaño máximo de árido en 20 mm. Se pretendía mantener un modelo de comportamiento del hormigón endurecido similar al de cualquier hormigón tradicional, evitar retracciones elevadas y exceso de viscosidad.
- Mantener el contenido en cemento y la relación a/c en aras a garantizar los niveles de resistencia ya experimentados
- Garantizar la característica de autocompactante para las condiciones de obra. No parecía necesario alcanzar valores de escurrimiento excesivos ya que pensando en una puesta en obra por bombeo dejando caer el hormigón en el centro de la sección la distancia máxima a recorrer sería de 1,6 m. Por ello se planteó limitar el objetivo de escurrimiento a valores de entre 500 y 600 mm. Se pretende que sea autocompactante, pero aprovechando y valorando la energía de compactación, no despreciable, que garantiza el método de puesta en obra empleado (bombeo), y el peso propio del hormigón.

- Conseguir todo esto sin riesgos de segregación para las condiciones de puesta en obra
- Verificar la viabilidad de las condiciones de ejecución (fluidez necesaria, relleno de encofrados, acabado superficial y resistencia a corto plazo) en elementos reales de obra.

Con esta idea las variaciones posibles se limitaron a sustituir el aditivo superplastificante por otro de última generación, y fijar la dosificación adecuada. Incrementar ligeramente la relación arena seca / arena lavada para aumentar el contenido en finos y así la cohesión de la mezcla. Y finalmente, incluir grava 6/12 para dar continuidad a la granulometría y reducir los riesgos de segregación

8.3.2 Ensayos previos en obra

Para los primeros ensayos previos se seleccionó la dosificación del hormigón presentada en la tabla 8.2.

Material	Tipo	Dosificación Kg/m ³	Observaciones
Cemento	CEM /II B-V 42,5 R	370	
Agua total		177	(a/c = 0,48)
Arena Seca 0/4	Machaqueo	300	12% de finos
Arena Lavada 0/4	Machaqueo	690	3 % de finos
Grava 6/12	Machaqueo	270	
Grava 12/20	Machaqueo	600	
Plastificante	Polifuncional (1% s/C)	3,6	
Superplastificante	Eter policarboxílico	Variable	

Tabla 8.2. Dosificación para el hormigón de las pilas

Tras unos primeros ensayos en los laboratorios de la UPV, con materiales propios similares, por no disponer todavía de los originales, se decidió realizar ensayos previos directamente en obra. Para ello se hormigonaron dos encepados de sección 1 x 1 m y 12 m de longitud en los que se incrementó la disposición de armaduras para simular la densidad de armado de las pilas. El objetivo fue el de verificar la viabilidad del hormigón propuesto, y fijar en su caso la dosificación ideal del superplastificante. Para

ello en la fabricación del primer encepado se utilizó tres suministros que se diferenciaban únicamente en el contenido en superplastificante.

El vertido se realizó desde un punto fijo en los dos primeros camiones dejando al hormigón fluir para rellenar el encepado. Sólo en el último suministro se modificó el punto de vertido para garantizar horizontalidad de la superficie final del elemento. Se mantuvo un tiempo de espera entre camiones variable entre 30 minutos y una hora para simular los tiempos de espera previstos durante la obra. Además de verificar el escurrimiento de las diferentes amasadas se observó el modo de flujo del hormigón, se fabricaron probetas para determinar la resistencia y tras el desencofrado se extrajeron testigos para comprobar la posible aparición de coqueas en el interior del hormigón. El emplazamiento de los testigos se decidió buscando las situaciones más desfavorables especialmente las direcciones que cruzan las capas de distintos vertidos de hormigón.

Las dosificaciones ensayadas, y los resultados obtenidos en los ensayos de cada suministro se indican en la tabla 8.3. La figura 8.6 muestra el aspecto del hormigón colocado

Suministro	Dosificación Glenium C355 l/m ³ (% s / c)	Escurecimiento (mm)	Aspecto
1	3,1 (0,86)	420	Fluido, muy cohesivo
2	3,3 (0,92)	600	Fluidez adecuada
3	3,5 (0,97)	720	Rápido, Segregado

Tabla 8.3. Resultados de los ensayos previos sobre el primer encepado



Fig 8.6. Aspecto del hormigón en los ensayos previos

Tras estas pruebas realizadas en obra los resultados permitieron alcanzar las siguientes conclusiones:

- El hormigón fabricado con $3,3 \text{ l/m}^3$ de superplastificante mostraba un aspecto cohesivo, y fluía con facilidad hasta distancias superiores a 7 m generando superficies libres con pendientes del orden del 6 %
- En hormigones con mayor dosificación de superplastificante, cuando el escurrimiento supera valores de 600 mm se aprecia tendencia a la segregación con separación de lechada.
- En hormigones con menor dosificación de superplastificante y valores de escurrimiento incluso ligeramente inferiores a 500 mm presentaban una buena fluidez garantizando la colocación y autocompactación, aunque con menor velocidad de movimientos
- La dosificación muestra una gran sensibilidad al contenido en superplastificante, de manera que modificaciones de apenas $\pm 0,05\%$ s/C (del orden del 6% sobre la dosificación del aditivo), el hormigón pasa a estar segregado o a no ser suficientemente fluido.
- La disposición de armaduras similar a la de las pilas a hormigonar no representaba un impedimento importante al paso del hormigón.
- La superficie encofrada del hormigón presentó un aspecto liso, y sólo mostró algunas coqueras en las zonas de separación entre capas de vertido cuando se situaban en las posiciones más armadas, y especialmente las más alejadas de los puntos de vertido y cuando el tiempo de espera entre capas era mayor.
- Los testigos no mostraron discontinuidades entre las distintas capas de vertido y no se apreció señales de coqueras. Esto indica una buena autocompactación y conexión entre las capas, y demuestra que las pocas coqueras que aparecían eran sólo superficiales

- El vertido con la manguera de la bomba sumergida en la masa del hormigón generaba un mejor aspecto superficial y menores riesgos de segregación.
- Las probetas fabricadas por vertido simple a partir de recipientes rellenos directamente del camión presentaron muchas coqueras en superficie, no coherentes con el aspecto superficial del elemento construido. Esto se debe a que la energía de vertido en obra es importante y garantiza la colocación del hormigón. Por ello se decidió picar las probetas para posteriores controles de calidad. Asimismo, incluso las probetas no picadas alcanzaban niveles de resistencia a tres días suficientemente altos y superaban, ya a 4 días, el valor requerido al hormigón, a pesar de que el método de fabricación distaba de ser el ideal para representar a un hormigón de este tipo.

8.3.3 Propuestas para la optimización de la dosificación, Definición de la dosificación definitiva

Vista la sensibilidad de las propiedades del hormigón a cambios en su dosificación, y su posible efecto en la tendencia a segregación, se planteó la realización de ensayos de prueba con nuevas dosificaciones para mejorar la cohesión del hormigón, garantizar la continuidad del producto en lo relativo al escurrimiento y reducir los riesgos de segregación.

Los criterios incluyeron pruebas mediante:

- Empleo exclusivo de arena seca. Esto incluye más finos y por tanto da mayor cohesión, al tiempo que por tener una humedad menor y más constante garantiza un mejor control del contenido de agua total.
- Utilización de arenas menos absorbentes, que pueden garantizar mejor el mantenimiento de la trabajabilidad (menor pérdida de agua por absorción)

- Utilización de una dosificación fija de cohesionante (0,5%) como alternativa o complemento a las acciones anteriores.

Cualquiera de las actividades anteriores conducirá a la exigencia de mayor dosificación de superplastificante.

Se ha realizado algunos ensayos relativos a la modificación de los áridos empleados aunque los resultados no fueron suficientemente satisfactorios para modificar la dosificación propuesta. Por la urgencia de las actuaciones se acometió el hormigonado de las pilas con la dosificación propuesta en la Figura 8.7 exigiendo un control de recepción importante según el criterio que se exponen en el apartado 8.4.

Material	Tipo	Kg/m ³
Cemento	CEM II 42,5	360
Agua total		173
Arena Seca 0/4	Machaqueo	300
Arena Lav. 0/4	Machaqueo	690
Grava 6/12	Machaqueo	270
Grava 12/20	Machaqueo	600
Aditivo 1	Polifuncional	3,6
Aditivo 2	Eter policarboxilico	3,3
a/c	0,48	
Finos < 125 μm		508
A/Finos (Vol.)	1,0 – 1,1	

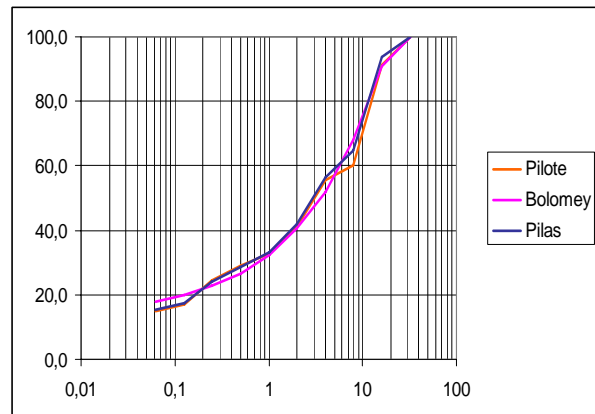


Fig. 8.7. Dosificación propuesta y granulometría

8.4 PROPUESTA DE CRITERIOS DE RECEPCIÓN Y ACEPTACIÓN DEL HORMIGÓN

Para mantener controlada la recepción y la calidad del hormigón durante toda la obra y garantizar así la constancia del material suministrado se definió una serie de procedimientos y se propuso determinados criterios para la recepción del hormigón.

Estos procedimientos y criterio consisten en:

- Se fijará la hora prevista para la llegada de cada camión hormigonera para garantizar un ritmo de un camión ($6 \text{ m}^3 - 1,5 \text{ m}$ de altura) cada hora. Para cada camión se rellenará una ficha con los datos indicados en la fig 8.8.
- Se garantizará que en la obra haya aditivos, superplastificante y cohesionante, disponible para una posible readitivación.
- El camión hormigonera:
 - Deberá tener capacidad para amasado de 10 a 15 rpm
 - Llegará con más de 15 minutos de antelación sobre la hora prevista de hormigonado, pero se evitará exceso de tiempo de espera. (entre 15 y 30 min debería ser un margen adecuado)
 - Durante el tiempo de espera se situará en la zona prevista para los ensayos de recepción. No se moverá de esta posición salvo autorización de la D.O. En caso de necesitar un pequeño aporte para el mantenimiento de la bomba el camión podrá desplazarse temporalmente para esa función volviendo a continuación a su posición de espera.

Fecha de hormigonado					
Dosificación	Teórica	Real de Planta	Recepción y /o Readitivación		
Cem II 42,5 B-V				1	2
A/C total			H - Ensayo		
Agua			Aspecto en caída		
Arena 0/4 seca					
Arena 0/4			Ecurr. (mm)		
Arena 0/4 seca			Segregación S/N		
Grava 6/12			Reamasado (min)		
Grava 12/20			Reamasado (rpm)		
Polifuncional			Readitivación		
Superplastificante			Litros / cam		
Cohesionante			Litros / cam		
H - Salida de planta			Valores ensayos finales		
Esc. En planta (mm)			Aspecto en caída		
Temperatura ambiente			Escurrimiento (mm)		
H - Llegada obra			Segregación S/N		

Vertido en capa N°		Hora vibración	
Hora inicio vertido		Hora toma de muestras	
Hora final vertido		Escurrimiento (mm)	
		Referencia probetas	

Elemento a hormigonar:
 Croquis de la capa hormigonada

Referencia a disposición de armaduras
 (adjuntar o hacer referencia a plano de armado)

Posición altura de vertido y movimientos de la bomba

Aspecto durante el vertido

- Velocidad
- Cohesión
- Segregación
- Paso por las armaduras

Observaciones:

Ensayos / probeta N°:					
Edad al ensayo					
Conservación obra					
Conservación lab.					
Aspecto					
Densidad					
Resistencia					

Fig. 8.8 Ficha de control de hormigonado

Ensayos de aceptación:

Los ensayos empezarán 15 minutos antes de la hora prevista para el vertido (nunca antes). Consistirán en:

A) Procedimiento:

- Vertido en caída libre, a velocidad media, de unos 50 l de hormigón y observación de posible segregación (lechada separada o consistencia excesivamente seca)
- Toma de muestra: sin modificar la velocidad de caída del hormigón se introducirá en el chorro una carretilla para coger entre 30 y 40 litros de hormigón.
- Ensayo de escurrimiento. Se determinará el tiempo T_{50} en su caso, y el diámetro máximo (d). Se comprobará si presenta tendencia a la segregación.

B) Criterio de aceptación o readitivación.:

- Si $d < 400$ se readitivará en obra con 5 litros de superplastificante
- Si $400 < d < 470$ se readitivará en obra con 3 litros de superplastificante
- Si $470 < d < 600$ y no hay muestras de segregación, Se aceptará el hormigón
- Si $600 < d < 650$ se readitivará (en su caso) en obra con 3 litros de cohesionante
- Si $650 > d$ se readitivará en obra con 5 litros de cohesionante

C) Procedimiento de readitivación: Cualquier indicio de segregación planteará el rechazo de la amasada o la necesidad de readitivación con cohesionante.

- Tras la medición e introducción del aditivo seleccionado, el camión hormigonera amasará la mezcla girando a máxima velocidad durante 10 min.
- Transcurrido este tiempo se repetirá el procedimiento del apartado B, pudiendo aceptarse o readitivarse una segunda vez la amasada.
- Si tras la segunda readitivación y repetición de los ensayos no se alcanza los objetivos previstos se rechazará el camión.

Las figuras 8.9 a 8.15 muestran diferentes aspectos del hormigón obtenidos durante los ensayos de control.



Fig 8.9. Hormigón vertido cohesivo

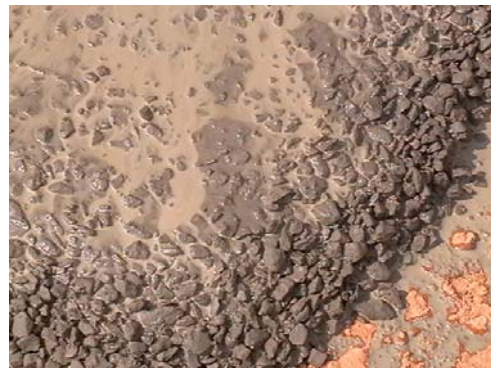


Fig 8.10. Hormigón vertido con aspecto segregado



Fig 8.11. Ecurrimiento 620 – Segregado / sin cohesión



Fig 8.12 y 8.13. Esgurrimiento 550 mm – fluido y cohesivo



Fig 8.14. Esgurrimiento 450. Poco trabajable



Fig 8.15. Esgurrimiento 400. Demasiado seco

8.5 ASPECTOS RELACIONADOS CON EL CALOR DE HIDRATACIÓN

Durante la fabricación de las pilas se preveía una temperatura ambiente media durante el día que podría superar los 25 ° C con puntas del orden de 35 ° C. Estas condiciones hacían prever que la temperatura en el hormigón podía alcanzar valores peligrosos. Es sencillo plantear soluciones a éste riesgo si se presenta de manera aislada, sin embargo en este caso el problema debía afrontarse junto con la necesidad de evitar presiones excesivas en el encofrado. Por ello se planteó criterios de dosificación que evitaran un fraguado excesivamente rápido, y al mismo tiempo sin medidas excesivas que pudiesen tener efectos demasiado nocivos en el otro aspecto. El empleo de cementos tipo II, y el aditivo plastificante utilizado, con cierta tendencia a retrasar el fraguado, apoyan estas medidas.

Para controlar la evolución de la temperatura se decidió incorporar sondas térmicas y verificar la temperatura de todas las pilas a fabricar.

La temperatura registrada en todas las pilas siguió una tendencia similar. Durante el tiempo que duró el vertido se mantenía entre 33 y 40 ° C, y ésta temperatura ascendía posteriormente alcanzando valores máximos de entre 70 y 74 ° C que se mantenían entre las 14 y 48 horas posteriores al final del vertido.

8.6 PRESIÓN PREVISTA SOBRE EL ENCOFRADO

El encofrado a emplear estaba definido y preparado en obra previamente a la decisión del empleo de hormigón autocompactable. Según información de la empresa suministradora, el diseño del encofrado garantiza una presión del hormigón máxima admisible de 60 kN/m^2 .

Los estudios sobre hormigones autocompactantes suelen proponer que el empuje sobre los encofrados es sensiblemente superior al que se alcanzarían sobre un hormigón tradicional. Este criterio se apoya en la hipótesis de que si el hormigón fuera perfectamente fluido la presión podría alcanzar a la hidrostática. Sin embargo en las investigaciones presentadas en congresos y revistas técnicas presentan claras diferencias en función de las diferentes consistencias que puede admitir un hormigón autocompactante. Así se puede plantear reducciones de hasta un 40 % de la presión hidrostática si la consistencia medida por escurrimiento en el cono de Abrams es de 550 mm (en la línea del hormigón utilizado en esta obra).

La aplicación al caso concreto de las pilas de la ronda norte exige considerar que:

- La estructura granular del hormigón empleado es similar a la de un hormigón tradicional.
- El escurrimiento previsto para el hormigón, con valores máximos que no debían superar los 600 mm sitúan al hormigón a utilizar en la frontera que separaría un hormigón tradicional de otro autocompactante.
- Los aditivos aplicados producen un hormigón muy tixotrópico, es decir, su fluidez es evidente mientras el hormigón está en movimiento, o sometido a vibración, pero se reduce de manera espectacular cuando pasa a estado de reposo. Por ello una puesta en obra lenta y con periodos de espera entre descargas reducirá sensiblemente la presión real del hormigón.

- La concentración de armaduras en el perímetro con separaciones de apenas 7 cm, que representan sólo 3 veces el tamaño máximo de árido en un hormigón con un contenido en árido grueso elevado permite admitir un cierto efecto de retención por parte de éstas.

Para evitar riesgos y reducir el empuje sobre el encofrado se propuso un programa de vertido con velocidad de ascenso de la cota de hormigón de 1,5 metros por hora que corresponde al vertido de un camión de 6 m³ de hormigón cada hora. A este ritmo el principio de fraguado, o al menos la pérdida de fluidez del hormigón debía permitir la consideración de una altura máxima hidrostática admisible.

Para el cálculo de la presión ejercida por el hormigón sobre el encofrado existen muchas fórmulas teóricas, con resultados no siempre coincidentes. Por ello se planteó un estudio a partir de varias normativas internacionales:

- ACI 347 / 78 (USA)
- DIN 28218 (Alemania)
- STBTP (Société de Difusión des Techniques du Bâtiment et des Travaux Publiques (Francia)

Las propuestas españolas suelen estar en la línea de la francesa que aquí se analiza.

Estas propuestas consideran como variables para el cálculo de la presión la velocidad de hormigonado, la temperatura ambiente, la docilidad del hormigón, la geometría del encofrado, o las características de la vibración aplicada (tabla 8.4)

	ACI 347 / 78	DIN 28218	STBTP
Presión máxima Fórmula	$0,73 + (80 V / 17,7 + T)$	$1,7 V + 1,7$	$2 + 0,85 V$
Correcciones		x 0,7 (temperatura) x 1,4 (retardador de fraguado)	x 4,1 (por consistencia, tipo y dosificación de cemento y por espesor)
Presión máxima Valor	3,5 t / m ²	4,2 t / m ²	13,6 t / m ² (*)

Tabla 8.4 Cálculo de la presión prevista sobre el encofrado

Donde:

V = velocidad de vertido (m de altura por hora)

T = temperatura ambiente (se ha considerado una situación muy desfavorable – T = 25 ° C, ya que como se vio en el apartado anterior en el hormigón se superaba siempre los 30 ° C).

(*) El criterio francés incluye la condición adicional de que la presión máxima corresponde a la presión hidrostática de la columna de hormigón vertido durante un tiempo igual al tiempo de fraguado. Para su valoración se propone la fórmula:

$$T_{fr} = (70 + 0,3 \alpha - 2 T) / (25 + T)$$

Con α = asiento en el cono de Abrams.

Si se aplica esta ecuación considerando un valor = 280 mm el resultado sería:

$$T_{fr} = 2,1 \text{ h}$$

Si se admite que el tiempo medio transcurrido desde la salida de planta hasta el inicio del vertido en todos los camiones ha sido de 60 minutos, con un mínimo absoluto de 32 minutos. Y por tanto la presión máxima sería: $(2,1 - 0,5) \times 2,4 \times 1,5 = 5,7 \text{ t / m}^2$

Esta valoración, aún siendo la más desfavorable entraría en el margen de seguridad.

Para evitar posibles accidentes la dirección de obra propuso medidas de seguridad y control del estado del hormigón mediante catas a través del encofrado.

8.7. PLANTEAMIENTO DEL PROCESO DE HORMIGONADO

8.7.1. Inclusión de vibradores de superficie

A partir de las experiencias previas en obra se admite que la característica de autocompactante está garantizada con la dosificación prevista. Sin embargo, en aras a garantizar un acabado superficial continuo, y para evitar los pequeños defectos superficiales observados en la frontera entre capas en los ensayos previos se propuso la aplicación de vibradores de superficie que actuaran puntualmente para coser las distintas capas de hormigón. La figura 8.16 muestra la posición en que se emplazaban los vibradores.

La aplicación de la vibración está justificada por el tiempo de espera entre capas y su finalidad es fundamentalmente estética y de protección a las armaduras en puntos singulares. Se entiende por tanto que la vibración de superficie es una actuación redundante para garantizar el buen acabado ya que las condiciones de los ensayos previos eran mucho más exigentes que el hormigonado de la pila.

Para cada capa de vertido sólo se colocaba una línea de 4 vibradores a la altura de la capa de hormigón que se estaba colocando en ese momento. Los vibradores eran desplazados a la capa siguiente durante el periodo de espera entre vertidos.

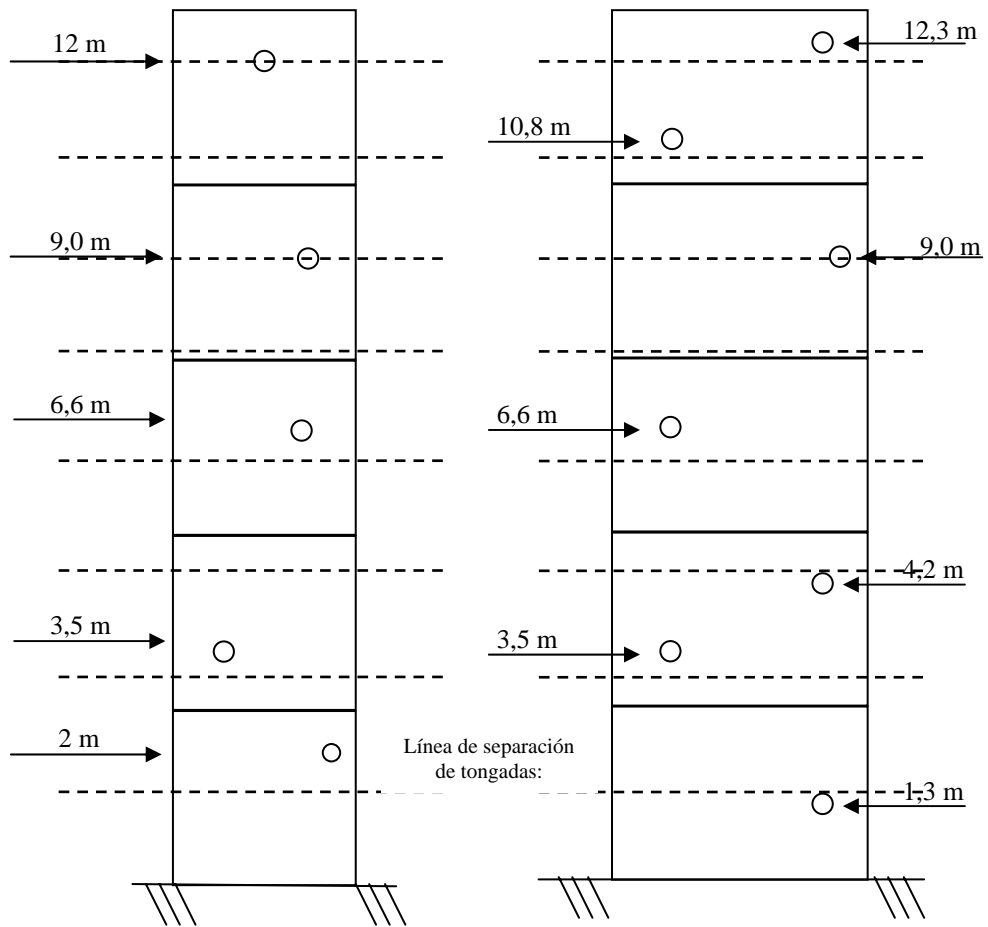


Fig. 8.16. Posición de los vibradores de superficie colocados.

8.7.2. Criterios de Vertido del hormigón

Para el vertido del hormigón se creó un procedimiento con los siguientes criterios:

- Una vez aceptado cada camión se dirige a la posición de la bomba y se procede al vertido. El vertido se realiza en dos etapas de aproximadamente el mismo volumen de hormigón.
- El “moco” de la bomba debe mantenerse lo más próximo posible a la superficie del hormigón previamente vertido, y si es posible debe quedar entre 10 y 20 cm bajo el nivel de éste.
- Entre las dos etapas de vertido se toma una muestra de hormigón. Para ello, sin modificar la velocidad de caída del hormigón se dirige la canaleta del camión sobre la carretilla de muestreo y se recogen del orden de 40 litros con el mismo criterio que para los ensayos de recepción. Inmediatamente se redirige la canaleta hacia la bomba continuando el vertido, y procediendo a la aplicación de una vibración de la superficie del encofrado de 20 segundos. Se evitará cualquier vibración al terminar el vertido de cada camión, a excepción del último de cada pila.
- Con la muestra se repetirá el ensayo de escurrimiento y se fabricará 5 probetas. Las probetas se rellenarán por simple vertido, y se compactarán por picado con barra.
- El tiempo total de vertido de cada camión será del orden de 20 minutos.
- Debe procurarse la iluminación del interior de la pila durante el vertido para poder verificar la correcta circulación del hormigón.
- Tras el vertido del último camión se procederá a un vibrado adicional de 20 segundos.

8.7.3. Curado y desencofrado

Al finalizar la jornada se aplica un producto de curado. A partir del día siguiente se procede a aplicar un curado por riego continuo desde la coronación de la pila, garantizando la humedad en todas las paredes durante al menos 3 días.

8.8. SEGUIMIENTO DE LA FABRICACIÓN DE LAS PILAS Y DE SU CONTROL DE CALIDAD

El proceso de recepción del hormigón se realizó según lo indicado en el apartado 8.4. De forma aleatoria, en algunos camiones, se realizó un segundo ensayo de flujo de cono a mitad de descarga.

Todos los suministros fueron supervisados por personal de la UPV.

El tiempo medio transcurrido desde la salida de planta hasta el inicio de vertido de cada camión fue de 60 minutos, con poca variación entre ellos.

El análisis del aspecto del hormigón vertido directamente sobre el suelo (Fig. 8.17) así como la observación del movimiento del hormigón en la carretilla hacia el punto de ensayos fue muy indicativo de la calidad a esperar. Los hormigones excesivamente fluidos mostraban signos claros de segregación y formación de una capa lechada en superficie y sedimentación del árido grueso.



Fig. 8.17. Vertido desde camión para control de recepción

En la primera pila fue preciso readitivar la mitad de los camiones vertidos, aunque sólo con ligeras modificaciones. Se verificó la necesidad de periodos largos de reamasado en caso de readitivación y se comprobó que los ensayos a media descarga solían presentar un comportamiento más centrado, y menos influenciado por el efecto de principio de camión y los riesgos de segregación que conlleva. Sin embargo se decidió mantener el control inicial, incrementando el volumen de vertido libre, ya que era la única manera de tener una idea aceptable de la consistencia a esperar en descarga.

En la segunda pila se detectó algún problema inicial por el aspecto que parecía mostrar mayor contenido en árido grueso, y cierta tendencia a segregar que se controlaban con la readitivación. Las actuaciones en planta, seleccionando y reservando suministros específicos de árido, y aumentando el control de humedad de los áridos tuvieron un efecto directo, y a partir de la media descarga de la segunda pila los hormigones recibidos presentaron un aspecto mucho más uniforme, y el número de readitivaciones se redujo drásticamente. La figura 8.18 muestra la evolución del comportamiento de los hormigones en las distintas pilas.

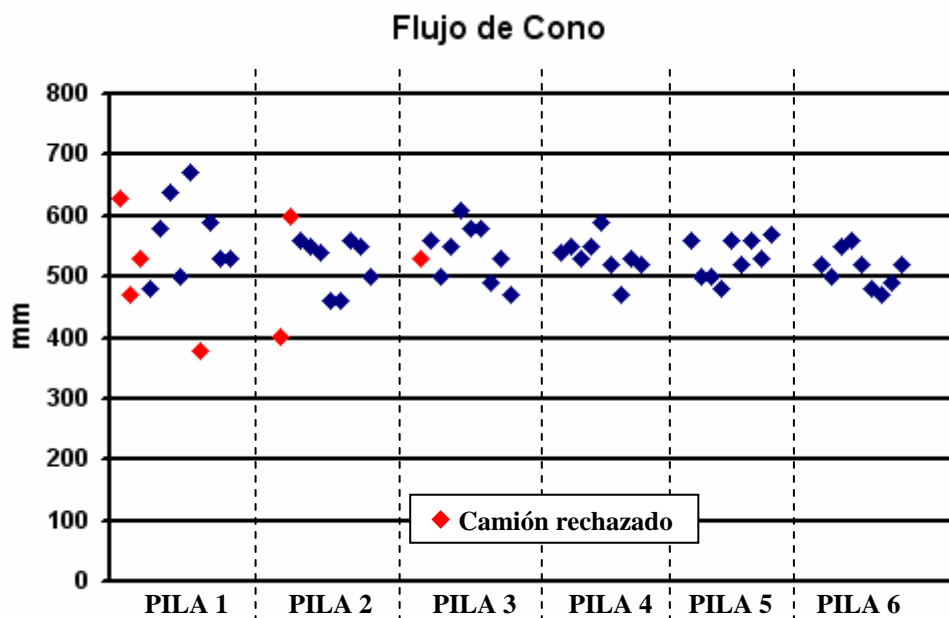


Fig 8.18 Evolución del comportamiento del hormigón en las distintas pilas.

Es interesante hacer notar que aunque el valor medido en el control era el del escurrimiento en el cono, las actuaciones se decidieron considerando fundamental la observación del aspecto y su tendencia a segregación. Por ello se aceptaron algunos vertidos con escurrimientos superiores a 600, y otros que no alcanzaban los 500.

Las pilas se hormigonaron de acuerdo con lo previsto en el apartado 8.7.

El funcionamiento en vertido a bomba no planteó dificultades (fig 8.19, 8.20), y se controló continuamente sobretodo en los hormigones más fluidos, por precaución por si se producía segregación.

Para la observación del vertido en el fondo de la pila se colocaron focos potentes (fig. 8.21), que permitían apreciar la llegada a los extremos de la sección sólo a partir de la mitad del vertido. En las últimas capas se pudo comprobar que la colocación, con el moco introducido en la masa, generaba un movimiento del hormigón suficientemente fluido, que se distribuía por toda la sección de la pila manteniendo una superficie superior prácticamente horizontal y rellenando correctamente los recubrimientos. (fig. 8.22, 8.23)

Tras el desencofrado se pudo apreciar el acabado superficial de las pilas que mostró un acabado correcto, prácticamente sin coqueras. Las figuras 8.24 y 8.25 muestran vistas finales de la superficie.



Fig. 8.19. Vertido a la bomba



Fig. 8.20. Vista general de la bomba durante el tiempo de espera



Fig. 8.21. Vertido de las primeras capas



Fig. 8.22. Relleno del recubrimiento



Fig. 8.23. Última capa de hormigonado



Fig. 8.24. Aspecto final de las pilas - lado Valencia



Fig. 8.25. Detalle del acabado en coronación

8.9 CONTROL DE RESISTENCIAS

Cada pila fue considerada como un lote sobre el que se realizó un control de resistencia en 4 de los camiones, y tras analizar los resultados se pudo observar que los recorridos obtenidos son pequeños, y siempre por debajo de los correspondientes a una clase A de central de hormigón preparado.

Para la interpretación de resultados debe indicarse que la toma de muestras no correspondió a un criterio estrictamente aleatorio, ya que todos los suministros fueron supervisados en recepción y durante el vertido, y cuando se presentaba cualquier situación diferencial se procedía a seleccionar ese suministro. Este modo de actuar conduce a incrementar las probabilidades de seleccionar los valores menos favorables y a incrementar la dispersión.

Dado que el carácter específico de este hormigón puede estar en el origen de estas pequeñas diferencias de resistencia se propuso la extracción de testigos para confirmar los datos de las probetas, verificar la calidad y homogeneidad del hormigón en profundidad, y analizar la influencia de las distintas actuaciones en obra.

Los testigos se realizaron el día 25 de octubre, cuando el hormigón ya había alcanzado los 3 meses.

Las dimensiones de los testigos fueron

- Diámetro 75 mm.
- Profundidad 400 mm.

De cada testigo se cortaron 2 probetas de 150 mm de longitud situadas una en la parte más superficial, y otra en el fondo del testigo. Sobre cada probeta se determinó la densidad y la resistencia a compresión.

Los resultados mostraron una clara coincidencia entre los valores obtenidos en los testigos y los de las tomas de muestra de los suministros correspondientes.

8.10. CONSIDERACIONES FINALES

Se ha utilizado un hormigón autocompactable para la ejecución de las pilas de un puente en la Ronda norte de Valencia.

La selección de materiales y criterios de dosificación se han centrado en conseguir las características de autocompactabilidad necesarias para la obra con la menor modificación posible de la estructura del hormigón colocado anteriormente en otras unidades de la misma obra. Con ello se consigue un comportamiento mecánico de acuerdo con las especificaciones previstas en la instrucción española.

Se ha analizado el empuje sobre el encofrado aceptando un programa de vertido lento para evitar esfuerzos excesivos.

Se ha planteado un procedimiento de recepción, aceptación / rechazo y de puesta en obra adaptada a las condiciones particulares. El criterio incluía una observación previa y durante el vertido de todos los suministros, y la posibilidad de readitivar cada camión en función de las observaciones realizadas.

Se ha conseguido un hormigón con escurrimiento de 540 ± 60 mm que se ha mostrado capaz de ser vertido por bombeo. Una vez adquirida una cierta experiencia, el suministro y aceptación de hormigón se ha desarrollado con pocas incidencias, y con un nivel de continuidad muy aceptable. El vertido no ha planteado dificultades especiales, y la colocación por medio de bomba ligeramente sumergida en el frente de avance de hormigonado ha demostrado ser adecuado, para un ascenso del hormigón con superficie prácticamente horizontal.

La presión sobre el encofrado ha demostrado ser importante generando alguna deformación en la madera cuando ésta se reutilizaba varias veces, pero no ha aparecido ninguna señal de deterioro en la estructura del encofrado.

El control de calidad de resistencias se ha realizado fabricando probetas que se llenaban por simple vertido, y que se picaban en una sola capa. Este sistema ha demostrado ser representativo del modo de vertido por bombeo.

Como consecuencia la experiencia ha demostrado ser viable, alcanzándose condiciones de puesta en obra adaptadas a las necesidades del elemento a construir, con calidades del hormigón acordes con las necesarias.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se exponen las principales conclusiones obtenidas a lo largo de la presente tesis y se indican posibles líneas de trabajo futuros.

9.1 CONCLUSIONES

SOBRE LA COMPOSICIÓN DE LOS HAC

Se ha analizado la influencia de los distintos componentes del hormigón en las propiedades de los HAC y los criterios y métodos para definir su composición. Algunas conclusiones en esta línea han sido:

La efectividad de los aditivos sobre distintas pastas de cemento y filler verificando que la demanda de aditivo por parte del cemento es mayor que la del filler. Este resultado se detecta sobre todo para mezclas filler – cemento en las que el contenido en cemento supera el 50 %. Además esta diferencia crece cuando la relación agua / finos es mayor.

Se ha diseñado modelos reducidos de ensayos para la caracterización de los hormigones autocompactantes (HAC) y su metodología para aplicar a hormigones de tamaño máximo 12 mm.

- Los métodos de ensayo propuestos han mostrado una correcta adaptación a los ensayos estándar y pueden utilizarse para estudios previos en laboratorio. La utilización de estos métodos permite trabajar directamente sobre hormigón con una exigencia de personal, materiales y instalaciones muy limitado, con el ahorro que representa. Estas condiciones permiten analizar un mayor número de variables.
- Se definieron los parámetros para caracterizar los HAC utilizando los ensayos reducidos propuestos. Se comprueba la necesidad de utilizar los resultados de forma conjunta para caracterizar un HAC puesto que un único parámetro puede llevarnos a conclusiones engañosas. Para ello se propone un parámetro que engloba varios resultados. Este parámetro viene dado por la expresión:

$$P = \frac{T_{20} \times T_v}{D_{Max}}$$

- El parámetro “P” es útil para clasificar los hormigones. Sin embargo cuando se produce la segregación los resultados pueden ser muy variables Este fenómeno no siempre es detectado por los ensayo propuestos. Por ello se debe verificar el riesgo de segregación por medio de la observación de la masa ensayada y de un ensayo específico. (Sedran 1999).
- En general los HAC fabricados con un alto contenido en finos exigen un tiempo de amasado mayor que los tradicionales para permitir que finos y aditivos desarrollen su efecto. Análisis en tiempos cortos pueden dar resultados engañosos ocultando tendencias a segregación o excesiva cohesión.

- La relación agua/finos en volumen, menores de $125 \mu\text{m}$ es el parámetro que mejor ha caracterizado a los HAC. Este debe estar comprendido en el intervalo de 0,80 a 0,95 para hormigones con áridos de tamaño máximo de 12 mm. Para los hormigones de tamaño máximo de 20 mm el intervalo suele ser mas amplio pudiendo llegar a 1.19.
- Las distintas fracciones de áridos finos tienen influencias diferentes en el comportamiento de los HAC. Los filleres reducen la tendencia a la segregación, y serán imprescindibles si el contenido en cemento es bajo (350 Kg/m^3 o menos), pero pueden ser innecesarios en caso contrario si la arena utilizada es fina.
- El carácter de un HAC puede verse modificado por pequeñas variaciones en su composición granulométrica. Deberá ajustarse a un huso muy estrecho para evitar riesgos de segregación o falta de fluidez.
- La curva de Bolomey puede ser una buena referencia para la dosificación de un HAC.
- El contenido en finos calizos menores de $63 \mu\text{m}$ con los que ha podido fabricarse HAC va desde apenas 86 kg (muy por debajo del límite de 175 propuesto por la EHE para hormigón tradicional) hasta 234, superando el límite comentado, pero incluso en estos casos por debajo de la propuesta de 250 kg que se incluye en el borrador del anexo sobre HAC de la futura EHE.
- Analizando el intervalo entre 0 y 4 mm se comprueba que en general el contenido en finos que pasan por el tamiz $63 \mu\text{m}$ supera el 10 %, pudiendo encontrar algunos muy por encima del valor máximo del huso granulométrico recomendado por la instrucción.

- Cuanto mayor sea la finura de la adición empleada en la fabricación de los HAC (filler o arenas correctoras) mayor será la posibilidad de utilizar cantidades elevadas de grava. Por ello pueden conseguirse dosificaciones muy variadas de HAC.

SOBRE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS ADITIVOS

- Se analizaron las pastas de cemento y filler utilizando el cono de Marsh y viscosímetro rotacional (Bohlin Visco 88 BV). Se concluye que la utilización del cono de Marsh como método para optimizar dosificaciones es válida por su bajo coste. El viscosímetro es una herramienta más potente pero con un mayor coste inmovilizado.
- Los resultados sugieren en general que la adsorción del aditivo es más importante cuando se utiliza el filler calizo y por lo tanto la efectividad del aditivo se ve disminuida.
- Se han detectado diferencias importantes entre los aditivos en cuanto a residuo sólido. Estas diferencias deben tenerse en cuenta a la hora de dosificar el hormigón una vez que este factor puede afectar de manera importante el precio final del producto. Se debe por tanto analizar los resultados en función del peso de residuo sólidos
- Respecto a los ensayos físico-químicos el método analítico FTIR no ha presentado suficiente resolución para detectar diferencias dentro del mismo grupo de aditivos.
- El análisis termogravimétrico ha detectado diferencias entre los aditivos de comportamiento diferente, mientras que se obtiene el mismo espectro con aditivos que presentan un comportamiento muy similar en los resultados del estudio de la viscosidad.
- Considerando los resultados obtenidos en este estudio, se puede concluir que la combinación del ensayo de residuo sólido y del análisis termogravimétrico pueden ser utilizados para controlar el suministro de aditivo.

- Dado el coste de estos ensayos se puede recomendar la conservación de una muestra del aditivo seleccionado para realizar los ensayo termogravimétricos y compararlos con los del suministro en caso de conflictos

SOBRE LA ADHERENCIA DE LOS HAC EN ARMADURAS ACTIVAS

- Los HAC y los HT equivalentes tienen una resistencia a compresión similar, pero la resistencia a tracción de los HAC ha sido superior.
- Las pérdidas de fuerza durante el destesado han sido siempre superiores en los HAC, especialmente en hormigones con contenidos en adiciones inertes grande. Esta respuesta ha sido atribuida a la mayor retracción del hormigón y se ha calculado su efecto a partir de la evolución de los deslizamientos en el extremo tensionado. Esto conduce a plantear mayores pérdidas de pretensado cuando se utilice HAC, con independencia de su nivel de resistencia.
- Los HAC fabricados con dosificaciones bajas de cemento muestran un comportamiento más dúctil en lo relativo al deslizamiento en el extremo libre durante el proceso de destesado. Sin embargo, tanto la longitud de transmisión como los deslizamientos finales en el extremo libre son similares para los HAC y los HT equivalentes.
- Cuando la dosificación en cemento es baja, la relación a/c es alta y en consecuencia la resistencia es baja las longitudes de anclaje son mayores para los HAC que para los hormigones tradicionales. Cuando la relación a/c disminuye estas diferencias desaparecen.
- Se ha detectado una gran influencia del tipo de aditivo en las características adherentes de las armaduras activas del hormigón. Esta influencia es muy superior a la producida por otros factores como, por ejemplo, el hecho de utilizar HT o HAC

SOBRE LA SENSIBILIDAD DE LOS HAC

- Los márgenes de error cometidos en plantas de hormigón preparado en lo relativo a la dosificación de materiales sólidos y aditivos, se adaptan o mejoran las tolerancias exigidas por los códigos, especialmente en cemento y aditivos.
- La influencia del cemento y del aditivo sería importante si la dispersión en su dosificación se ampliara a los márgenes permitidos.
- En los niveles de calidad de una buena central de hormigón preparado la influencia de los errores de pesadas de los materiales sólidos o aditivos en las propiedades de los HAC no presenta especial impotencia. Ampliar el estudio a márgenes de variación más reducidos sería conveniente para confirmar esta opinión.
- Los errores de pesaje en arenas y gravas no afectan a ninguna de las propiedades estudiadas.
- Únicamente la precisión en la dosificación de agua total o de finos parece plantear dudas en su precisión ya que pueden ser aportados por distintos componentes, y especialmente su presencia en los áridos no suele estar controlada con suficiente precisión.
- La precisión en la dosificación del agua es el factor fundamental en la robustez de un SCC. Sin embargo garantizar una tolerancia del $\pm 6\%$ en el contenido de agua total (el doble de la tolerancia normalmente exigida en los códigos) sería suficiente para conseguir un HAC con suficiente robustez, en los márgenes exigidos por el futuro anejo de la EHE o la guía EFNARC

- La sensibilidad a los errores varía para las distintas dosificaciones. La mejora de la estabilidad del Flujo de cono a base de añadir finos puede generar dosificaciones más sensibles en las propiedades relacionadas con la velocidad de movimiento (el Tv) especialmente en hormigones con tamaño máximo de árido de 20 mm. Este planteamiento puede llevar a dosificaciones aparentemente estables pero con riesgo de segregación por sedimentación y con pérdida de resistencia si se utilizan en elementos difíciles de hormigonar.
- Cuando se pretenda obtener hormigones más cohesivos es preferible optar por el uso de aditivos específicos, o por reducir el tamaño máximo del árido, pero siempre manteniendo una estructura granular adecuada, sin exceso de pasta o mortero.

SOBRE LA APLICACIÓN DEL HAC

- Se ha utilizado un hormigón autocompactable para la ejecución de las pilas de un puente en la Ronda norte de Valencia.
- La selección de materiales y criterios de dosificación se han centrado en conseguir las características de autocompactabilidad necesarias para la obra con la menor modificación posible de la estructura del hormigón colocado anteriormente en otras unidades de la misma obra. Con ello se consigue un comportamiento mecánico de acuerdo con las especificaciones previstas en la instrucción española.
- Se ha analizado el empuje sobre el encofrado aceptando un programa de vertido lento para evitar esfuerzos excesivos.
- Se ha planteado un procedimiento de recepción, aceptación / rechazo y de puesta en obra adaptada a las condiciones particulares. El criterio incluía una observación previa y durante el vertido de todos los suministros, y la posibilidad de readitivar cada camión en función de las observaciones realizadas.
- Se ha conseguido un hormigón con escurrimiento de 540 ± 60 mm que se ha mostrado capaz de ser vertido por bombeo. Una vez adquirida una cierta experiencia, el suministro y aceptación de hormigón se ha desarrollado con pocas incidencias, y con un nivel de continuidad muy aceptable. El vertido no ha planteado dificultades especiales, y la colocación por medio de bomba ligeramente sumergida en el frente de avance de hormigonado ha demostrado ser adecuado, para un ascenso del hormigón con superficie prácticamente horizontal.
- La presión sobre el encofrado ha demostrado ser importante generando alguna deformación en la madera cuando ésta se reutilizaba varias veces, pero no ha aparecido ninguna señal de deterioro en la estructura del encofrado.

- El control de calidad de resistencias se ha realizado fabricando probetas que se llenaban por simple vertido, y que se picaban en una sola capa. Este sistema ha demostrado ser representativo del modo de vertido por bombeo.
- Como consecuencia la experiencia ha demostrado ser viable, alcanzándose condiciones de puesta en obra adaptadas a las necesidades del elemento a construir, con calidades del hormigón acordes con las necesarias.
- Este tipo de experiencia muestran la importancia de adaptar las características del hormigón a la obra, y la posibilidad de achacar al HAC fracasos debidos a una mala adaptación.

9.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El estudio de los HAC es relativamente reciente y por ello no hay dudas de que existen muchos temas por investigar. Sin embargo su evolución científica ha sido potente e de alto nivel como queda reflejado en los congresos específicos realizados sobre la materia.

En el último congreso RILEM realizado en Ghent (Bélgica) en septiembre de 2007 se pudo observar, por un lado, una fuerte tendencia a investigar los HAC desde el punto de vista de su micro estructura y de su reología. Por otra parte más de 50% de los trabajos presentados en este congreso estaban relacionados con la fabricación, la ejecución y la durabilidad de los HAC lo que pone de manifiesto que su utilización presenta una tendencia creciente.

Pensando en el incremento de utilización de los HAC y en aplicarlos en situaciones cotidianas donde normalmente se utilizan hormigones convencionales sería interesante cubrir con mayor definición temas como la estabilidad y la robustez. En esta línea se pueden realizar estudios para:

- Confirmar la baja influencia de los errores en la dosificación de materiales sólidos, especialmente el cemento, sobre la sensibilidad de los HAC.
- Considerar la inclusión en las centrales de hormigón preparado sistemas de control de humedad de los áridos más ágiles y precisos que los actuales. Cualquier acción en este campo permitiría un importante avance en el empleo de los HAC.
- Plantear tipologías de HAC adaptados a diferentes aplicaciones con la idea de facilitar el empleo de los mismos y evitar fracasos que supone muchas veces una mala elección de objetivos.

BIBLIOGRAFIA

ACI Comité 237 "Self Compacting Concrete". ACI 237R-07

Alcantara, M: " Le beton auto plaçant arme"; Formation Doctorale de genie Civil, INSA TOLOUSE - Septembre 2001.

Ambroise, J., Pera, J., Rols, S. " Les Bétons Autonivelants". Annales du batiment et des travaux publics [37 – 41], 1997.

Ambrosie, J. y Pera, J.: "Propiedades del Concreto Autonivelante". Construcción y Tecnología, Instituto Mexicano del Cemento y de Concreto, A.C., 2001.

Assaad, J. J., Khayat, K. H., "Effect of Viscosity-Enhancing Admixtures on Formwork Pressure an Thixotropy of Self-Consolidating Concrete." ACI Materials Journal, Vol.103, N° 4, [280 – 287] – 2006

Assié, S., Escadeillas, G., Marchese, G., Waller, V., "Durability Properties of Low Resistance Self-Compacting Concrete." Magazine of Concrete Research, Vol. 58, N° 1, [1 – 7] – 2006

Arbeláez, C. A. J., "Análisis paramétrico de las variables que influyen en el comportamiento adherente de las armaduras pretensas en el hormigón". Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia – Abril de 2006

Baron, J., Lesage, R., "La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier" F. Rapport de recherche L.P.C. n° 64, décembre 1976.

Barrita, F., Bremner, T. W., Balcom, B., J., "Effects of Curing Temperature on Moisture Distribution, Drying and Water Absorption in Self-Compacting Concrete." Magazine of Concrete Research, Vol. 55, N° 6, [517 – 524] – 2003.

Bartos, P.J.M., Grauers, M., "Self-Compacting Concrete". Concrete , Vol. 33, N° 4, [9 – 13] - 1999

Bartos, P.J.M.: " Environment and Ergonomics ". Task 8.5 – Final Report of Task 8.5, Brite EuRam, Julio de 2000.

Bauer, L.A.Falcão: Materiais de Construção: 1. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1985.

Bennenk, H.W., "SCC and the New Era for the Precast concrete Industry." Proceedings of the First International RILEM Symposium [695 – 704] Sweden – 1999.

Bennenk, H. W., "SCC in the Daily Precast Concrete Practice" Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), N°6, [20 – 31] – 2002.

Bettencourt, A., R., Gonçalves, A., "A low Cost Self-Compacting Concrete." Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, [339 – 348], Tokyo – 2001.

Billberg, P., "Fine Mortar Rheology in Mix Design of SCC." Proceedings of the First International RILEM Symposium [47 – 58] Sweden – 1999.

Billberg, P., Petersson, O., Osterberg, T.: " Full Scale Casting of Bridges With Self-Compacting Concrete". Proceedings of the First International RILEM Symposium, [639 – 650], Sweden – 1999.

Billberg, P., "Thixotropy of Self-Compacting Concrete." Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, [99 – 108], Tokyo – 2001.

Billberg, P., "Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete." 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, [271 – 280], Iceland – 2003.

Bonen, D., Shah, S. P., "Fresh and Hardened Properties of Self-Consolidating Concrete." Prog. Struct. Engng Mater., N° 7, [14 – 26] – 2005.

Boström, L., "Polypropylene Fibres Improve the Fire Resistance of Self-Compacting Concrete." Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), N°1, [14 – 17] – 2004.

Botte, J., Burdin, J., Zermatten, M., "SCC Tunnel Applications: Cleuson Dixence Project and Loetschberg Basis Tunnel." Proceedings of the First International RILEM Symposium [681 – 693] Sweden – 1999.

Bouzoubaâ, N., Lachemi, M.: "Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F fly ash Preliminary Results". Cement and Concrete Research, N°31 [413 – 420], 2001.

Bramshuber, W., Uebachs, S., "Investigations on the Formwork Pressure Using Self-Compacting Concrete." 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, [281 – 287], Iceland – 2003.

Carracedo, J. Duce, J. M.: " Hormigón Autocompacto (H.A.C.) – Glenium. La última tecnología aplicada al hormigón de altas prestaciones". Hormigón Preparado n° 45, [52 – 58], 1999.

Carrasco, L. F., Vázquez, T., "Aplicación de la espectroscopia Infrarroja al Estudio de Cemento Aluminoso." Materiales de Construcción, Vol 46, N° 241, [53 – 64] – 1996.

Cavero, L., "El Hormigón Autocompactable en España: Oobra de El Portal en Jerez de la Frontera." *Hormigón Preparado*, N° 71, [56 – 62] - 2005

Chidiac, S. E., Habibbeigi, F., Chan, D., "Slump and Slum Flow for Characterizing Yiwld Stress of Fresh Concrete." *ACI Materials Journal*, Vol.103, N° 6, [413 – 418] – 2006.

Chopin, D., de Larrard, F., Cazacliu, B., "Why do HPC and SCC require a longer mixing time?" *Cement and Concrete Research* Vol 34, N° 12, [2237 – 2243] – 2004.

Comité Técnico de ANFAH, "Los Aditivos Ayudan en la Consecución de los Requisitos de la Nueva Instrucción EHE"; *Hormigón preparado* n°45, [37 – 50], 2000.

de la Cruz, C., "Desarrollo de hormigones autocompactables de resistencia media para aplicaciones estructurales"., Tesis doctoral – Universidad Politécnica de Catalunya – Barcelona – Julio 2006.

Cuevas, J.D.G.: "Utilizacion de los aditivos en el hormigon atocompactable". *Hormigón Preparado*, V.17, N° 59, [68 – 70], 2003.

Dehn, F., Holschemacher, K., Weisse, D., "Self-Compacting Concrete (SCC) Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour." *LACER*, N°5, [115 – 124] – 2000

Djelal, C., Vanhove, Y., Magnin, A., "Tribological Behaviour of Self-Compacting Concrete." *Cement and Concrete Research*, N° 34, [821 – 828] – 2004.

Domone, P., Chai, H.W., "Testing of Binders for High Performance Concrete." *Cement and Concrete Research* – Vol.27, N°8, [1141 – 1147], 1997.

Domone, P.: " The slump flow teste for High-Workability concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol.28, N°2, [177 – 182], 1998.

Domone, P. L., "A Review of the Hardened Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete." *Cement and Concrete Composites*, N° 29, [1 – 12] – 2007.

Edamatsu, Y., Nishida, N., Ouchi, M.: " A rational mix design method for self compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles." *Proceedings of the First International RILEM Symposium*, [309 – 320], Sweden – 1999.

Emborg, M., "Rheology Tests for Self-Compacting Concrete – How Useful are they for the Desing of Concrete Mix for Full Scale Production?." *Proceedings of the First International RILEM Symposium* [95 – 105] Sweden – 1999.

Emborg, M., Hedin, C., "Production of Self-Compacting Concrete for Civil Engineering – Case Studies." *Proceedings of the First International RILEM Symposium* [733 – 742] Sweden – 1999.

Emborg, M; "Mixing and transport" Brite EuRam Proposal Final reporte of Task 8.1–30/06/2000.

EFNARC; "Specification And Guidelines for Self-Compacting Concrete: Febrero 2002. HYPERLINK "http://www.enfrac.org" www.enfrac.org .

EHE – "Instrucción de Hormigón Estructural". Documento cero – Borrador 2007. Ministerio de fomento

Esping, O., "Methods for Characterisation of Fillers and Fines for Self-Compacting Concrete". 3rd Internacional Symposium on Self-Compacting Concrete, [208 – 219], Iceland – 2003.

The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. "Specification, Production and Use. Mayo 2005. www.efca.info / www.efnarc.org

Fernández, J., "El Hormigón Autocompactable." SIABE 05: Simposio Ibero-Americano Hormigón en las Estructuras. [651 – 657], Coimbra, julio 5-7, 2005.

Fernández, M., "Hormigón." Rugarte S.L, Madrid, 1989 – ISBN: 84-7493-125-8

Ferrais C. F., "Measurement of the Rheological Properties of High Performace Concrete:Satate of the Art Report". Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, V. 104, Nº 5, [461 – 478], 1999.

Ferraris, C., Obla, K. H., Hill, R., "The Influence of Mineral Admixtures on the Rheology of Cement Paste and Concrete." Cemente and Concrete Research, Nº 31, [245 – 255] – 2001.

Gettu, R., Agulló L., Barrangán, B., Gomes, P.C.C., Martín, M.A., Mora, J.: "Avances Recientes en la caracterización de Hormigones." Laboratório de Tecnologia de Estructuras, Universidad Politécnica de Catalunya.

Gettu, R., Agulló L. "Estado del Arte del Hormigón Autocompactable y su Caracterización" Informe C4745/1 - Depto. de Ing. de la Construcción – Universidad Politécnica de Catalunya. Abril 2003

Gomes, P.C.C., Getty, R., Roncero, J., Agulló,L.: "Estudo dos Fatores que Divergem a Dosagem de Saturação do Superplastificante da Argamassa e do Concreto a do Sistema Pasta." Engenharia, Ciencia e Tecnologia, nº16, [4 – 16], 2000.

Gomes, P.C.C., Gettu, R., Agulló, L., Bernad, C.: " Mixture Proportioning of High-Strength Self-Compacting Concrete. Using Simple Test Methods." 3º International Conference on High Performace Concrete, and performace and Quality of Concrete Structures. 1 – 4 october 2002.

Gomes, P.C.C.: "Diseño de Hormigones Autocompactables de Alta Resistencia. Procedimiento para su Dosificación y Métodos de Caracterización"; Hormigón Preparado, [30 – 42] enero 2002.

Gomes, P.C.C.: "Optimization and Characterization of High-Strength Self-Compacting Concrete." Tesis doctoral – Universidad Politécnic de Catalunya – Barcelona Septiembre 2002.

Gonnouni, M.: " Facteurs Influcnant L'adherence Acier-Beton Autoplacant ". Diplome D'études Aprofondies, Institut Narionale des Sciences Appliquees de Toulouse, Junio de 2000.

Grauers, M. "Rational Production and Impoved Working Enviromnment Through Using Self Compacting Concrete". Proposal nº BE96-3801 / contract nº: BRPR – CT96 – 0366.

Grunert, J. P., Strobach, C. P., Teutsch, M., "Pretessed Steelfiber-Reinforced SCC Beams Without Steel Reinforcement." Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), Nº 4, [50 – 55] – 2004.

Grünewald, S., " Performance-based design of Self-Compacting fibre reinforced concrete". These Doctoral, Diplom-Ingenieu – Technische Universiteit Darmstadt – Douitsland – 2004.

Grünewld, S., Walraven, J. C., "The Effect of Viscosity Agnes on the Characteristics of Self-Compacting Concrete". The fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, [9 – 16], Chicago, 2005.

Guettu, R., Garcia, T., Bernad, C., Colli, H., " Utilización de hormigón Autocompactable en elementos prefabricados". Cemento y Hormigón Nº 874, [58 – 67] – 04/2005.

Hauke, B., "Self-Compacting Concrete for Precast Concrete Products in Germany". Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, [633 – 642], Tokyo – 2001.

Hegger, J., Kommer, B., Görtz, S., Tigges, C., Drössler, C., "Prestressed Precst Beams made of Self-Compacting Concrete". Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), Nº8, [40 – 46] – 2003.

Heirman, G., Vandewalle, L., "The influence of fillers on the properties of Self-Compacting Concrete in fresh and hardened state". 3rd Internacional Symposium on Self-Compacting Concrete, [606 – 618], Iceland – 2003.

Ho, D.W.S., Sheinn, A.M.M., Ng, C.C., Tam, C.T.: "The use of quarry dust for SCC applications". Cement and Concrete Research – Vol 32, Nº4, [505-511], 2002.

Holschemacher, K, Wei e, D,: "Sand-Rich Self-Compacting Concrete Time Development of Bond Properties". PROCEEDINGS -Bond in Concrete – From research to standards [537 – 544] – Budapest – november 2002.

Hwang, C. L., Hung, M. F., "Durability Design and Performance of Self-consolidating Lightweight Concrete." Construction and Building Materials, Nº 19, [619 – 626] – 2005.

Hwang, S., Khayat, K. H., Bonneau, O., "Performance-Based Specifications of Self-Consolidating Concrete Used in Structural Applications." ACI Materials Journal, Vol. 103, N° 2, [121 – 129] – 2006.

Interim SCC Guidelines FAST Team, "Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants." Precast/Prestressed Concrete Institute, TR-6-03 – 2003.

Izquierdo, J.: "Hormigón Auto compactable" . Hormigón Preparado N° 49, [33 – 37], 2001.

Jose Maria Garcia San Martiil, Pere Borralleraz Mas; "Hormigón Auto compacto y Glenium: Un compromiso perfecto"; Hormigon preparado n°52 - Septiembre 2001.

Juvas, K., " Self Compacting Concrete – Developments in the precast industry". Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), N°8, [48 – 52] – 2004.

Kentucky Transportation Cabinet, "Precast/Prestressed Concrete Manual." Commonwealth of Kentucky Transportation Cabinet Department of Highways – 2005.

Khayat, K.: "Use of Viscosit-Modifying Admixture to Enhance Stability of Fluid Concrete." ACI Materials Journal, Vol. 94, n° 4, [332 – 340], 1997.

Khayat, K.: "Effect of Welan Gum-high-Range Water Reducer Combinations of Rheology of Cement Grout." ACI Materials Journal, Vol. 94, n° 4, [365 – 372], 1997.

Khayat, K.: "Workability, Testing and Performance of Self-Consolidating Concrete." ACI Materials Journal, Vol. 96, n° 4, [346 – 353], 1999.

Khayat, K.H., Daczki, J. A., "The holistic Approach to Self-Consolidating Concrete". Conference Proceedings: Frist North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete. – 12/2002.

Khrapko, M., "Development of SCC Containing Quarry Rock Dust." The fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, [203 – 210], Chicago, 2005.

Kling, B.: "Selbstverdichtender Beton." Technologie & Anwendung – Der Prufingenieur, n°17 – Octubre 2000

Kommer, B., "Bond anchorage behaviour of pretensioned tendons in High Performance Concrete". Proceedings of 5th International PhD Symposium in Civil Engineering, [833 – 840] – 2004.
ISBN 90 5809 676 9

de Larrard, "A method for Proportioning High-Strength Concrete Mixtures". Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP – Vol 12, N°2, [47 – 52] – 1990.

de Larrard, F: Concrete Mixture Proportioning. A scientific Approach. London: E & FN Spon. 1999.

Leemann, A., Hoffmann, C., "Pressure of Self-Compacting Concrete on the Formwork." 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, [288 – 295], Iceland – 2003.

Leemann, A., Hoffmann, C., "Pressure of Self-Compacting Concrete on the Formwork." Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), N°11, [48 – 55] – 2003.

López García, Víctor; Pacios Álvarez, Antonia; Galvache, Serrano; Gutiérrez Abascal, José; "Hormigones de Altas Prestaciones su uso en la Prefabricación".

Lorrain, M., Daud, A.: "Bond in Self-Compacting Concrete". PROCEEDINGS -Bond in Concrete – From research to standards, [529 – 536], Budapest – november 2002.

Ma, J., Dietz, J., "Ultra High Performance Self-Compacting Concrete." Lacer, N° 7, [33 – 42] – 2002.

Markovich, I., Grunewald, S., Walraven, J.C.: "Characterization of Bond Between Steel Fibres and Concrete – Conventional fibre Reinforced versus Self-Compacting Fibre Reinforced Concrete". PROCEEDINGS -Bond in Concrete – From research to standards, [520 – 528], Budapest – november 2002.

Martí, J. R., "Estudio experimental de la adherencia de cordones pretesos en horigones de altas prestaciones iniciales". Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia – Diciembre 2001

Miao, B., Chern, J. C., Yang, C. A., "Influences of Fiber Content on Properties of Self-Compacting Steel Fiber Reinforced Concrete." Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 26, N° 4, [523 – 530] – 2003.

Michael j. Champion, Philippe Jost; "Concreto autocompactante: avances en las posibilidades del diseño y el colado."; Construcción y tecnología, Mayo 2001.

Müller, H. S., Mechtcherine, V., Haist, M., "Development of Self-Compacting Concrete Lightweight Aggregate Concrete." Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, [737 – 742], Tokyo – 2001.

Nehdi, M., Rahman, M. A., "Estimating Rheological Properties of Cement Pastes Using Various Rheological Models for Different Test Geometry, Gap and Surface Friction." Cement and Concrete Research, N° 34, [1993 – 2007] – 2004.

Nielsson, I., Wallevik, O., "Rheological Ebaluation of some Empirical Test Methods – Preliminary Results." 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, [59 – 68], Iceland – 2003.

Nielsson, I., Wallevik, O., "Mix Desing of HS-SCC and Practical Application." 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, [506 – 513], Iceland – 2003.

Oh, S. G., Noguch, T., Tomosawa, F., " Toward Mix Design for Rheology of Self-Compacting Concrete." Proceedings of the First International RILEM Symposium, [361 – 372] – Sweden, 1999.

Ohtomo, T., Asaka, S., Kim, J. Y., Park, C. G., Beak, S. J., Jung, C. S., Tsutsumi, Y., "Self-Compacting Concrete Used for Underground Diaphragm Walls of the World's Largest 200.000 KL Inground Tanks at Inchon LNG Terminal in Korea." Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, [661 – 670], Tokyo – 2001.

Okamura, H., Ozawa, K. "Self-Compacting High Performance Concrete"; Structural Engineering International, N°4, [269 – 270], 1996.

Okamura, H.: "Self-Compacting. High-Performance Concrete". Concrete International, Vol.19, N° 7, [50-54], 1997.

Okamura, H., Ouchi, M.: "Self-Compacting Concrete Development, Present and Future". Proceedings of the First International RILEM Symposium [3 – 14] Sweden – 1999.

Okamura, H., Ozawa, K., Ouchi, M.: "Self-Compacting Concrete." Structural Concrete, V.1, N°1, [3 – 17], 2000.

Okamura, H., "Self-Compacting Concrete". Journal of Advanced Concrete Technology – Vol 1, N° 5, [5 – 15], 2003.

Ouchi, M., Edamatsu, Y., "A Simple Evaluation Method for Interaction Between Coarse Aggregate and Mortar Particles in Self-Compacting Concrete". Proceedings of the First International RILEM Symposium, [121 – 130], Sweden – 1999.

Ouchi, M., Nakamura, S., Osterberg, T., Hallberg, S., "Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, Europe and United States". U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration – ISHPC – 2003.

Ozawa, K., Maekawa, K., Kunishima, M., Okamura, H.: "High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures." The Second East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, [445 – 450], 1989.

Ozawa, K., Maekawa, K., Okamura, H., "High Performance Concrete With High Filling Capacity." Proceedings of the International RILEM Symposium – Admixtures for Concrete Improvement of Properties, [51 – 62] – Barcelona – 1990.

Ozyilkirim, C., Lane, S., "Final Report: Evaluation of Self-Consolidating Concrete." Virginia Transportation Research Council – VTRC 03-R13 – June – 2003.

Papo, A., Piani, L., "Effect of Various Superplasticizers on the Rheological Properties of Portland Cement Pastes". Cement and Concrete Research Vol 34, N° 11, [2097 – 2101] – 2004.

Peris, E., Payá J., Monzó, J.: "Estudio sobre cenizas volantes: Separación balística de una ceniza volante." Materiales de Construcción, V.41, N° 223, [29 – 40], 1991.

Peris, E., Payá, J., Monzó, J.: "Influence of Different Sized Fractions of a Fly Ash on Workability of Mortars." Cement and Concrete Research, V.23, [917 – 924], 1993.

Persson, B.: "A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and de corresponding properties of normal concrete"; Cement and Concrete Research, V.31, [193 – 198], 2000.

Petersson, O., Billberg, P. “ A model for Self Compacting Concrete”. RILEM Conference Production Methods an workabiliy of concrete, Scotland – 1996.

Petersson, O., Bilberg, P.: “Investigation on Blocking of Self-Compacting Concrete with Different Maximum Agrégate Size and use of Viscosity Agent Intead of Filler.” Proceedings of the First International RILEM Symposium, [333 – 344], Sweden – 1999.

Petersson, O., Gibbis, J., Bartos, P., “Testing-SCC: A European Project.” 3rd Internacional Symposium on Self-Compacting Concrete, [299 – 304], Iceland – 2003.

Pintado, X., Barragán, B., Bravo, M.,Gettu, R., Rodríguez, R., García, J., “Development and application of High-Strength Self-Compacting Concrete.” The fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, [1155 – 1160], Chicago, 2005.

Puertas, F., Alonso, M^a del Mar, Vázquez, T.: “Efecto de un Aditivo Basado en Policarboxilatos Sobre la Reología y el Fraguado de Pastas de Cemento Pórtland.” Cemento y Hormigón, N° 844, [4 – 12], 2002.

Puerta Gutiérrez, F. “ El Hormigón Autocompactable del arco mixto del puente de la Ronda de la Hispanidad sobre el rio Ebro en Zaragoza”. Cemento Hormigón N° 848 [46 – 61]abril 2003.

Ramsburg, P., Neal, R. E., “The Use of a Natural Pozzolan to Enhance the Properties of Self-Consolidating Concrete.” Proceedings of First North American Conference on de Design and Use of Self-Consolidating Concrete. [1 – 7] – Rosemount, IL 2002.

Ramsburg, P., “The SCC Test: Inverted or Upright?” The Concrete Producer, [1 – 5] – July 2003.

Reihardt, H. W., Stegmaier, M., “Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of SCC.” Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT), N° 5, [34 – 45] – 2005.

Reinhardt, H. W., Stegmaier, M., “Self-Consolidating Concrete in Fire.” ACI Materials Journal, Vol. 103, N° 2, [130 – 135] – 2006.

Roncero, J., Martín, M.A., Gettu, R., Servós, F., Godes, A.: “ Stud of the effect of shrinkage reducing and internal curing admixtures on the microstructure and drying shrinkage of concrete. 3° International Conference on High Performace Concrete, and performace and Quality of Concrete Structures. 1 – 4 october 2002.

Sahmaran, M., Yaman, I. O., “Irbid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete UIT a High Volume Coarse Fly Ash.” Construction and Building Materials, N° 21, [150 – 156] – 2007.

Sari, M., Prat, E., Labastire, J.F.: "High strength self-compacting concrete: Original solutions associating organic and inorganic admixtures"; Cement and Concrete Research. N°29, [813 – 818], 1999.

Schindler, A. K., Barnes, R. W., Roberts, J. B., Rodriguez, S., "Properties of Self-Consolidating Concrete for Prestressed Members." ACI Materials Journal, Vol. 104, N° 1, [53 – 61] – 2007.

Sedran, T., de Larrard, F., "Mix Design of Self Compacting Concrete (SCC)". RILEM conference: Production Methods and Workability of Concrete. Glasgow – 1996.

Sedran, T., de Larrard, F., "RENÉ-LCPC: Software to Optimize the Mix Sesi3n of High Performance Concrete". 4th Internacional Symposium on Utilization of High Strength/high Performance Concrete, [169 – 178], Paris – 1996.

Sedran, T., Larrard, F. de, " Optimization of Self Compacting Concrete Thanks to Packing Model" Self-Compacting Concrete - Proceedings of the First International RILEM Symposium, [321 – 332], Sweden – 1999.

Sedran, T., " Rheologie et Rheometrie des Betons. Application aux Betons Autonivelants "These Doctoral, Docteur de L'ecole nationale des Ponts et Chaussees – Francia – 1999.

Shadle, R., Somerville, S., "The benefits of Utilizing Fly Ash in Producing Self-Consolidating Concrete (SCC)." Proceedings of First North American Conference on de Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Rosemount, IL 2002.

Skarendahl, A., Petersson, O.: Self-Compacting Concrete: Satate of the Art report of RILEM Technical Committee 174 SCC. France: RILEM Publications S.A.R.L. 2000.

Skarendahl, A.: " Aceptaci3n en el Mercado del Hormig3n Autocompactable. La Experiencia Sueca." Cemento Hormig3n, N° 840, [38 – 48], Septiembre – 2002.

Soen, H., "Application of SCC for In-situ Concrete" Lecture Stufib, May 2001.

Sonebi, M., Bartos, P.J.M., Zhu W., Gibbs, J., Tamimi, A.: " Properties of Hardened Concrete ". Task 4 – Final Report. Brite EuRam Proposal n°. BE96-3801, Mayo de 2000.

Sonebi, M., Bartos, P.J.M.: "Bond Behaviour and Pull-off Test of Self-Compacting Concrete." PROCEEDINGS -Bond in Concrete – From research to standards [511 – 519] – Budapest – november 2002.

de Souza Coutinho, A.: Fabrico y propiedades do Beato: Volume II. Lisboa: Laboratorio Nacional de Engenharia Civil. 1997.

Spengler, A., Schiesll, P., "Sand-Rich Self-Compacting Concrete". Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, [387 – 392], Tokyo, 2001.

Stark, J., Kirmse, J., Friebert, M., Wesser, D., “Self-Compacting Concrete Components of High Durability for use in Civil Engineering and Environmental Protection.” *Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT)*, N°5, [46 – 57] – 2002.

Su, N., Hsu, K. C., Chai, H. W., “A Simple Mix Design Method for Self-Compacting Concrete.” *Cement and Concrete Research*, N°31, [1799 – 1807] – 2001.

Swedish Concrete Association’s committee, “Self-Compacting Concrete, recommendations for use.” Swedish Concrete Association’s report series, report N° 10(E), Sweden – 2002.

Tejeda, F., Lange, D. A., D’ambrosia, M. D., “Formwork Pressure of Self-Consolidating Concrete (SCC) in Tall Wall Field Applicatons.” *TRB Annual Meeting* – 2005.

Trägårdh, J., “Microstructural Features and Related Properties of Self-Compacting Concrete.” *Proceedings of the First International RILEM Symposium* [175 – 186] Sweden – 1999.

UNE-EN 196-1:2005. Método de ensayo de cementos: Parte 1. Determinación de Resistencia mecánicas.

UNE-EN 455:1996. Lechadas para tendones de pretensado: Métodos de ensayo.

UNE-EN 480-8:1997. Aditivos para hormigones, morteros y pastas: Métodos de ensayo. Parte 8: Determinación del extracto seco convencional.

UNE-EN 933-1:1998. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos: Parte 1. Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.

UNE 7142:58. Determinación de la exudación de agua en el hormigón.

UNE EN 12350-1:2006 “Ensayos de hormigón fresco – Parte 1: Toma de muestras

UNE EN 12350-2:2006 “Ensayos de hormigón fresco – Parte 2: Ensayo de asentamiento”.

UNE-EN 12390-2:2001 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.”

UNE EN 12390-3:2003 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas”.

UNE-EN 12390-6:2001. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas

UNE-EN 12390-8:2001. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión.

UNE 36094-97 Alambres y cordones de acero para armaduras de hormigón pretensado.

UNE 80-122-91. Métodos de ensayo de cementos: Determinación de la finura. Octubre 1991.

UNE 83-133-90. Áridos para hormigones: Determinación de las densidades, coeficiente de absorción y contenido en agua del árido fino. Mayo 1990.

UNE 83-134-90. Áridos para hormigones: Determinación de las densidades, porosidad, coeficiente de absorción y contenido en agua del árido grueso. Mayo 1990.

UNE 83361:2007 “Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez. Ensayo del escurrimiento”

UNE 83362:2007) “Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Ensayo del Anillo japonés”.

UNE 83363:2007 “Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Método de la caja en L”

UNE 83364:2007 “Hormigón autocompactante. Determinación del tiempo de flujo. Ensayo del embudo en V”.

UNE 83811:1992 EX “Morteros. Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la consistencia. Mesa de sacudidas (método de referencia)”

Valcuende, M. O., Parra, C., Benloch, J., “Permeabilidad, Porosidad y Resistencia a Compresión de Hormigones Autocompactables.” *Materiales de Construcción*, Vol. 55, Nº 280, [17 – 26] – 2005.

Vanhove, Y., Djelal, C., Magnin, A., Martin, D., “Study of Self-Compacting Concrete Pressure on Formwork.” *Proceedingd of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, [585 – 594]. Tokyo – 2001 – ISBN 4-901514-04-0 C3051.

Vanhove, Y., Djelal, C., Magnin, A., “Prediction of the lateral pressure exerted by Self-Compacting Concrete on Formwork.” *Magazine of Concrete Research*, Vol. 56, Nº 1, [55 – 62] – 2004.

Velásquez, S., “Aplicaciones del Catalizador de Craqueo Catalítico Usado (FCC) en la preparación de conglomerantes hidráulicos. Estudio de sus propiedades puzolánicas.” Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia 2002.

Wallevik, O.H., “Rheology – A Scientific Approach to Develop Self-Compacting Concrete”. 3rd *Internacional Symposium on Self-Compacting Concrete*, [23 – 31], Iceland – 2003.

Wallevik, O. H., “¿Por qué es tan Diferente el Hormigón Autocompactante en Algunos Países?” *Planta de Hormigón Internacional*, Nº 2, [30 – 36], Abril 2006, ISSN 1862-0027.

Walraven, J., “ State of the art on Self Compacting Concrete in the Netherlands”. Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, [13 – 24], Tokyo – 2001.

Wetzig, V., “SCC for Tunnel-Lining.” Proceedings of the First International RILEM Symposium [669 – 680] Sweden – 1999.

Xie, Y., Liu, B., Yin, J., Zhoy, S.: “Optimum mix parameters of high-Strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash.”. Cement and Concrete Research, Vol 32, N°3, [477 – 480], 2002.

Yasuda, M., Furuya, N., Hata, K., “Anchorages and Toser of the Akashi-Kaikyo Bridge, Japan.” Structural Engineering International, Vol. 3, N° 4, [220 – 222], 1993.

Zerbino, R., Agulló, L., Barragán, B., García, T., Guettu, R., “Caracterización Reológica de Hormigones Autocompactables.” Departamento de Ingeniería de la Construcción – Universidad Politécnica de Catalunya – Barcelona – 2006 – ISBN 84-87691-40-4.

Zhu, W., Bartos, P.J.M.: “Micromechanical Properties of Interfacial Bond in Self-Compacting Concrete”. PROCEEDINGS -Bond in Concrete – From research to standards, [387 – 394], Budapest – november 2002.

ANEXO I

ENSAYOS REDUCIDOS DOSIFICACIONES Y RESULTADOS

DOSIFICACIÓN EN Kg/m ³									Resultados			
Ae/C	Ae/FINOS	Aditivo %	Cemento	Agua efectiva	Grava (7/12 mm)	Arena (0/4 mm)	Finos añadido		T20 (s)	Embudo V (s)	d max (mm)	Parámetro P
							Filler	Arena (0/2 mm)				
0.39	0.75	2	500	195	921	521	0	229	6	44	320	0.83
0.39	0.75	2	500	195	921	521	57	172	12	15	300	0.60
0.39	0.75	2	500	195	921	521	114	114	13	11	285	0.50
0.39	0.75	2	500	195	921	521	172	57	25	14	255	1.37
0.39	0.75	2	500	195	921	521	229	0	100	100	100	100.00
0.51	0.75	2	500	255	852	218	437	0	100	7	210	3.33
0.40	0.77	2	500	200	915	514	229	0	100	38	210	18.10
0.43	0.83	2	500	215	898	491	230	0	35	16	270	2.07
0.50	0.77	2	400	200	915	514	309	0	100	100	100	100.00
0.54	0.83	2	400	215	898	491	309	0	100	12	220	5.45
0.40	1.00	2	500	200	915	674	76	0	24	16	290	1.32
0.40	0.87	2	500	200	915	594	152	0	32	21	270	2.49
0.43	0.93	2	500	215	898	571	153	0	15	12	310	0.58
0.43	1.08	2	500	215	898	651	76	0	11	11	330	0.37
0.50	1.00	2	400	200	915	674	155	0	17	13	290	0.76
0.50	0.87	2	400	200	915	594	232	0	100	19	230	8.26
0.54	0.93	2	400	215	898	571	232	0	7	7	350	0.14
0.54	1.08	2	400	215	898	651	156	0	3	10	330	0.09
0.67	1.00	2	300	200	915	674	234	0	100	19	235	8.09
0.72	0.93	2	300	215	898	571	312	0	100	100	100	100.00
0.72	1.08	2	300	215	898	651	235	0	10	10	290	0.34
0.54	0.93	2	400	215	898	571	232	0	17	8	280	0.49
0.54	0.93	2	400	215	898	571	174	58	12	7	310	0.27
0.54	0.93	2	400	215	898	571	116	116	9	21	350	0.54
0.54	0.93	2	400	215	898	571	232	0	100	13	220	5.91
0.54	0.93	2	400	215	898	571	174	58	14	8	280	0.40
0.54	0.93	2	400	215	898	571	116	116	10	10	310	0.32
0.54	0.93	1	400	215	898	571	174	58	100	100	100	100.00
0.54	0.93	1	400	215	898	571	116	116	7	10	245	0.29
0.54	0.93	1	400	215	898	571	58	174	8	7	275	0.20
0.54	0.93	1	400	215	898	571	0	232	3	10	310	0.10
0.47	0.93	2	400	215	898	571	58	174	8	37	280	1.06
0.45	1.36	2	400	180	938	884	0	0	57	27	270	5.70
0.45	1.20	2	400	180	938	837	26	0	100	69	240	28.75
0.48	1.27	2	400	190	927	822	26	0	100	32	240	13.33
0.49	0.87	2	400	195	740	620	170	170	8	14	250	0.45
0.50	0.89	2	400	200	740	620	170	170	8	16	260	0.49
0.51	0.91	2	400	205	740	620	170	170	4	9	288	0.13
0.46	0.82	2	400	185	740	620	170	170	26	51	210	6.31
0.48	0.86	2	400	190	770	645	160	160	13	35	225	2.02
0.48	0.88	2	400	190	781	659	150	150	10	21	255	0.82
0.48	0.90	2	400	190	792	664	140	140	8	22	245	0.72
0.48	0.92	2	400	190	801	673	130	130	10	27	255	1.06
0.48	0.95	2	400	190	812	682	120	120	9	18	260	0.62
0.48	0.97	2	400	190	823	691	110	110	8	24	250	0.77
0.48	0.99	2	400	190	834	701	100	100	5	35	260	0.67
0.48	1.05	2	400	190	857	720	80	80	7	55	263	1.47
0.45	0.82	2	400	180	770	645	160	160	100	48	180	26.67
0.45	0.84	2	400	180	781	659	150	150	22	28	208	2.97
0.45	0.85	2	400	180	792	664	140	140	18	27	210	2.31
0.45	0.87	2	400	180	801	673	130	130	23	32	205	3.59
0.45	0.90	2	400	180	812	682	120	120	11	27	240	1.24
0.45	0.92	2	400	180	823	691	110	110	9	40	245	1.47
0.45	0.94	2	400	180	834	701	100	100	11	44	260	1.86
0.45	0.99	2	400	180	857	720	80	80	7	39	268	1.02
0.45	0.80	2	400	180	770	645	170	170	100	146	160	91.25
0.43	0.83	2	400	170	801	673	130	130	100	100	130	76.92
0.43	0.85	2	400	170	812	682	120	120	100	74	170	43.53
0.43	0.87	2	400	170	823	691	110	110	100	84	180	46.67
0.43	0.89	2	400	170	834	701	100	100	34	62	205	10.28
0.43	0.94	2	400	170	857	720	80	80	40	165	220	30.00
0.50	0.91	2	400	200	770	645	160	160	7	10	260	0.27
0.50	0.93	2	400	200	781	659	150	150	5	8	270	0.15
0.50	0.95	2	400	200	792	664	140	140	4	8	275	0.12
0.50	0.97	2	400	200	801	673	130	130	4	10	288	0.14
0.50	1.00	2	400	200	812	682	120	120	4	10	268	0.15
0.50	1.02	2	400	200	823	691	110	110	4	20	275	0.29

DOSIFICACIÓN EN Kg/m ³									Resultados			
Ae/C	Ae/FINOS	Aditivo %	Cemento	Agua efectiva	Grava (7/12 mm)	Arena (0/4 mm)	Finos añadido		T20 (s)	Embudo V (s)	d max (mm)	Parámetro P
							Filler	Arena (0/2 mm)				
0.48	0.86	2	400	190	664	746	160	160	12	15	220	0.82
0.48	0.88	2	400	190	676	760	150	150	7	11	245	0.31
0.48	0.90	2	400	190	683	768	140	140	6	12	240	0.30
0.48	0.92	2	400	190	692	778	130	130	8	11	248	0.36
0.48	0.94	2	400	190	701	788	120	120	7	9	250	0.25
0.48	0.96	2	400	190	711	799	110	110	5	8	258	0.16
0.48	0.99	2	400	190	720	810	100	100	5	10	250	0.20
0.48	0.84	2	400	190	653	736	170	170	27	23	203	3.07
0.48	0.84	2	400	190	653	736	170	170	100	24	183	13.15
0.48	0.86	2	400	190	664	746	160	160	10	17	220	0.77
0.48	0.88	2	400	190	676	760	150	150	10	21	210	1.00
0.48	0.90	2	400	190	683	768	140	140	7	11	235	0.33
0.48	0.92	2	400	190	692	778	130	130	13	19	215	1.15
0.48	0.94	2	400	190	701	788	120	120	5	19	270	0.35
0.48	0.96	2	400	190	711	799	110	110	10	24	245	0.98
0.48	0.99	2	400	190	720	810	100	100	9	65	248	2.36
0.50	0.88	2	400	200	664	746	170	170	15	18	203	1.33
0.50	0.90	2	400	200	664	746	160	160	5	8	265	0.15
0.50	0.92	2	400	200	676	760	150	150	5	7	273	0.13
0.50	0.95	2	400	200	683	768	140	140	5	7	268	0.13
0.50	0.97	2	400	200	692	778	130	130	4	8	270	0.12
0.50	0.99	2	400	200	701	788	120	120	4	4	283	0.06
0.50	1.01	2	400	200	711	799	110	110	3	15	285	0.16
0.50	1.04	2	400	200	720	810	100	100	4	19	285	0.27
0.45	0.82	2	400	180	690	776	160	130	100	100	128	78.43
0.45	0.87	2	400	180	704	792	130	130	100	34	163	20.92
0.45	0.92	2	400	180	719	808	100	130	22	25	205	2.68
0.45	0.98	2	400	180	733	824	70	130	16	17	220	1.24
0.45	1.05	2	400	180	747	840	40	130	11	22	243	1.00
0.45	1.15	2	400	180	767	862	0	130	11	56	233	2.65
0.48	0.87	2	400	190	690	776	160	130	25	21	200	2.63
0.48	0.92	2	400	190	704	792	130	130	9	11	230	0.43
0.48	0.97	2	400	190	719	808	100	130	9	12	250	0.43
0.48	1.04	2	400	190	733	824	70	130	5	20	275	0.36
0.48	1.11	2	400	190	747	840	40	130	4	15	255	0.24
0.48	1.22	2	400	190	767	862	0	130	6	48	265	1.09
0.48	0.92	2	400	190	704	792	130	130	7	11	245	0.31
0.48	0.92	2	400	190	704	792	130	130	5	10	250	0.20
0.48	0.92	2	400	190	704	792	130	130	6	10	248	0.24
0.48	0.92	2	400	190	704	792	130	130	6	8	250	0.19
0.48	0.92	2	400	190	704	792	130	130	8	13	228	0.46
0.48	0.92	2	400	190	704	792	130	130	7	11	248	0.31
0.48	0.91	2	400	190	690	776	130	160	9	10	240	0.38
0.48	0.92	2	400	190	704	792	130	130	9	12	240	0.45
0.48	0.93	2	400	190	719	808	130	100	8	9	245	0.29
0.48	0.94	2	400	190	733	824	130	70	9	12	238	0.45
0.48	0.96	2	400	190	747	840	130	40	7	12	248	0.34
0.48	0.97	2	400	190	767	862	130	0	8	18	238	0.61
0.51	0.80	2	350	180	668	751	220	130	100	33	138	24.00
0.51	0.84	2	350	180	683	768	190	130	12	13	200	0.78
0.51	0.89	2	350	180	697	784	160	130	12	11	223	0.59
0.51	0.94	2	350	180	711	800	130	130	8	8	253	0.25
0.51	1.00	2	350	180	726	816	100	130	5	11	258	0.21
0.54	0.80	2	350	190	654	735	250	130	100	22	120	18.33
0.54	0.84	2	350	190	668	751	220	130	25	14	200	1.75
0.54	0.89	2	350	190	683	768	190	130	8	11	228	0.39
0.54	0.94	2	350	190	697	784	160	130	5	7	253	0.14
0.54	0.99	2	350	190	711	800	130	130	4	7	263	0.11
0.54	1.06	2	350	190	726	816	100	130	4	10	265	0.15
0.51	0.89	2	350	180	757	851	190	0	100	100	115	86.96
0.51	0.94	2	350	180	771	867	160	0	11	23	215	1.18
0.51	1.00	2	350	180	786	883	130	0	10	31	235	1.32
0.54	0.89	2	350	190	731	821	220	0	100	12	170	7.06
0.54	0.94	2	350	190	745	838	190	0	12	13	208	0.75
0.54	0.99	2	350	190	759	854	160	0	4	13	260	0.20
0.36	1.03	2	500	180	791	889	0	0	4	28	275	0.41
0.36	0.92	2	500	180	767	862	50	0	5	18	275	0.33

DOSIFICACIÓN EN Kg/m ³									Resultados			
Ae/C	Ae/FINOS	Aditivo %	Cemento	Agua efectiva	Grava (7/12 mm)	Arena (0/4 mm)	Finos añadido		T20 (s)	Embudo V (s)	d max (mm)	Parámetro P
							Filler	Arena (0/2 mm)				
0.48	0.86	2	400	190	664	746	160	160	12	15	220	0.82
0.36	0.77	2	500	180	719	808	150	0	100	16	185	8.65
0.36	1.00	2	500	180	767	862	0	50	5	27	270	0.50
0.36	0.98	2	500	180	743	835	0	100	4	9	260	0.14
0.36	0.95	2	500	180	719	808	0	150	5	9	263	0.17
0.36	0.93	2	500	180	695	782	0	200	5	8	275	0.15
0.34	0.97	2	500	170	791	889	0	0	16	80	250	5.12
0.34	0.87	2	500	170	767	862	50	0	18	169	210	14.49
0.34	0.79	2	500	170	743	835	100	0	100	100	185	54.05
0.34	0.73	2	500	170	719	808	150	0	100	100	90	111.11
0.34	0.94	2	500	170	767	862	0	50	17	88	240	6.23
0.34	0.92	2	500	170	743	835	0	100	12	56	245	2.74
0.34	0.90	2	500	170	719	808	0	150	16	32	235	2.18
0.34	0.88	2	500	170	695	782	0	200	19	37	245	2.87
0.36	0.84	2	500	180	743	835	100	0	5	24	275	0.44
0.36	0.93	1	500	180	695	782	0	200	9	16	220	0.65
0.36	0.93	2	500	180	695	782	0	200	3	21	290	0.22
0.51	0.89	2	350	180	697	784	160	130	100	21	178	11.83
0.45	0.88	2	400	180	995	513	130	130	5	22	275	0.40
0.45	0.88	2	400	180	919	587	130	130	5	22	270	0.41
0.45	0.87	2	400	180	842	660	130	130	5	13	265	0.25
0.45	0.87	2	400	180	766	733	130	130	6	9	255	0.21
0.45	0.87	2	400	180	689	807	130	130	8	10	240	0.33
0.45	0.87	2	400	180	613	880	130	130	9	10	225	0.40
0.45	0.86	2	400	180	536	953	130	130	100	13	190	6.84
0.52	0.92	2	350	182	995	513	150	150	7	37	255	1.02
0.52	0.91	2	350	182	919	587	150	150	4	17	280	0.24
0.52	0.91	2	350	182	842	660	150	150	6	8	255	0.19
0.52	0.91	2	350	182	766	733	150	150	5	7	260	0.13
0.52	0.90	2	350	182	689	806	150	150	6	8	255	0.19
0.52	0.90	2	350	182	612	880	150	150	12	9	245	0.44
0.52	0.90	2	350	182	536	953	150	150	15	9	275	0.49
0.51	1.38	2	350	180	838	943	0	20	2	9	275	0.07
0.51	1.36	2	350	180	829	932	0	40	2	12	285	0.08
0.51	1.34	2	350	180	819	921	0	60	2	13	260	0.10
0.51	1.32	2	350	180	809	910	0	80	3	24	305	0.24
0.51	1.30	2	350	180	800	900	0	100	5	22	245	0.45
0.51	1.31	2	350	180	838	943	20	0	3	15	255	0.18
0.51	1.24	2	350	180	829	932	40	0	3	16	260	0.18
0.51	1.18	2	350	180	819	921	60	0	4	19	260	0.29
0.51	1.12	2	350	180	809	910	80	0	3	21	255	0.25
0.51	1.07	2	350	180	800	900	100	0	4	12	250	0.19
0.45	1.23	2	400	180	816	919	0	20	8	20	235	0.68
0.45	1.22	2	400	180	806	909	0	40	5	19	250	0.38
0.45	1.20	2	400	180	797	898	0	60	6	18	260	0.42
0.45	1.19	2	400	180	787	887	0	80	5	21	265	0.40
0.45	1.17	2	400	180	778	876	0	100	4	16	265	0.24
0.45	1.18	2	400	180	816	919	20	0	5	17	265	0.32
0.45	1.12	2	400	180	806	909	40	0	4	17	270	0.25
0.45	1.07	2	400	180	797	898	60	0	4	17	265	0.26
0.45	1.02	2	400	180	787	887	80	0	4	13	270	0.19
0.45	0.98	2	400	180	778	876	100	0	5	11	270	0.20
0.51	0.89	2	350	180	740	833	150	150	5	10	270	0.19
0.50	0.87	2	350	175	734	826	150	150	8	12	260	0.37
0.49	0.84	2	350	170	716	806	150	150	11	18	245	0.81
0.47	0.82	2	350	165	722	812	150	150	25	20	210	2.38
0.46	0.79	2	350	160	728	819	150	150	100	33	155	21.29
0.44	0.85	2	400	175	704	792	130	130	4	11	265	0.17
0.43	0.82	2	400	170	704	792	130	130	9	14	240	0.53
0.41	0.80	2	400	165	704	792	130	130	16	19	220	1.38
0.40	0.77	2	400	160	704	792	130	130	100	31	160	19.38
0.44	0.85	2	400	175	757	854	160	0	6	14	270	0.31
0.43	0.82	2	400	170	763	860	160	0	8	16	250	0.51
0.41	0.80	2	400	165	769	867	160	0	17	25	220	1.93
0.40	0.77	2	400	160	775	874	160	0	100	41	180	22.78
0.35	0.82	2	500	175	748	843	100	0	5	17	273	0.31
0.34	0.79	2	500	170	754	850	100	0	6	18	255	0.42

DOSIFICACIÓN EN Kg/m ³									Resultados			
Ae/C	Ae/FINOS	Aditivo %	Cemento	Agua efectiva	Grava (7/12 mm)	Arena (0/4 mm)	Finos añadido		T20 (s)	Embudo V (s)	d max (mm)	Parámetro P
							Filler	Arena (0/2 mm)				
0.33	0.77	2	500	165	760	856	100	0	11	25	248	1.11
0.32	0.74	2	500	160	766	863	100	0	17	34	233	2.49
0.31	0.72	2	500	155	772	870	100	0	100	142	140	101.43
0.35	0.86	2	500	175	653	735	0	300	9	16	265	0.54
0.34	0.84	2	500	170	659	742	0	300	9	20	270	0.67
0.33	0.81	2	500	165	665	749	0	300	12	33	265	1.49
0.32	0.79	2	500	160	670	755	0	300	19	34	250	2.58
0.31	0.76	2	500	155	676	762	0	300	41	57	240	9.74
0.35	0.82	2	500	175	719	811	80	80	4	8	310	0.10
0.34	0.79	2	500	170	725	817	80	80	5	12	300	0.20
0.33	0.77	2	500	165	731	824	80	80	5	15	280	0.27
0.32	0.75	2	500	160	737	831	80	80	7	18	280	0.45
0.31	0.72	2	500	155	743	838	80	80	12	22	260	1.02
0.51	0.89	2	350	180	740	833	150	150	4	10	270	0.15
0.51	0.89	2	350	180	740	833	150	150	6	11	270	0.24
0.51	0.89	2	350	180	740	833	150	150	5	10	260	0.19
0.51	0.89	2	350	180	740	833	150	150	6	10	260	0.23
0.51	0.89	2	350	180	740	833	150	150	100	18	175	10.29
0.45	0.87	2	400	180	704	792	130	130	3	10	290	0.10
0.45	0.87	2	400	180	704	792	130	130	4	9	280	0.13
0.45	0.87	2	400	180	704	792	130	130	3	9	290	0.09
0.45	0.87	2	400	180	704	792	130	130	4	7	270	0.10
0.45	0.87	2	400	180	704	792	130	130	4	8	270	0.12
0.45	0.87	2	400	180	704	792	130	130	4	8	280	0.11
0.45	0.87	1	400	180	704	792	130	130	9	11	220	0.45
0.45	0.87	1	400	180	704	792	130	130	100	11	170	6.47

ANEXO II

DISEÑO DE EXPERIMENTOS ROBUSTEZ

Líneas básicas del diseño y análisis de experimentos

Serna, P., Taengua, E.G.

Dpto. de Ing. de la Construcción y Proyectos de Ing. Civil

Universitat Politècnica de València

1. Objetivo del texto

En el presente escrito se pretende exponer el procedimiento general del Diseño de Experimentos, desarrollado a partir de los trabajos de Taguchi [1].

2. Introducción

Frecuentemente, cuando se plantea una investigación experimental, se pretende analizar de qué factores depende una propiedad determinada (diseño factorial) y, en su caso, obtener una función que relacione el valor de dicha propiedad con los de los valores que pueden tomar los factores¹.

Ante un problema como éste, el procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Definición de la/s característica/s a estudiar, que serán las variables respuesta.
2. Selección de los factores a considerar en el experimento y decisión de los niveles de variación a estudiar para cada factor.
Debe seleccionarse el número de factores y los niveles a estudiar con criterio económico: reducirlos a un número mínimo pero intentando controlar el máximo de efectos. Reducir en exceso los factores o niveles puede conducir a la pérdida del sentido del estudio y con ello a resultados incorrectos.
3. Decisión del número de pruebas a realizar y definición de las mismas.

Así, si se desea conocer de qué depende el módulo de elasticidad de un hormigón fabricado con áridos reciclados, se puede pensar en un conjunto de factores y niveles de los mismos como la que se presenta en la tabla 1.

FACTORES	NIVELES DE VARIACIÓN
Calidad del hormigón de origen de los áridos recibidos (f_c)	$f_c = 25 ; 35$
Contenido en desclasificados (%)	6% ; 10 %
Calidad del hormigón objetivo ($f_{c,obj}$)	$f_{c,obj} = 20 ; 40$
Sustitución del árido grueso por árido reciclado (%)	20% ; 100 %
Criterio de sustitución	2 niveles: mg (-10% ; +10%)

Tabla 1. Ejemplo de planteamiento de factores y niveles para un experimento.

¹ Puede haber experimentos que, por naturaleza, no puedan organizarse según un diseño factorial, como los de carácter sociológico (v.g. encuestas), aunque en ciencia e ingeniería la mayoría de experimentos se pueden someter a un diseño factorial. Es por ello que en adelante cuando hablemos de diseño de un experimento nos estaremos refiriendo a diseños factoriales.

En la decisión de qué factores considerar en el experimento juega un papel importante tanto el conocimiento empírico o teórico que se tenga del fenómeno estudiado como la intuición de lo que pueda ser o no influyente. El acierto en la elección de los niveles también es importante: un factor puede aparecer como significativo simplemente porque la diferencia entre los niveles del mismo sea grande.

El número de pruebas de que conste el experimento deberá surgir de un compromiso entre: el nivel de resolución o fiabilidad que se quiere tener de las conclusiones (tanto mayor cuantas más pruebas se hagan) y la minimización del tiempo invertido en el experimento. En este sentido, recurrir al uso de fracciones factoriales será de gran ayuda.

Un estudio completo de esta programación exigiría realizar un plan de ensayos que contemplaría $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 3 = 48$ combinaciones distintas.

Para reducir el número de ensayos es frecuente optar por plantear un ensayo tipo y sobre él analizar el efecto de las variaciones de cada factor por separado. En el ejemplo propuesto anteriormente, el caso tipo podría ser: un hormigón base de 25 MPa, del que se fabrican áridos reciclados con un porcentaje de desclasificados del 6%, se utilizará para fabricar un H40 sustituyendo el 20% del árido grueso manteniendo la granulometría. El efecto del contenido en desclasificados se analizaría añadiendo 1 ensayo que coincidiría con el ensayo base en todo, salvo en el factor que se estudia, que tomaría el valor del 10%. Los otros factores se analizarían del mismo modo actuando siempre alrededor del ensayo base. De este modo, el estudio se realizaría con sólo 6 ensayos.

Sin embargo, este modo de proceder no es estadísticamente el más adecuado. Para compaginar la economía en esfuerzo experimental pero manteniendo el rigor científico en el diseño del programa de ensayos, nos apoyaremos en principios estadísticos.

3. Consideraciones para el diseño de experimentos

Cuando se plantea diseñar un programa de ensayos, se deben tener en cuenta aspectos como:

- Los objetivos de experimentos con un número considerable de factores pueden no conseguirse con diseños que intenten esclarecer uno a uno el efecto de los distintos factores. Es incorrecto presuponer que el valor óptimo de la variable respuesta es el óptimo de los óptimos parciales conseguidos variando solamente un factor cada vez y dejando el resto fijos.
- Principios erróneos como el mencionado pueden conducir a pérdidas de tiempo y recursos o a resultados no concluyentes.
- Factores no controlados comprometen las conclusiones del experimento.
- La no observancia de un mismo procedimiento y condiciones en todas las pruebas que constituyen el experimento puede enmascarar el efecto de los distintos factores.

Un uso efectivo de los principios estadísticos en el diseño de experimentos permite un diseño económico y eficiente de los mismos, que permite evaluar los efectos individuales y sus interacciones [2].

Aquí plantearemos un procedimiento para el diseño de experimentos, cuyo soporte estadístico es el análisis de la varianza o ANOVA.

El procedimiento que se propone consiste en seleccionar un número reducido de pruebas, de manera que del estudio de sus resultados sea posible extraer suficiente información para garantizar un análisis de la influencia de los distintos factores con garantías.

4. Terminología

- **Factor.** Variable controlable experimentalmente que se supone puede tener un efecto sobre la llamada variable respuesta.
- **Variable respuesta.** Resultado de un experimento.
- **Prueba.** Combinación de los factores, cada uno a un nivel de variación determinado, a la cual va asociada una observación experimental de la variable respuesta.
- **Niveles.** Valores prefijados que puede tomar un factor.
- **Diseño o experimento.** Especificación de un conjunto de pruebas experimentales, obtenidas asignando diferentes valores a los factores y pudiendo haber repeticiones.
- **Replicación.** Repetición de una prueba (o de un conjunto de ellas) dos o más veces.
- **Efecto.** Cambio en la variable respuesta que se produce entre 2 condiciones experimentales. En concreto, el efecto que produce un factor sobre la variable respuesta es la variación del valor de la misma al variar el factor.
- **Interacción entre 2 o más factores.** Existe si el efecto de uno de ellos depende de los niveles de los otros factores implicados en la interacción.
- **Orden de una interacción.** Número de factores implicados en la misma. Los efectos de las interacciones de orden mayor que 2 suelen ser inexistentes, [2].

5. Procedimiento para el diseño del experimento

Se plantearán diseños de tipo fracción factorial, en los que el número de pruebas se ve reducido en relación al diseño factorial completo de acuerdo con criterios que son válidos desde un punto de vista estadístico.

Los planes factoriales altamente fraccionados, más conocidos como **orthogonal arrays**, nacieron de los trabajos de Taguchi [1], orientados a generalizar y facilitar la aplicación del Diseño de Experimentos en círculos industriales, y por extensión a los investigadores en general, sin precisar de grandes conocimientos estadísticos. Con ellos se consigue [2] estudiar el efecto de un número elevado de factores con pocas pruebas, a cambio de desestimar el efecto de las interacciones de orden elevado (de más de 2 efectos, cuya importancia sería de todas formas despreciable).

La elección del orthogonal array que conviene utilizar en cada caso depende del número de factores a estudiar y los niveles de variación de cada uno. Los más comunes se muestran en el anejo "Catálogo de orthogonal arrays". La denominación que se les da es del tipo L_x , donde x es el número de pruebas de que consta el array.

Por ejemplo, si se pretende diseñar un experimento que permita el estudio de hasta 7 factores a 2 niveles sobre una variable respuesta dada, se puede recurrir al orthogonal array L_8 , mostrado en la tabla 2.

En ella cada columna j corresponde a un factor, mientras que cada fila i corresponde a una prueba de las que conforman el experimento. Así pues, el elemento ij indicará el nivel al que se debe fijar el factor j en la prueba i .

Prueba	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tabla 2. Orthogonal array L8.

Una buena fracción factorial no confunde nunca efectos simples entre sí. Sin embargo, debido al tan reducido número de pruebas con que se trabaja, es habitual que los efectos de las interacciones se confundan con los efectos simples de los factores estudiados. Por ello cada orthogonal array se acompaña de una tabla de doble entrada que recibe el nombre de tabla de interacciones. En la mayoría de casos en que se recurre a un orthogonal array para diseñar un experimento no se utilizan todas las columnas del mismo, puesto que el número de factores considerados normalmente es menor al número de factores que permite estudiar el orthogonal array. En esos casos conviene elegir las columnas a utilizar intentando no tomar aquellas en las que se confunden interacciones de otras columnas también escogidas, y para eso se utiliza la tabla de interacciones. En la tabla 3 se muestra como ejemplo la tabla de interacciones del orthogonal array L8.

1	2	3	4	5	6	7
1	3	2	5	4	7	6
	2	1	6	7	4	5
		3	7	6	5	4
			4	1	2	3
				5	3	2
					6	1

Tabla 3. Tabla de interacciones del orthogonal array L8.

Elegidas dos columnas cualesquiera del orthogonal array, por ejemplo la 2 y la 4, en la tabla de interacciones se observa que la interacción de los efectos simples de estas columnas se recoge en la columna 6. Si tomásemos también esta columna del orthogonal array para otro factor, al estudiar su efecto estaríamos confundiendo el efecto simple de cada factor con los efectos simples de los otros dos.

Si por exigencias del propio experimento el número de factores es tal que obliga a emplear columnas del orthogonal array que incluyan interacciones, cuando posteriormente se analicen los resultados del experimento habrá que tener en cuenta que los efectos simples de los factores incluirán también parte del efecto de determinadas interacciones. Puesto que a la vista de la tabla de interacciones se puede saber cuáles son las que inerfieren cada efecto simple, o bien se pueden plantear experimentos adicionales destinados a clarificarlo, o bien se puede tener de antemano conocimiento de la importancia o no de las interacciones en cuestión.

Por último, es bastante común que se quieran considerar en un experimento un número de factores y/o niveles que no coincidan exactamente con ningún orthogonal array de los que se manejan usualmente. En ese caso, Romero y Zúñica [3], proponen unos “trucos” para la adaptación de un orthogonal array al número deseado de factores y/o niveles, y que son totalmente válidos porque no alteran las propiedades fundamentales del orthogonal array². Son los siguientes:

1. En una columna de un factor a 3 niveles es posible acomodar un factor a 2 niveles haciendo equivalentes 2 de los 3 niveles primitivos. Se tiene un ejemplo en la tabla 4.
2. En cualquier diseño con factores a 2 niveles es posible acomodar un factor a 4 niveles usando 2 columnas cualesquiera y la correspondiente a su interacción. Se tiene un ejemplo en la tabla 5.
3. En un diseño con factores a 2 niveles es posible acomodar un factor a 3 niveles usando el truco 2 y luego haciendo equivalentes 2 de los nuevos 4 niveles.

Nº prueba	FACTOR A
1	1
2	2
3	3
4	1
5	2
6	3
7	1
8	2
9	3

Tabla 4. Ejemplo del truco 1.

Nº prueba	FACTOR A
1	1
2	2
3	1
4	1
5	2
6	1
7	1
8	2
9	1

Nº prueba	FACTOR A	FACTOR B
1	1	1
2	1	2
3	1	1
4	1	2
5	2	1
6	2	2
7	2	1
8	2	2

	A * B
1 * 1	1
1 * 2	2
1 * 1	1
1 * 2	2
2 * 1	3
2 * 2	4
2 * 1	3
2 * 2	4

Tabla 5. Ejemplo del truco 2.

6. Indicaciones para el desarrollo del experimento

Lo más aconsejable es que la secuencia de realización de las pruebas no siga ningún orden, ya que una secuenciación excesiva de las pruebas podría introducir interferencias anómalas en el experimento, como errores por distracción del experimentador en las últimas pruebas.

Si se incluyen *replicaciones* o repeticiones de las pruebas, ha de actuarse, siempre que sea posible, de forma equilibrada: se hablará de *diseño balanceado o equilibrado* cuando todas las pruebas se repitan un mismo número de veces. Esto permitirá analizar el error experimental (ya que una misma prueba no proporciona 2 veces el mismo resultado exactamente). Además, las replicaciones aumentan los grados de libertad del experimento, teniéndose un análisis más robusto.

7. Análisis de los resultados: ANOVA

Una vez realizado el experimento y obtenidos los resultados, la variabilidad en los valores que ha tomado la variable respuesta se debe a:

1. A la variación de los factores estudiados según sus niveles.

² Ciertas propiedades fundamentales de los orthogonal arrays, que son intrínsecas a la construcción de los mismos y que garantizan la fiabilidad de las conclusiones que de su uso se extraen. No han sido descritas en el presente escrito por excederse del alcance del mismo.

2. A factores no considerados y al *ruido* experimental, que es el propio error inherente a cualquier experimento.

La variabilidad de la variable respuesta se recoge en lo que se llama la suma de cuadrados del experimento, que conceptualmente se asimila a la suma de errores al cuadrado:

$$SC_{TOTAL} = \sum_i (x_i - \bar{x})^2$$

Siguiendo la idea de que la variabilidad total del experimento es la suma de una variabilidad debida a los factores y de una variabilidad no controlada o *residual*, se tiene:

$$SC_{TOTAL} = \sum SC_{FACTORES} + SC_{RESIDUAL}$$

Resulta obvio que la influencia de un factor determinado sobre la variabilidad de la variable respuesta será tanto más importante cuanto mayor sea la suma de cuadrados asociada a éste, o dicho de otro modo: a mayor suma de cuadrados de un factor, más influyente es.

No obstante, la afirmación anterior se tiene que matizar, porque no es lo mismo un factor con 2 niveles de variación que uno con 4 niveles. En este sentido, es fácil entender que un factor para el que se han considerado muchos niveles de variación producirá mayor variabilidad en la respuesta que un factor considerado a pocos niveles.

Para relativizar la influencia de cada factor en la variabilidad de la variable respuesta en función del número de niveles considerado para cada uno, se introduce el concepto de *grados de libertad* tanto del experimento como de los factores, y a continuación el concepto de *cuadrado medio*, que es el cociente entre la suma de cuadrados y los grados de libertad del factor (la relativización de la suma de cuadrados según el número de niveles del factor).

Si el experimento consta en total de un número N de pruebas, entonces se dice que el experimento tiene N-1 grados de libertad totales.

Un factor F_i para el que se consideran N_{fi} niveles, tendrá $N_{fi}-1$ grados de libertad.

La diferencia entre los grados de libertad totales y la suma de los grados de libertad de todos los factores es igual a los grados de libertad del *residuo*. En este sentido, se habla de residuo como un factor más, y es el que agruparía toda la parte de variación que no queda explicada por los factores.

En resumen, se tiene:

$$\text{Grados de libertad totales:} \quad \text{glt} = N - 1.$$

$$\text{Grados de libertad de los factores:} \quad \text{glf} = \sum_i (N_{fi} - 1).$$

$$\text{Grados de libertad residuales:} \quad \text{glr} = \text{glt} - \text{glf}.$$

En general se recomienda que $\text{glr} \geq 4$ para que un ANOVA se pueda considerar robusto, esto es, para que las conclusiones que de él se derivan se puedan considerar como tales. Hay diversas formas de aumentar los grados de libertad residuales en fase de diseño del experimento:

- Aumentar el número de pruebas.

- Reducir el número de factores considerados.
- Replicar el diseño (realizar todas las pruebas 2 veces).

El análisis de la varianza se suele hacer con la ayuda de paquetes informáticos, por lo que interesa comentar cómo se deben interpretar los resultados de los mismos, tanto en forma de tablas como salidas gráficas.

8. Análisis de la varianza (ANOVA) con Statgraphics*

Este epígrafe no pretende ser un manual del software Statgraphics, sino una iniciación a la interpretación de las tablas de anova y los gráficos del análisis de la varianza necesarios para poder pretender realizar un buen diseño del experimento.

Tras introducir los datos y resultados del experimento en el programa y solicitar el análisis de la varianza, el programa realiza contrastes de hipótesis y se obtiene una tabla de anova, que tiene el siguiente aspecto:

Analysis of Variance for DIAMETER - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ADMIXTURE	21896,8	2	10948,4	3,55	0,0397
B:CEMENT	11193,6	2	5596,82	1,82	0,1781
C:FILLER	23011,3	3	7670,43	2,49	0,0769
D:GRAVEL	6543,29	2	3271,64	1,06	0,3571
E:SAND	15466,4	3	5155,48	1,67	0,1912
F:WATER	10467,2	2	5233,59	1,70	0,1982
RESIDUAL	104776,0	34	3081,66		
TOTAL (CORRECTED)	191167,0	48			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Cada fila de la tabla corresponde a uno de los factores considerados. En la columna Df se indican los grados de libertad de los factores y los que quedan para el residuo.

Antes de comenzar a sacar conclusiones debemos comprobar que el número de grados de libertad residuales es superior a 4.

Observando los p-valores mostrados en la columna **P-Value**, aquellos factores con p-valor *igual o inferior a 0,05* serán considerados estadísticamente significativos: tienen un efecto considerable sobre la variable respuesta. El valor límite de p-valor igual a 0,05 resulta de admitir una confianza del 95%.

Los factores con p-valores muy grandes son claramente no significativos. La forma lógica de proceder con ellos es eliminarlos y repetir el análisis sin tomarlos en consideración. Se procede así porque, ya que se conoce que un factor no es influyente, al no considerarlo se están ganando grados de libertad para el residuo, y con ello se clarifica más la consideración de significancia o no de los efectos de los otros factores.

* Statgraphics Plus 5.1, © 1994 – 2001 Statistical Graphics Corp.

En el caso de la tabla anterior, el factor ADMIXTURE aparece con un p-valor = 0,0397, por lo que su efecto sobre DIAMETER es estadísticamente significativo. Para FILLER se tiene un p-valor = 0,0769, próximo a 0,05 aunque superior. El factor GRAVEL, con un p-valor = 0,3571 es claramente no influyente. No considerándolo se obtiene:

Analysis of Variance for DIAMETER - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ADMIXTURE	22554,8	2	11277,4	3,65	0,0361
B:CEMENT	9618,87	2	4809,44	1,56	0,2250
C:FILLER	24604,4	3	8201,46	2,65	0,0633
D:SAND	16382,1	3	5460,7	1,77	0,1711
E:WATER	10868,1	2	5434,04	1,76	0,1870
RESIDUAL	111320,0	36	3092,22		
TOTAL (CORRECTED)	191167,0	48			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

En esta segunda tabla de anova se tiene el factor FILLER con un p-valor = 0,0633, se ha visto disminuido respecto del valor que tenía en la tabla anterior y queda aún más cercano a 0,05. Por ello, en este caso se podría concluir que dicho factor también es influyente, aunque esta afirmación ya no cuenta con un nivel de confianza del 95%, sino del 100 - 6,33 = 93,67%. Por lo tanto, sólo ADMIXTURE y FILLER tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la variable respuesta DIAMETER; el resto, no.

Existe también una forma gráfica para deducir las conclusiones anteriores, referentes a qué factores son influyentes y cuáles no: son los **gráficos de intervalos LSD** (siglas de *Least Significant Difference*). En ellos se representa un segmento para cada nivel del factor seleccionado. En el caso de factores de tipo cualitativo³, cuando los segmentos se solapan entre sí, la influencia del factor no es estadísticamente influyente; cuando los segmentos claramente no se solapan, el factor es influyente. En la figura 1 se muestra un ejemplo de cada caso. En el caso de factores de tipo cuantitativo no se puede concluir que un factor sea significativo o no a partir de un gráfico de intervalos LSD, éste simplemente aportaría información de la tendencia (crecimiento, decrecimiento, forma cuadrática, etc) en la variable respuesta producida por la variación del factor.

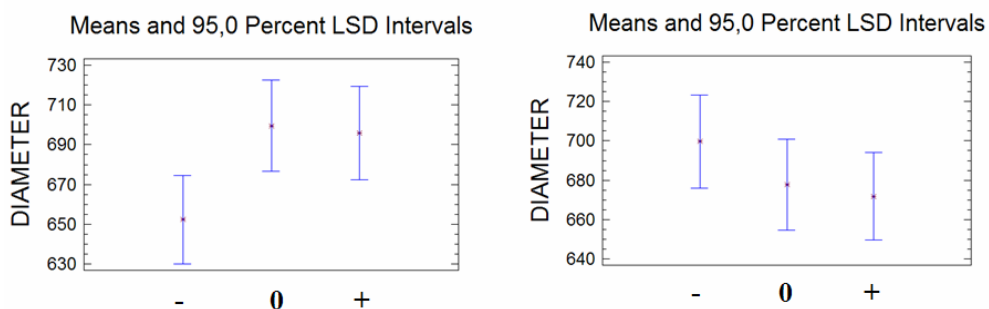


Fig. 1. Comparación del gráfico LSD de un factor cualitativo influyente con otro no influyente.

³ Un factor de tipo cualitativo es aquél que no es continuo. Por ejemplo, el hecho de usar cohesionante o no en la fabricación del hormigón, tendríamos el factor COHESIONANTE con dos niveles: sí y no, que normalmente se denotan por 1 y 0.

9. Estudios de regresión con Statgraphics

Tras determinar con el análisis de la varianza los factores que tienen un efecto estadísticamente significativo sobre una variable respuesta, el objetivo último de un estudio de regresión es llegar a obtener una expresión matemática que estime los valores de una variable aleatoria Y a partir de los valores de una o más variables (aleatorias o no) de las que la primera depende, X_i , que ecuación que constituirá la formulación matemática de un modelo.

Las consideraciones teóricas y cálculos que se realizan en un estudio de regresión no se tratarán en el presente texto porque los estudios de regresión en la práctica se llevan a cabo con la ayuda de un paquete informático. Aquí se seguirá utilizando el Statgraphics.

En una primera aproximación, se considerarán sólo aquellos factores cuyo efecto ha resultado ser estadísticamente significativo en el análisis de la varianza. Tras ello, se obtiene una tabla como la siguiente:

Multiple Regression Analysis					
Dependent variable: DIAMETER					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	-1243,88	8601,97	-0,144604	0,8857	
ADMIXTURE	3375,4	2230,37	1,51338	0,1375	
FILLER	-119,846	73,6768	-1,62665	0,1111	
ADMIXTURE^2	-274,921	185,952	-1,47845	0,1466	
FILLER^2	0,397021	0,245933	1,61435	0,1138	
WATER/CEMENT	1099,53	403,822	2,7228	0,0093	

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	57841,7	5	11568,3	3,73	0,0068
Residual	133326,0	43	3100,6		
Total (Corr.)	191167,0	48			

R-squared = 30,2571 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 22,1474 percent
Standard Error of Est. = 55,683
Mean absolute error = 40,0141
Durbin-Watson statistic = 2,84462 (P=0,0008)
Lag 1 residual autocorrelation = -0,423571

Para interpretar los resultados, la atención debe centrarse especialmente en lo que ha sido recuadrado en rojo: las columnas **Parameter**, **P-Value** y los valores de **R-squared**.

En la columna **Parameter** encontraremos, además de los factores que han sido considerados en el estudio de regresión, un factor llamado **CONSTANT** que el programa considera por defecto y que se correspondería con la constante aditiva de la ecuación, lo que en una recta sería la ordenada en el origen.

El **P-Valor** de nuevo indica la significancia de la introducción del factor en cuestión en el modelo. Así, los que aparezcan con un p -valor $> 0,05$ son aquéllos cuya consideración o no consideración en el modelo no afecta especialmente al nivel de ajuste obtenido. Dichos factores

deben ser excluidos del modelo porque no contribuyen demasiado al buen ajuste del modelo y sin embargo sí que complican la ecuación obtenida añadiendo términos innecesarios.

Una vez eliminados, se repite el análisis con sólo los factores con p-valores $< 0,05$. Diremos que un ajuste o estudio de regresión es "bueno" cuando los valores que proporciona la ecuación encontrada en función de los factores se aproximan considerablemente a los valores realmente observados. El parámetro **R-squared** o R^2 es una medida de este ajuste: un R^2 próximo al 100% indica que la ecuación que se ha encontrado con la regresión es prácticamente la "exacta", mientras que un R^2 bajo indica que no se ha conseguido un buen ajuste. El programa también proporciona un valor **R-squared (adjusted for d.f.)**, que no es más que el valor de R^2 "relativizado" al tamaño del experimento, y sólo sirve para comparar la calidad de las regresiones conseguidas en experimentos con distinto número de pruebas.

Se tiene que llegar a un compromiso entre la exactitud (maximizar el R^2 del ajuste) y la simplicidad de la ecuación. Para aumentar el valor del R^2 se procederá a ir modificando los factores considerados, interacciones e incluso funciones de los factores (exponencial, elevado al cuadrado, etc), retirando los que presenten p-valores $> 0,05$. Es importante destacar que la ecuación que se encuentre debe revestir un cierto significado físico, y en la mayoría de casos no tendrá sentido considerar funciones extrañas.

El mismo programa proporcionará el valor de la ecuación correspondiente al ajuste, y en este punto hay que recordar que no siempre se podrá llegar hasta esta situación: puede que la variable que se trata de relacionar con los factores presente demasiada variabilidad no controlada, que no se hayan considerado los factores adecuados, o que simplemente el experimento esté mal concebido.

Por último, cualquier paquete informático ofrece salidas gráficas interesantes también a nivel de los estudios de regresión. Por ejemplo, el Statgraphics ofrece la posibilidad de representar, una vez hecha la regresión, los valores observados frente a los calculados de la variable respuesta, de forma que cuanto más centrada esté la nube de puntos en torno a la recta bisectriz, mayor será la precisión de la ecuación obtenida. En la figura 2 se compara la gráfica de observados-calculados en un regresión con buen ajuste con la obtenida en una regresión con mal ajuste.

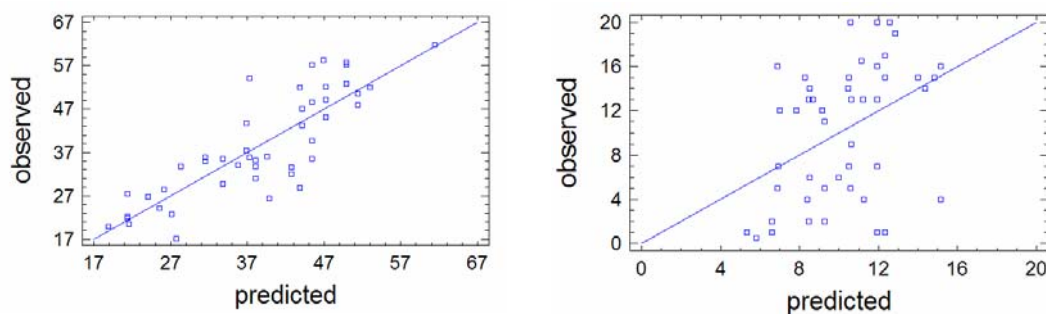


Fig.2. Comparación de un buen ajuste (izquierda) con un mal ajuste (dcha.).

Anejo: Catálogo de orthogonal arrays ⁴

L8

Permite estudiar hasta 7 factores (todos a 2 niveles) en 8 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tabla de interacciones

1	2	3	4	5	6	7
1	3	2	5	4	7	6
	2	1	6	7	4	5
		3	7	6	5	4
			4	1	2	3
				5	3	2
					6	1

⁴ Tomados de Romero y Zúnica, [3].

L16

Permite estudiar hasta 15 factores (todos a 2 niveles) en 16 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Tabla de interacciones

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	3	2	5	4	7	6	9	8	11	10	13	12	15	14
	2	1	6	7	4	5	10	11	8	9	14	15	12	13
		3	7	6	5	4	11	10	9	8	15	14	13	12
			4	1	2	3	12	13	14	15	8	9	10	11
				5	3	2	13	12	15	14	9	8	11	10
					6	1	14	15	12	13	10	11	8	9
						7	15	14	13	12	11	10	9	8
							8	1	2	3	4	5	6	7
								9	3	2	5	4	7	6
									10	1	6	7	4	5
										11	7	6	5	4
											12	1	2	3
												13	3	2
													14	1

L9

Permite estudiar hasta 4 factores a 3 niveles en 9 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

No se acompaña tabla de interacciones porque cada interacción doble se "reparte" entre los efectos simples de los otros factores.

L18

Permite estudiar 1 factor a 2 niveles y hasta 7 factores a 3 niveles en 18 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Tampoco se acompaña tabla de interacciones porque sucede lo mismo que en el L9.

L27

Permite estudiar hasta 13 factores a 3 niveles en 27 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Tabla de interacciones

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	3	2	2	6	5	5	9	8	8	12	11	11
	4	4	3	7	7	6	10	10	9	13	13	12
	2	1	1	8	9	10	5	6	7	5	6	7
		4	3	11	12	13	11	12	13	8	9	10
		3	1	9	10	8	7	5	6	6	7	5
			2	13	11	12	12	13	11	10	8	9
			4	10	8	9	6	7	5	7	5	6
				12	13	11	13	11	12	9	10	8
				5	1	1	2	3	4	2	4	8
					7	6	11	13	12	8	10	9
					6	1	4	2	3	8	2	4
						5	13	12	11	10	9	8
						7	3	4	2	4	3	2
							12	11	13	9	8	10
							8	1	1	2	3	4
								10	9	5	7	6
								9	1	4	2	3
									8	7	6	5
									10	3	4	2
										6	7	7
										11	1	1
											13	12
											12	1
												11

Bibliografía

1. Taguchi, G., *System of experimental Design: Engineering Methods to optimize Quality and minimize Costs*. Ed. Unipub, New York, Estados Unidos, 1988.
2. Mason et al., *Statistical Design and Analysis of Experiments*. Ed. John Wiley and Sons, Estados Unidos, 2003.
3. R. Romero y L. Zúñica, *Estadística: diseño de experimentos, modelos de regresión. Editado por el Servicio de Publicaciones de la Univ. Politécnica de Valencia*, Valencia, 1993.

ANEXO III

ROBUSTEZ

RESULTADOS

HAC 1

Nº	Escurrecimiento				Embudo V (s)		Anillo J			L-Box H1/H2	Permeabilidad (cm)		Segregación D (cm)	Resistencia 28 días (Mpa)	Rango
	T50 (s)		Dmax (mm)		MIX A	MIX B	T50	Dmax	H1/H2		Max	Med			
	MIX A	MIX B	MIX A	MIX B											
L1	2	2	670	730	10	15	1	760	1.00	0.75			55.2	0.04	
L2	1	2	710	740	7	9	1	750	0.50	0.84			29.3	0.49	
L3	2	2	700	720	7	12	2	710	0.67	0.75			45.8	0.11	
L4	3	2	700	720	11	9	5	640	0.50	0.70	2.8	1.4	0	48.5	0.13
L5	2	4	750	720	10	33	4	700	0.50	0.64	2.75	1.6	0	50.3	0.02
L6	4	3	630	690	16	8	NO LLEGA	490	0.70	0.71	3.2	2.5		50.4	0.05
L7	2	2	720	670	10	9	3	670	0.38	0.45	8.75	5.4	0.6	50.0	0.06
L8	2	2	730	650	12	12	3	710	0.50	0.79	2.5	1.4	0.3	54.0	0.17
L9	1	1	740	670	8	4	3	600	0.67	0.68	10	5.7	2.6	41.4	0.17
L10	2	2	700	750	11	10	8	650	0.71	0.56	1.5	0.6	1.2	42.3	0.17
L11	3	3	720	640	17	14	4	700	0.67	0.74	2.25	1.1	0	60.1	0.08
L12	1	2	780	710	7	10	1	740	1.00	0.75	2.5	1.6	0.2	41.1	0.38
L13	3	2	670	700	14	10	4	630	0.80	0.71	2.75	1.6	0.2	45.3	0.36
L14	2	2	700	670	15	12	3	680	0.38	0.95	2.35	1.4	0.8	47.0	0.35
L15	1	1	730	690	8	6	2	700	0.38	0.61	5.9	3.3	1.3	43.7	0.26
L16	2	2	710	710	9	8	3	680	0.43	0.37	2.1	1.3	0.9	45.8	0.22
L17	1	2	720	700	7	6	1	710	0.43	0.54	2.5	1.8	2.6	45.6	0.55
L18	2	2	680	700	13	7	3	660	0.43	0.50	5	2.7	1	49.4	0.37
L19	3	4	640	580	22	24	5	530	0.31	0.41	2.5	1.4	0	48.9	0.21
L20	2	2	680	720	6	8	2	730	0.44	0.89	1.75	1.1	0.6	42.0	0.51
L21	1	1	720	730	6	7	2	710	0.50	0.80	3	1.4	2.1	44.7	0.28
L22	2	2	630	680	8	12	2	700	0.38	0.48	2	0.9	0.7	32.8	1.00
L23	2	2	680	690	3	8	2	820	1.00	0.90	2	1.4	0.4	39.5	0.29
L24	2	2	680	710	7	12	3	650	0.44	0.68	2	1.1	0.3	29.8	0.33
L25	2	1	750	780	21	8	3	730	0.80	0.60	7.4	2.1	1.3	30.3	0.67
L26	2	2	710	730	9	9	2	750	0.67	0.77	2.7	1.3	0.6	32.2	0.53
L27	2	2	710	730	10	9	2	710	0.67	0.80	2	1	0	37.1	0.41
PORMEDIO	2	2	702	701	11	11	3	686	0.59	0.68	3.4	1.9	0.762	43.8	0.30
DESVEST	0.73	0.73	35.88	39.16	4.55	5.82	1.54	68.24	0.20	0.15	2.29	1.28	0.784	7.97	0.22
C.V.	0.37	0.35	0.05	0.06	0.43	0.54	0.54	0.10	0.35	0.22	0.67	0.68	1.03	0.18	0.73

HAC2

Nº	Escurecimiento				Embudo V (s)		Anillo J			L-Box H1/H2	Permeabilidad (cm)		Segregación D (cm)	Resistencia 28 días (Mpa)	Rango
	T50 (s)		Dmax (mm)		MIX A	MIX B	T50	Dmax	H1/H2		Max	Med			
	MIX A	MIX B	MIX A	MIX B											
L1	2		740		10		3	720	0.67			0	35.1	0.10	
L2	2		740		10		2	720	0.80			0.2	34.4	0.11	
L3	2		720		13		3	670	0.57			0	35.0	0.08	
L4	2		680		8		3	610	0.57			0	32.2	0.10	
L5	3		650		12		4	580	0.56			0	37.5	0.06	
L6	2		730		9		2	740	0.67			0.3	34.1	0.11	
L7	1		730		7		2	720	0.67			0.2	36.1	0.11	
L8	2		710		12		3	655	0.50			0.0	37.0	0.08	
L9	1		750		8		1	790	0.75			3.0	27.4	0.20	
L10	1		760		6		1	790	0.60			2	27.9	0.24	
L11	NO LLEGA		450		NO BAJA		NO LLEGA	360	0.50			0	36.4	0.05	
L12	2		700		7		2	690	0.67			0	32.5	0.07	
L13	NO LLEGA		450		11		NO LLEGA	380	0.50			0	33.4	0.04	
L14	4		570		9		5	500	0.50			0.0	37.0	0.06	
L15	2		690		6		2	700	0.67			0	34.7	0.08	
L16	1		750		7		1	770	0.60			1.1	30.1	0.20	
L17	2		710		7		3	620	0.57			0.0	38.6	0.05	
L18	1		730		7		2	650	0.57			0	33.3	0.05	
PORMEDIO	1.88		681.11		8.76		2.44	648.06	60.69			0.378	34.04	0.10	
DESVEST	0.81		95.05		2.22		1.09	125.50	8.71			0.834	3.12	0.06	
C.V.	0.43		0.14		0.25		0.45	0.19	0.14			2.21	0.09	0.58	

HAC3R															
Nº	Escorrentamiento				Embudo V (s)		Anillo J			L-Box H1/H2	Permeabilidad (cm)		Segregación D (cm)	Resistencia 28 días (Mpa)	Rango
	T50 (s)		Dmax (mm)		MIX A	MIX B	T50	Dmax	H1/H2		Max	Med			
L	MIX A	MIX B	MIX A	MIX B	MIX A	MIX B	T50	Dmax	H1/H2						
1	2		650		9		2	610	0.60			0	53.0	0.16	
2	1		690		8		2	620	0.38			0	52.5	0.46	
3	3		630		11		5	550	0.44			0	57.4	0.10	

PORMEDIO	2		657		9		3	593	0			0	54	0
DESVEST	1.00		30.55		1.53		1.73	37.86	0.11			0.00	2.70	0.19
C.V.	0.50		0.05		0.16		0.58	0.06	0.24			0.00	0.05	0.80

HAC3F															
Nº	Escorrentamiento				Embudo V (s)		Anillo J			L-Box H1/H2	Permeabilidad (cm)		Segregación D (cm)	Resistencia 28 días (Mpa)	Rango
	T50 (s)		Dmax (mm)		MIX A	MIX B	T50	Dmax	H1/H2		Max	Med			
L	MIX A	MIX B	MIX A	MIX B	MIX A	MIX B	T50	Dmax	H1/H2						
1	2		635		14		3	570	0.50			0	55.5	0.12	
2	2		640		11		4	570	0.50			0	58.8	0.16	
3	5		560		30		NO LLEGA	440	0.42			0	60.1	0.13	
4	3		590		28		NO LLEGA	470	0.40			0	58.6	0.19	
5	3		590		26		7	550	0.57			0	60.0	0.13	

PORMEDIO	3		603		22		5	520	0			0	59	0
DESVEST	1.22		33.84		8.67		2.08	60.83	0.07			0.00	1.86	0.03
C.V.	0.41		0.06		0.40		0.45	0.12	0.14			0.00	0.03	0.20

HAC3C															
Nº	Escurrecimiento				Embudo V (s)		Anillo J			L-Box H1/H2	Permeabilidad (cm)		Segregación D (cm)	Resistencia 28 días (Mpa)	Rango
	T50 (s)		Dmax (mm)		MIX A	MIX B	T50	Dmax	H1/H2		Max	Med			
L	MIX A	MIX B	MIX A	MIX B	MIX A	MIX B	T50	Dmax	H1/H2						
L1	2		620		14		5	560	0.50			0	60.3	0.17	
L2	2		650		9		3	580	0.57			0	58.1	0.07	
L3	5		580		18		11	510	0.44			0	60.1	0.09	
PORMEDIO	3		617		14		6	550	1			0	60	0	
DESVEST	1.73		35.12		4.51		4.16	36.06	0.07			0.00	1.22	0.05	
C.V.	0.58		0.06		0.33		0.66	0.07	0.13			0.00	0.02	0.48	

HAC4															
Nº	Escurrecimiento				Embudo V (s)		Anillo J			L-Box H1/H2	Permeabilidad (cm)		Segregación D (cm)	Resistencia 28 días (Mpa)	Rango
	T50 (s)		Dmax (mm)		MIX A	MIX B	T50	Dmax	H1/H2		Max	Med			
L	MIX A	MIX B	MIX A	MIX B	MIX A	MIX B	T50	Dmax	H1/H2						
1	2		700		7		3	685	0.80			0	54.1	0.10	
2	1		745		4		2	680	0.80			0	59.2	0.08	
3	5		645		10		6	600	0.71			0	59.4	0.11	
4	3		670		7		5	605	0.63			0	58.3	0.18	
5	3		720		6		4	670	0.80			0	57.3	0.10	
PORMEDIO	3		696		7		4	648	1			0	58	0	
DESVEST	1.48		39.59		2.17		1.58	41.92	0.08			0.00	2.16	0.04	
C.V.	0.53		0.06		0.32		0.40	0.06	0.10			0.00	0.04	0.34	

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 Representación esquemática del comportamiento de un fluido Newtoniano.	11
Fig. 2.2 Representación grafica de los modelos de Newton y Bingham.	12
Fig. 2.3 Viscosímetro BML WO-3.	14
Fig. 2.4 Recomendaciones según Emborg 1999.	15
Fig. 2.5 Viscosímetro Con Tec.	16
Fig. 2.6 Zonificación de los HAC de acuerdo con su aplicación según Wallevik y Nielsson.	17
Fig. 2.7 Dimensiones del Cono de Abrans y realización del ensayo.	21
Fig. 2.8 Ensayo de flujo de cono con anillo J.	24
Fig. 2.9 Ensayo Orimet con anillo J.	25
Fig. 2.10 Definición de H1 y H2 en el ensayo del anillo japonés.	25
Fig. 2.11 Ensayo del embudo V. Dimensiones en mm.	26
Fig. 2.12 Dimensiones de la caja L y ensayo realizado.	29
Fig. 2.13 Ensayo caja en U.	31
Fig. 2.14 Vessel test. Aparato Original.	32
Fig. 2.15 Vessel test. Aparato modificado.	32
Fig. 1.16 Ensayo de flujo vertical.	32
Fig. 2.17 Orimet test.	33
Fig. 2.18 Probeta segregada.	34
Fig. 2.19 Probeta sin segregación.	34
Fig. 2.20 Ensayos de estabilidad superficial.	35
Fig. 2.21 Ensayo del Tubo en U.	36

Fig. 2.22 Ensayo de aceptación en obra.	37
Fig. 2.23. Definición de zonas de autocompactabilidad según Zebrino et al, 2006.	40
Fig. 2.24. Comparación de las zonas de autocompactabilidad.	40
Fig. 2.25 Ensayo de flujo de mortero.	49
Fig. 2.26 Ensayo de embudo en V para mortero.	49
Fig. 2.27 Cono de Marsh.	49
Fig. 2.28 1Mini-slump (Cavalcanti 2006).	50
Fig. 2.29. Relación entre el cociente (V_{abi}/V_t) y el cociente (c/D_{af}).	54
Fig. 2.30. Curva límite de bloqueo. Petersson 1996.	55
Fig. 2.31. Pasos para la obtención del HAC según EFNARC.	62
Fig. 2.32 Definición de β_p .	62
Fig. 2.33 Esquema propuesto para la obtención de HAC.	64
Fig. 3.1 Granulometría de los materiales finos.	70
Fig. 3.2. Granulometría de los áridos.	72
Fig. 3.3 Serie de tamices utilizados.	77
Fig. 3.4 Amasadora de morteros.	79
Fig. 3.5 Ensayo y dimensiones del cono de Marsh.	80
Fig. 3.6 Material retenido en la rejilla del cono de Marsh.	80
Fig. 3.7 Dimensiones del embudo V utilizado. Dimensiones en mm.	82
Fig. 3.8 Llenado de probeta con HAC.	83
Fig. 3.9 Refrentado de probeta cilíndrica.	84
Fig. 3.10 Prensa ICON. Capacidad de 250 toneladas.	85
Fig. 3.11 Ensayo Brasileño.	85
Fig. 3.12 Permeabilímetro.	86
Fig. 3.13. Goma de unión entre probeta y permeabilímetro.	86
Fig. 3.14 ADL – Equipo para el análisis de tamaño de partícula por difracción de rayos Láser.	88

Fig. 3.15. Equipo Mattson Genesis II F.T.I.R. para realización de espectrometría Infrarroja.	89
Fig. 3.16 Equipo para el ensayo de termogravimetría.	90
Fig. 3.17 Viscosímetro rotacional Bohlin Visco 88 BV.	90
Fig.3.18 Hélice con doble pala helicoidal.	91
Fig. 3.19 Hormigón segregado.	92
Fig. 3.20 Hormigón Autocompactable.	92
Fig. 3.21 Medida de la profundidad de segregación.	92
Fig. 3.22 Mezclas en seco.	93
Fig.3.23 Mezclas en seco Llenado de la probeta.	94
Fig. 3.24 Mezclas en seco. Enrazado de la probeta.	94
Fig. 3.25 Mezclas en seco. Pesada de la probeta.	94
Fig. 3.26 Obtención de resultados.	94
Fig. 3.27 Hormigoneras utilizadas.	96
Fig. 3.28 Comparación de aspecto en el ensayo de la caja L en función del tiempo de amasado.	99
Fig. 3.29. Selección del tiempo de amasado.	100
Fig. 3.30 Cono utilizado para realizar el ensayo de Flujo de cono reducido.	104
Fig. 3.31 Embudo en V reducido.	105
Fig. 3.32 Dimensiones del Embudo en V reducido (medidas interiores).	105
Fig. 3.33 Sistema de cierre del Embudo en V reducido.	105
Fig. 3.34 Caja L reducida.	107
Fig. 3.35 Dimensiones de la Caja L reducida.	107
Fig. 3.36 Disposición de las barras de acero en la Caja L reducida.	108
Fig. 3.37 Ensayo de escurrimiento – estándar e reducido.	109
Fig. 3.38 Embudo en V – estandar e reducido.	109
Fig. 3.39 Caja L– estandar e reducido.	109
Fig.3.40 Comparación de resultados Dmax entre los conos estándar y reducido.	112

Fig. 3.41 Comparación de resultados entre los conos estándar y reducido.	112
Fig. 3.42 Comparación de resultados entre los embudos grande y reducido.	112
Fig. 3.43 Comparación de resultados entre las cajas "L" estándar y reducida.	112
Fig. 3.44 Comparación entre los tiempos t_{20} , t_{40} y t_{final} .	112
Fig. 3.45 Esquema del equipo de ensayo. Vista en planta.	116
Fig. 3.46 Vista general de los bastidores.	116
Fig. 3.47 Extremo de transmisión. Tesado finalizado. Sistema hidráulico y sistema mecánico en posición.	116
Fig. 3.48 Hormigonado de la probeta.	116
Fig. 3.49 Extremo de arrancamiento. Sistema hidráulico en posición.	117
Fig. 4.1 Influencia de la dosificación de aditivo en el escurrimiento en cono para pastas con diferentes contenidos en cemento, con relación agua / finos = 0,34.	121
Fig. 4.2 Influencia de la dosificación de aditivo en el escurrimiento en cono para pastas con diferentes contenidos en cemento, con relación agua / finos = 0,25.	122
Fig. 4.3 Evolución de la proporción de aditivo, para distintas proporciones de cemento, en el cono de Marsh.	123
Fig. 4.4 Resultados de los modelos de ensayos en tamaño reducido.	126
Fig. 4.5 Valores del parámetro P para los hormigones segregados.	128
Fig. 4.6 Valores del parámetro P para los hormigones secos.	128
Fig. 4.7 Valores del parámetro P para los HAC lentos.	129
Fig. 4.8 Valores del parámetro P para los HAC.	129
Fig. 4.9 Volumen de finos 125 x A/finos125.	130
Fig. 4.10 Volumen de finos 125 x A/finos 125.	131
Fig.4.11 Uso granulométrico de los HAC y curva de referencia de Bolomey con $a = 21$ y $D = 11$ mm.	132
Fig.4.12 Comparación de la franja 0/4 mm de la EHE con la de los HAC estudiados.	133
Fig. 4.13 Granulometría de las dosificaciones seleccionadas.	136

Fig. 4.14 Granulometría de los hormigones de la serie 1C.	137
Fig. 4.15 Granulometría de los hormigones de la serie 3B.	137
Fig. 4.16 Granulometría de los hormigones de la serie 3C.	137
Fig. 4.17 Granulometría de los hormigones de la serie 4B.	138
Fig. 4.18 Granulometría de los hormigones de la serie 5A.	138
Fig. 4.19 Granulometría de los hormigones de la serie 5F.	138
Fig. 4.20 Serie 1C resultado de ensayos en modelos reducidos.	139
Fig. 4.21 Serie 3B resultado de ensayos en los modelos reducidos.	139
Fig. 4.22 Serie 3C resultado de ensayos en los modelos reducidos.	139
Fig. 4.23 Serie 4B resultado de ensayos en los modelos reducidos.	140
Fig. 4.24 Serie 5A resultado de ensayos en los modelos reducidos.	140
Fig. 4.25 Serie 5F resultado de ensayos en los modelos reducidos.	140
Fig. 4.26 Optimización del esqueleto granular.	142
Fig. 4.27 Densidad de mezcla en seco – Influencia de la relación grava 7/12 mm / arena.	144
Fig. 4.28 Densidad de la mezcla en seco – influencia de la grava 4/7.	144
Fig. 5.1 Espectrometría Infrarroja FTIR.	149
Fig. 5.2 Ensayo de termogravimetría.	150
Fig.5. 3 Cono de Marsh.	150
Fig.5.4 Granulometría Filler calizo y filler silíceo.	151
Fig.5.5 Viscosímetro rotacional Bohlin Visco 88 BV.	151
Fig. 5.6 Resultados de cono de Marsh para pastas fabricadas solo con cemento.	155
Fig.5.7 Tiempos de flujo de cono de Marsh para cada aditivo.Relación a/c = 0,35 y aditivo al 0,5% sobre el cemento.	155
Fig.5.8 Resultados del cono de Marsh para pastas fabricadas con cemento + filler. Relación a/c = 0,43 y dosificación de aditivo = 1% sobre el cemento.	156
Fig.5.9 Curvas diferenciales (DTG) del ensayo termogravimétrico sobre muestras liofilizadas.	157

Fig. 5.10 Viscosímetro. Pastas de cemento y filler aditivo al 0,5%.	159
Fig. 5.11 Viscosímetro. Pastas de cemento y filler aditivo al 1%.	159
Fig. 5.12. Viscosímetro. Pastas de cemento y filler aditivo al 1,5%.	159
Fig. 5.13 Viscosímetro. Pastas de cemento y filler aditivo al 2%.	159
Fig. 5.14 Viscosímetro. Pastas de cemento. Aditivo al 0,160% de residuo sólido.	160
Fig. 5.15 Viscosímetro. Pastas de cemento y filler. Aditivo al 0,206% de residuo sólido.	160
Fig. 5.16 Viscosímetro. Pastas de cemento y filler. Aditivo al 0,308% de residuo sólido.	160
Fig.6.1 Deslizamientos durante el proceso de arrancamiento en el extremo de arrancamiento.	170
Fig.6.2 Deslizamientos en extremos de arrancamiento durante proceso de arrancamiento.	170
Fig.6.3 Deslizamientos durante el proceso de arrancamiento en el extremo de arrancamiento.	171
Fig. 7.2 Curvas granulométricas de las dosificaciones de referencia.	178
Fig.7.2 Distribución granulométrica y ajuste de la curva de Bolomey a la dosificación de referencia HAC1.	182
Fig.7.3 Distribución granulométrica y ajuste de la curva de Bolomey a la dosificación de referencia HAC2.	182
Fig.7.4 Distribución granulométrica y ajuste de la curva de Bolomey a la dosificación de referencia HAC3.	182
Fig.7.5 Distribución granulométrica y ajuste de la curva de Bolomey a la dosificación de referencia HAC3F.	183
Fig.7.6 Distribución granulométrica y ajuste de la curva de Bolomey a la dosificación de referencia HAC4.	183
Fig. 7.7 representación esquemática de las distintas etapas utilizadas.	187
Fig.7.8 Esquema de ensayos realizados con la amasada A.	192
Fig.7.9 Esquema de ensayos realizados con la amasada B.	192
Fig.7.10 Resultados del Dmax en el ensayo del Flujo de Cono para la dosificación	201

HAC1.	
Fig.7.11 Resultados del Dmax en el ensayo del Flujo de Cono para la dosificación HAC2.	202
Fig.7.12 Resultados del Tv en el ensayo del Embudo en V para la dosificación HAC1.	202
Fig.7.13 Resultados del Tv en el ensayo del Embudo V para la dosificación HAC2.	203
Fig.7.14 Resultados del Dmax en el ensayo del Anillo J para la dosificación HAC2.	204
Fig. 7.15 Profundidad de segregación y rango de las probetas de la dosificación HAC2.	205
Fig.7.16 Evolución del escurrimiento.	207
Fig. 7.17 Evolución del embudo V.	208
Fig. 8.1 Dimensiones de la sección de las pilas.	212
Fig. 8.2 Detalle de armado de las pilas. Sección básica.	213
Fig. 8.3 Detalle de armado de las pilas. Sección en Cabeza de pila.	213
Fig. 8.4 Disposición de armaduras.	213
Fig. 8.5 Encofrado.	213
Fig. 8.6 Aspecto del hormigón en los ensayos previos.	217
Fig. 8.7 Dosificación propuesta y granulometría.	220
Fig. 8.8 Ficha de control de hormigonado.	222
Fig. 8.9 Hormigón vertido cohesivo.	224
Fig. 8.10 Hormigón vertido con aspecto segregado.	224
Fig. 8.11 Escurrimiento 620 – Segregado / sin cohesión.	224
Fig. 8.12 y 8.13 Escurrimiento 550 mm – fluido y cohesivo..	225
Fig. 8.14 Escurrimiento 450. Poco trabajable.	225
Fig. 8.15 Escurrimiento 400. Demasiado seco.	225
Fig. 8.16 Posición de los vibradores de superficie colocados.	231
Fig. 8.17 Vertido desde camión para control de recepción.	234

Fig. 8.18 Evolución del comportamiento del hormigón en las distintas pilas.	235
Fig. 8.19 Vertido a la bomba.	236
Fig. 8.20 Vista general de la bomba durante el tiempo de espera.	237
Fig. 8.21 Vertido de las primeras capas.	237
Fig. 8.22 Relleno del recubrimiento.	237
Fig. 8.23 Última capa de hormigonado.	238
Fig. 8.24 Aspecto final de las pilas - lado Valencia.	238
Fig. 8.25 Detalle del acabado en coronación.	238

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Propuesta de valores de esfuerzo inicial τ_0 y viscosidad plástica μ para la fabricación de HAC en distintos países. (Wallevik 2003).	18
Tabla 2.2 Recomendaciones de la Guía Europea para el ensayo de flujo de cono.	23
Tabla 2.3 Parámetros de los ensayos por autores.	38
Tabla 2.4 Definición de finos según algunos autores.	43
Tabla 2.5 Clasificación de las adiciones en función de su hidraulicidad.	44
Tabla 2.6 Evolución de los aditivos reductores de agua a lo largo del tiempo.	45
Tabla 2.7 Valores de ensayo University College London.	53
Tabla 2.8 Parámetros de ensayos según EFNARC 2002.	59
Tabla 2.9 Parámetros de ensayos según la Guía Europea 2006.	60
Tabla 2.10 Sugerencia del ACI para el contenido en finos.	63
Tabla 2.11 ACI - Valores recomendados para dosificar un HAC.	63
Tabla 2.12 Dosificaciones de HAC propuestas por distintos autores. (Gomes - Septiembre 2002).	64
Tabla 2.13 Dosificaciones utilizadas en aplicaciones reales.	65
Tabla 2.14 Dosificaciones utilizadas en investigación.	66
Tabla 3.1 Ensayos de absorción, densidades y contenido en finos para la arena y gravas.	72
Tabla 3.2 Características de los aditivos.	74
Tabla 3.3 Proceso de amasado en cada hormigonera.	97
Tabla 3.4 Variables analizadas en las mezclas de hormigón.	110
Tabla 3.5 Ensayos realizados.	110

Tabla 4.1 Variables evaluadas en la fabricación del hormigón.	125
Tabla 4.2 Limites encontrados para los distintos tipos de hormigón.	131
Tabla 5.1 Variables analizadas en las pastas de cemento.	150
Tabla 5.2 Variables evaluadas sobre las pastas de cemento + filler.	152
Tabla 5.3 Pastas evaluadas utilizando el viscosímetro.	152
Tabla 5.4 % de residuo sólido de los aditivos utilizados.	156
Tabla 5.5 Caracterización físico química de los aditivos.	157
Tabla 6.1 Dosificación de los hormigones utilizados.	166
Tabla 6.2 Hormigones Tradicionales - Longitudes adherentes ensayadas.	166
Tabla 6.3 Hormigones Autocompactantes - Longitudes adherentes ensayadas.	167
Tabla 6.4 Caracterización de los hormigones utilizados.	168
Tabla 6.5 Resultados obtenidos.	168
Tabla 7.1 Tolerancias establecidas por la EHE y por el ACI.	177
Tabla 7.2 Dosificaciones utilizadas en el estudio de sensibilidad.	179
Tabla 7.3 Parámetro “a” propuesto para la curva de Bolomey.	181
Tabla 7.4 Características de las dosificaciones utilizadas en el estudio de sensibilidad.	184
Tabla 7.5 Niveles y variaciones consideradas para cada factor.	185
Tabla 7.6 Niveles y variaciones consideradas para cada factor de cada hormigón analizado.	186
Tabla 7.7 Variaciones propuestas a la dosificación de HAC1 siguiendo el diseño estadístico del L27.	189
Tabla 7.8 Variaciones propuestas a la dosificación de HAC2 siguiendo el diseño estadístico del L18.	190
Tabla 7.9 Variaciones propuestas para las dosificaciones HAC3, HAC3F, HAC3C, HAC4.	190
Tabla 7.10 Ensayos llevados a cabo y parámetros analizados.	191

Tabla 7.11 Ensayos realizados sobre probetas cilíndricas.	193
Tabla 7.12 Resultados sobre datos suministrados por plantas de hormigón.	195
Tabla 7.13 Resultado del ANOVA para las dosificaciones HAC1 y HAC2.	197
Tabla 7.14 Resultado del análisis de varianza (HAC3, HAC3F, HAC3C y HAC4).	199
Tabla 7.15 Estadísticos calculados para las dosificaciones HAC1 y HAC2.	200
Tabla 8.1 Dosificación previa para pilotes.	215
Tabla 8.2 Dosificación para el hormigón de las pilas.	216
Tabla 8.3 Resultados de los ensayos previos sobre el primer encepado.	217
Tabla 8.4 Cálculo de la presión prevista sobre el encofrado.	228

