

DEPARTAMENTO DE ARTE, CIUDAD Y TERRITORIO

Reflexiones y Reflejos: Arte y Arquitectura (Bienio 2002 – 2004)



**UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA**



TESIS DOCTORAL

**PANELES PREFABRICADOS PARA FACHADA
CON HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES**

Realizada por

RICARDO JAVIER SANTANA RODRÍGUEZ

Dirigida por

Dr. D. JOSÉ MANUEL PÉREZ LUZARDO

Las Palmas de Gran Canaria, 2006

49/2005-06

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
SUBDIRECCIÓN DE TERCER CICLO Y POSTGRADO

Reunido el día de la fecha, el Tribunal nombrado por el Excmo. Sr. Magfco. de esta Universidad, y finalizada la defensa y discusión de esta tesis doctoral, los señores miembros del Tribunal, emiten la siguiente calificación global:

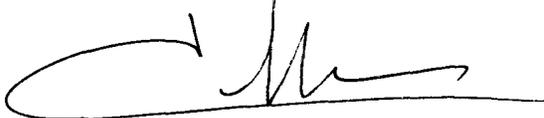
SOMRESALIENTE "CUM LAUDE" POR UNANIMIDAD

Votos favorables:

CINCO

Las Palmas de Gran Canaria, a 17 de julio de 2006

El Presidente: Dr. D. José Calavera Ruiz



El Secretario: Dr. D. Jose Luis Medina Miranda



El Vocal: Dr. D. Jaime Fernández Gómez



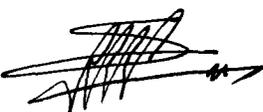
El Vocal: Dr. D. Francisco García-Ormaechea Quero



El Vocal: Dr. D. Carlos Guigou Fernández



El Doctorando: D. Ricardo Javier Santana Rodríguez

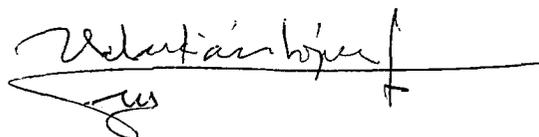


Dr. D. Juan Sebastián López García, SECRETARIO DEL DEPARTAMENTO DE Arte, Ciudad y Territorio DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA,

CERTIFICA,

Que el Consejo de Doctores del Departamento en su sesión de fecha 17 de mayo de 2006 tomó el acuerdo de dar el consentimiento para su tramitación, a la tesis doctoral titulada "Paneles prefabricados para fachada con hormigón de altas prestaciones" presentada por el doctorando D. Ricardo Javier Santana Rodríguez y dirigida por el Doctor D. José Manuel Pérez Luzardo

Y para que así conste, y a efectos de lo previsto en el Artº 73.2 del Reglamento de Estudios de Doctorado de esta Universidad, firmo la presente en Las Palmas de Gran Canaria, a dieciséis de mayo de dos mil seis

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Juan Sebastián López García', written over a horizontal line.

Anexo II

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

Departamento: Arte, Ciudad y Territorio

Programa de Doctorado: Reflexiones y Reflejos: Arte y Arquitectura
(Bienio 2002 – 2004)

Título de la Tesis

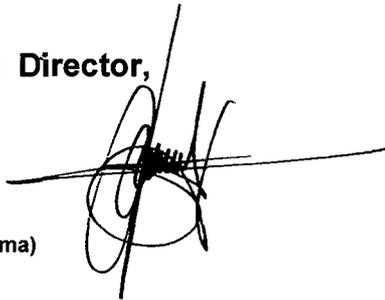
"Paneles prefabricados para fachada con hormigón de altas prestaciones"

Tesis Doctoral presentada por D. Ricardo Javier Santana Rodríguez

Dirigida por el Dr. D. José Manuel Pérez Luzardo

El Director,

(firma)



El Doctorando,

(firma)



Las Palmas de Gran Canaria, a 11 de mayo de 2006

TÍTULO _____

INDICE _____

Agradecimientos _____

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN _____

1.1 ANTECEDENTES _____

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN _____

1.3 METODOLOGÍA _____

CAPÍTULO 2 ESTADO DE LA CUESTIÓN _____

2.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO _____

2.2 PRESENTACIÓN DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN _____

2.3 ANÁLISIS DE LA CUESTIÓN _____

2.4 CONCLUSIONES _____

PANELES PREFABRICADOS PARA FACHADA CON HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES

TÍTULO.....	I
ÍNDICE.....	III
Agradecimientos.....	VII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	3
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.3 METODOLOGÍA.....	9
CAPÍTULO 2: ESTADO DE LA CUESTIÓN.....	11
2.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO.....	13
2.2 PREFABRICACIÓN DE HORMIGÓN.....	14
2.2.1 Antecedentes históricos en prefabricación.....	15
2.2.2 Posibles definiciones de `prefabricación´.....	20
2.2.3 Ventajas e inconvenientes de la prefabricación.....	24
2.2.4 Paneles de fachada prefabricados con hormigón.....	37
2.2.5 Contexto normativo en prefabricados de hormigón para fachada.....	49
2.2.6 Realizaciones con prefabricados de hormigón para fachada en Canarias.....	52
2.2.7 Consideraciones particulares a la prefabricación de hormigón.....	62
2.3 HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES.....	65
2.3.1 Antecedentes históricos.....	65
2.3.2 <u>El hormigón de altas resistencias - HAR -</u>	69
2.3.2.1 Observaciones previas del hormigón de altas resistencias.....	71
2.3.2.2 Materiales constituyentes del hormigón de altas resistencias.....	73
2.3.2.3 Microestructura del hormigón de altas resistencias.....	83
2.3.2.4 Consideraciones particulares del hormigón de altas resistencias.....	85
2.3.3 <u>El hormigón de altas prestaciones - HAP -</u>	87

2.3.3.1	Posibles definiciones del hormigón de altas prestaciones.....	88
2.3.3.2	Pautas en la ejecución del hormigón de altas prestaciones.....	96
2.3.3.3	Puntualizaciones técnicas del hormigón de altas prestaciones.....	99
2.3.3.4	Consideraciones particulares del hormigón de altas prestaciones.....	104
2.3.4	<u>El hormigón autocompactante - HAC -</u>	106
2.3.4.1	Acercamiento general al hormigón autocompactante.....	106
2.3.4.2	Antecedentes específicos al hormigón autocompactante.....	108
2.3.4.3	Definición del hormigón autocompactante -HAC-.....	112
2.3.4.4	Propiedades del hormigón autocompactante.....	116
2.3.4.5	Realizaciones con hormigón autocompactante.....	127
2.3.4.6	Normativas de referencias del hormigón autocompactante.....	138
2.3.4.7	Requisitos del hormigón autocompactante.....	141
2.3.4.8	Composición de la mezcla.....	165
2.3.4.9	Producción, ejecución, curado y control de calidad.....	177
	BIBLIOGRAFÍA PARTICULAR	183
	CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN CANARIO	193
3.1	INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO.....	195
3.2	HORMIGÓN EN CANARIAS.....	196
3.3	ÁRIDOS PARA HORMIGÓN EN CANARIAS.....	212
3.4	CONSIDERACIONES ACERCA DEL HORMIGÓN EN CANARIAS.....	220
	BIBLIOGRAFÍA PARTICULAR	226
	CAPÍTULO 4: PROGRAMA EXPERIMENTAL	229
4.1	INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO.....	231
4.2	OBJETIVOS Y EXPOSICIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	232
4.3	MÉTODO DE DISEÑO.....	238

4.3.1 Hormigón convencional - HC -	240
4.3.2 Hormigón de altas resistencias - HAR -	244
4.3.3 Hormigón de altas prestaciones - HAP -	249
4.3.3.1 Hormigón de altas prestaciones pigmentado - HAPP -	251
4.3.4 Hormigón de altas prestaciones - HAC -	252
4.4 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS APLICADOS	261
4.5 EQUIPAMIENTO DE LABORATORIO PARA LA INVESTIGACIÓN	269
BIBLIOGRAFÍA PARTICULAR	279
CAPÍTULO 5: VALORACIÓN DE RESULTADOS	281
5.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO	283
5.2 HORMIGÓN CONVENCIONAL - HC -	285
5.2.1 Componentes del hormigón	286
5.2.2 Dosificación del hormigón base	302
5.3 HORMIGÓN DE ALTAS RESISTENCIAS - HAR -	304
5.4 HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES - HAP -	309
5.4.1 Hormigón de altas prestaciones pigmentados - HAPP -	315
5.5 HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE - HAC -	318
BIBLIOGRAFÍA PARTICULAR	334
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS	345
CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA	359
<u>DOCUMENTO DE ANEJOS</u>	
ANEXO AL CAPÍTULO 4º	371
ANEXO AL CAPÍTULO 5º	409

AGRADECIMIENTOS

Estos últimos cuatro años de trabajo de investigación, cuyo resultado se recoge en los dos tomos de la presente tesis doctoral, no hubieran sido concebibles sin el apoyo y aliento de muchas personas.

En primer lugar a mi esposa e hijo, porque a pesar de todo el tiempo de dedicación que les he restado, siempre me han regalado la mejor de sus sonrisas.

A mis padres, quienes siempre me han sabido educar con mucho cariño.

A José Manuel, mi padre científico, por la dedicación y rigurosa crítica con la que siempre me orientó en el trabajo.

Al Vicerrectorado de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, al Departamento de Construcciones Arquitectónicas y a la empresa *DOLCAN, S.A.* por mostrar interés en mi investigación y facilitarme la recogida de datos del estudio.

A todo el personal del Laboratorio de Materiales de Construcción, especialmente al profesor Cantero.

Al personal de Control de Calidad y del Laboratorio de la empresa *DOLCAN*.

Al Instituto Técnico de Materiales y Construcción de Madrid *INTEMAC*, a la *Technische Universität Wien* y al Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones *IECA Canarias* por tantas y tan valiosas aportaciones.

Al profesor Juárez, al equipo de informáticos y a mi hermano Andrés que colaboraron enérgicamente en el desarrollo del final de esta tesis.

Me gustaría dar las gracias igualmente al Departamento de Arte, Ciudad y Territorio de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria por autorizar la presentación de esta tesis y colaborar en las cuestiones administrativas.

Gracias a todos aquellos familiares y amigos que afectuosamente me han animado en múltiples ocasiones.

A todos: Muchas gracias.

1.1 ANTECEDENTES

El hormigón como material de construcción constituye uno de los productos más utilizados en el campo de la edificación, debido, entre otros factores, a la buena relación coste-prestación que ofrece. No cabe duda de que las prestaciones que debe ofrecer el material en función de la calidad del producto terminado y la durabilidad, en este sentido, la elección de hormigón de altas prestaciones ofrece ventajas que no imaginamos en el momento de la composición general de un hormigón está convencional. En los años 70 y los años 80, se empezaron a utilizar hormigones de altas prestaciones en la construcción de estructuras de hormigón armado, aplicadas a la construcción de estructuras de hormigón armado.

Por otra parte, la prefabricación de elementos de hormigón de altas prestaciones, no era una opción viable hasta los años 80, debido a la necesidad de disponer de un sistema de producción de hormigón de altas prestaciones que permitiera la fabricación de elementos de hormigón de altas prestaciones.

CAPÍTULO 1:

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El hormigón como material de construcción constituye, como es bien sabido, uno de los productos más utilizados en el campo de la edificación. Este hecho es debido, entre otros factores, a la buena relación coste-prestación que presenta este material. No cabe duda de que las prestaciones que debe ofrecer el hormigón tienen que ir en beneficio de la calidad del producto terminado y favorecer su trabajabilidad. En este sentido, la ejecución de hormigón ha evolucionado en los últimos años hasta ofrecer unas cualidades que no imaginábamos hace tres décadas. La composición general de un hormigón está constituida por el cemento, el agua, los áridos y los aditivos. Estos últimos han sido los principales partícipes del desarrollo espectacular de la industria del hormigón. Podemos afirmar que la química aplicada a la construcción ha redundado en beneficios evidentes.

Por otra parte, la prefabricación parece constituir el futuro de los sistemas de construcción. No nos referimos necesariamente a la prefabricación integral, pero sí al menos a la ejecución de elementos prefabricados que posteriormente se montan y combinan con construcción *in situ*. Nos resulta evidente que el aumento progresivo de elementos prefabricados con posterior montaje unido a la lógica disminución de los sistemas constructivos tradicionales redundará en mejoras de calidad, precio, durabilidad y seguridad.

Dentro de estos sistemas industrializados, la prefabricación con hormigón suma a las ventajas de la prefabricación las excelencias del material ciclópeo. Estas ventajas del hormigón vienen demostradas por la experiencia general a lo largo de todo el siglo XX y acentuadas por los últimos avances científicos o tecnológicos acerca de las prestaciones de que es capaz el material. En un comentario reciente de

la arquitecta Hadid¹ expresaba su convencimiento de que las nuevas tecnologías han cambiado la arquitectura actual y presupone que “el siguiente paso será la conexión entre la construcción y la tecnología digital, que hará posible construir cada vez más con elementos prefabricados” (OTERO y ALONSO, 2006).

En Canarias, esta diferencia entre los sistemas prefabricados de hormigón con altas prestaciones frente a los procedimientos constructivos convencionales se agudiza. Por una parte, la empresa de elementos de prefabricados de hormigón surge en la pasada década de los ochenta - salvo excepciones puntuales - y se desarrolla llamativamente durante estos últimos años. Además presenta un potencial desarrollo futuro dado las necesidades de edificación sistemática que presenta nuestra sociedad (Edificios de hoteles, aparcamientos, oficinas y principalmente edificios industriales). Todo ello a la vista de la ordenación urbanística de estos años que ha generado solares urbanizables en serie. Por otra parte y especialmente para la tesis que nos ocupa, decimos que se agudiza porque, antagónicamente, el hormigón que se produce en Canarias difiere mucho de las mezclas que se realizan paralelamente en la industria europea de la construcción. Mientras que en el ámbito internacional la ciencia del hormigón ha generado en la última década avances revolucionarios en relación a las prestaciones ofrecidas por este material, en Canarias la ejecución del hormigón confirma que no sigue esta línea de progresión.

Podemos sintetizar que por un lado desde la década de los sesenta y hasta los ochenta se desarrollaron los hormigones de altas resistencias a nivel internacional; que en los años ochenta se plantean los hormigones de altas prestaciones y con posterioridad aparecen los hormigones autocompactantes. Por otro lado, en Canarias, hasta finales de los años ochenta no hemos utilizado de manera común

¹ Zaha Hadid es una de las más importantes figuras de la arquitectura mundial y además está especializada en construcción con hormigón de altas prestaciones. Obras ejemplares con hormigón son; Estación de bomberos en Weil (Alemania), Trampolín de saltos de Bergisel (Innsbruck-Austria), Centro de la Ciencia Phaeno de Wolfsburg (Alemania), Central BMW en Leipzig (Alemania).

los aditivos y durante la pasada década hemos avanzado hacia los hormigones de altas resistencias y de altas prestaciones en el ámbito científico principalmente, lo que ha incidido ligeramente en la industria de la construcción canaria. Esta cuestión no refleja la realidad del sector de la construcción que ha sido uno de los grandes ejes potenciales de la economía canaria de la última década.

Nos resulta incuestionable que una de las razones por la que este desarrollo no se ha producido en nuestra región es la debida a los materiales constituyentes del hormigón. Además de los cementos puzolánicos característicos en nuestras Islas, están principalmente las particularidades de los áridos que empleamos en la ejecución de dichos hormigones. Los estudios y la experiencia demuestran que éstos influyen de manera trascendental en el comportamiento y características del hormigón. En los últimos veinte años, las investigaciones científicas acerca del hormigón en el ámbito universitario de Canarias no han dejado de proporcionar resultados. Sin embargo, consideramos desde nuestra Escuela de Arquitectura de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria que son imprescindibles unas investigaciones experimentales que alcancen los hormigones de altas prestaciones.

Ante esto nos planteamos una aplicación en Canarias del estado del conocimiento del hormigón. Tras el análisis desarrollado en el interior de esta tesis comprobaremos como uno de los avances más revolucionarios dentro del grupo de los hormigones de altas prestaciones lo representa el autocompactante. En relación a este último, podemos afirmar que se trata de uno de los desarrollos más espectaculares dentro del ámbito de los materiales de construcción, que proporciona unos beneficios evidentes en la arquitectura actual.

Sin embargo y para el caso canario, la experiencia nos demuestra que una de las grandes dificultades ha sido conseguir una trabajabilidad en el hormigón fresco garantizando una resistencia, durabilidad y calidad en el hormigón endurecido.

Este trabajo de investigación buscará como fin práctico la ejecución de paneles prefabricados para fachada con un hormigón autocompactante de materiales constituyentes canarios, entendiendo que en esta pesquisa se lograrán otros avances colaterales y vinculados al desarrollo del hormigón como material de construcción.

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Dentro del ámbito que concierne al estudio del comportamiento del hormigón en estado fresco, el desarrollo de la investigación que comprende el presente trabajo, se encuentra centrado fundamentalmente, en el esclarecimiento de la conducta reológica de los hormigones con materiales cementicios canarios.

El presente trabajo tiene como principal objetivo el dar conocimiento práctico a las propiedades del hormigón en la fase de ejecución, cuando con éste se pretende la autocompacidad. La singularidad de los materiales constituyentes del hormigón en Canarias, especialmente los cementos puzolánicos y los áridos, reflejarán este desarrollo para un caso extremo. Para esta investigación eminentemente experimental se buscará apoyo en bases científicas acerca del comportamiento del hormigón de altas prestaciones. De esta forma, podremos dar solución a la necesidad actual de su aplicación. Además, esta investigación se ha dirigido a la consecución de otros objetivos de carácter general que complementan al principal y que pasan a ser presentados, dando pié al desarrollo de la presente investigación:

- 1º. Investigación documental y desarrollo de un argumento que vincule el momento actual del conocimiento acerca de los hormigones de altas prestaciones con el uso aceptado del hormigón en Canarias. Para esto desplegaremos la evolución que ha tenido el hormigón en las últimas décadas y las características singulares que condicionan el hormigón usual en nuestras Islas.

- 2º. Identificación y análisis de los factores que afectan o puedan influir en las propiedades de trabajabilidad del hormigón con materiales cementicios canarios.
- 3º. Consecución de un hormigón autocompactante canario que garantice la capacidad de llenado, la capacidad de paso y la resistencia a la segregación. Este propósito estará encaminado a la mejora de las condiciones de trabajo que están relacionadas con el hormigonado, además de a las mejoras de la calidad del elemento constructivo terminado.
- 4º. Exposición de los sistemas constructivos de prefabricación como un modelo ejemplar de lo que debe ser una buena arquitectura de futuro. En este sentido, los ensayos experimentales de laboratorio serán aplicados a un panel prefabricado de hormigón para fachada que representa la cara vista del edificio y la imagen paisajística de un polígono industrial.

Para alcanzar estos objetivos mencionados es requisito primordial la realización del programa experimental que permitirá desvelar en qué medida y de qué forma afectan las determinantes condiciones y propiedades de los constituyentes del hormigón experimental en la trabajabilidad. En especial, la de los fenómenos que afectan a la reología entre los materiales durante el proceso de hormigonado. Exactamente hemos comprobado los aspectos de fluidez, resistencia al bloqueo entre armaduras y tendencia a la segregación.

Como en todo trabajo de investigación experimental, la obtención de los resultados viene limitada por las restricciones de su campo de actuación. Se presentan a continuación los ámbitos dentro de los cuales están desarrollados estos experimentos:

- 1º. Campo teórico: aplicación de los hormigones de altas prestaciones, en la producción de un autocompactante con materiales cementicios canarios para

la valoración y comprensión de las propiedades que afectan al hormigón fresco, tales como el flujo de asentamiento, flujo de asentamiento con bloqueo de armaduras, capacidad de fluidez, resistencia a muestras de segregación. Además, valoramos los datos obtenidos en el hormigón endurecido como las resistencias mecánicas, retracción, porosidad y aspecto estético.

- 2º. Límites temporales: la investigación experimental, técnica y documental se ha llevado a cabo en un período que comprende aproximadamente tres años (mayo de 2003 - mayo de 2006).
- 3º. Lugar de trabajo: la investigación se ha desarrollado en el Laboratorio de Materiales y otros espacios de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, ubicada en el campus universitario de Tafira, del término municipal de Las Palmas de Gran Canaria. Los experimentos se han realizado conforme a la disponibilidad del equipo y las instalaciones. La aplicación práctica en paneles de fachada prefabricados se ha efectuado en la empresa *DOLCAN CANARIAS S.A.*, localizada en el polígono industrial de Arinaga, del término municipal de Agüimes.
- 4º. Unidades reglamentadas de análisis: hemos comprobado que no existe una reglamentación estricta que afecte al hormigón autocompactante a día de hoy. Tras analizar las guías más importantes acerca del tema, hemos considerado que las especificaciones de las normativas italianas sobre ensayos de hormigón fresco autocompacto se ajustan a los requisitos de nuestros ensayos, por tanto, nos hemos ajustado a éstas. Estas normativas citadas las desplegamos en un anexo con el fin de tenerlas presente en el desarrollo y lectura de la tesis. Además, hemos atendido a las normas

europas -EN- para ejecución de probetas y para ensayos de resistencia mecánica a compresión.

5º. Contexto físico: la investigación experimental se ha efectuado en Gran Canaria, en condiciones normales, con temperaturas y humedad ambiente típicas de la zona y época del año.

1.3 METODOLOGÍA

Para conseguir los objetivos propuestos, se han realizado distintos trabajos, los cuales dan contenido a los diferentes capítulos de esta tesis. A continuación, se describe brevemente la metodología seguida en cada uno de ellos.

Tras esta introducción y en el siguiente capítulo se presenta el estado del saber acerca del argumento. En primer lugar exponemos la cuestión referente a los prefabricados. Tras ubicarlos y definirlos, se comprueba cuáles son las ventajas e inconvenientes de la prefabricación. Seguidamente, nos centramos en los paneles de fachada prefabricados con hormigón y se muestra lo más representativo de la realización en Canarias.

Dentro del mismo capítulo segundo, se despliega la evolución del hormigón. Unas referencias históricas nos dan paso a los hormigones de altas resistencias (HAR) como antecedentes previos a los hormigones de altas prestaciones (HAP). Presentamos la definición y la relación precisa entre las diferentes denominaciones y consideraciones del producto cementicio. En este ámbito, se realiza la especificación del hormigón autocompactante (HAC).

En el tercer capítulo queda determinado el conocimiento actual del hormigón canario. Se resaltan las peculiaridades de nuestra mezcla a través de las referencias científicas aplicadas a Canarias. Destacamos entre estas particularidades el uso de cementos puzolánicos, la relación entre el agua y el cemento, así como las características petrográficas de los áridos.

Como capítulo cuarto fue agrupado y descrito el programa experimental de los hormigones de altas prestaciones realizado. Una vez descritos los objetivos concretos de nuestra campaña práctica, se pasa a detallar el método de diseño para las dosificaciones. En este apartado, así como en los relativos al estado del arte o de valoración de resultados, se particulariza en función de cada uno de los tipos de hormigón - *convencional (HC), HAR, HAP, pigmentado (HAPP) y HAC* -. También se exponen los ensayos aplicados y el equipamiento utilizado para éstos. Anexo a este capítulo desplegamos las normativas de referencia que nos han servido en el desarrollo de los ensayos empíricos.

En el capítulo quinto se analizan y valoran los aspectos que se refieren a la realización de los ensayos. Se presentan los resultados y se contrastan con el hormigón convencional que se ha tomado como referente inicial, así como entre todos los ensayos realizados. Además, el anejo a este capítulo se considera imprescindible para la lectura de los resultados.

El sexto capítulo comprende la presentación de las conclusiones derivadas de la presente investigación, aportando en primer término, cuales han sido las consideraciones más significativas de carácter general alcanzadas. A continuación se aporta de manera más detallada las peculiaridades específicas a considerar en el ámbito de la realización de hormigón autocompactante con materiales constituyentes canarios. Para terminar este capítulo, se aporta una serie de reflexiones acerca de hacia donde podrían estar dirigidas las futuras investigaciones en este campo. Se destaca igualmente el cuantioso número de ensayos realizados que guarda en ellos un potencial conjunto de soluciones.

Por último, en el apartado de bibliografía se recogen las referencias más significativas utilizadas en el transcurso del trabajo presentado.

CAPÍTULO 2:

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

Tras el inicial capítulo que explicaba esta tesis experimental, en la cual exteriorizábamos las circunstancias previas al comienzo del trabajo, planteábamos los objetivos preliminares a satisfacer durante el periodo que debía durar este compromiso y la metodología que pretendíamos continuar para lograr éstos, pasamos al siguiente capítulo.

En esta metodología se percibía que el primer paso a seguir debía ser un acercamiento a la ciencia desde la propia lectura y el discernimiento de lo leído. En este sentido, este primer gran apartado tras la introducción comprende el estado del saber acerca del tema en cuestión. Aunque en realidad la lectura ha ido paralela en el tiempo mientras se ejecutaban las prácticas experimentales, creemos que es fundamental exponerlas en el primer apartado para mostrar nuestro desarrollo a partir de éste.

El tema que tratamos en esta investigación es muy ambiguo y por esta razón muy amplio. A pesar de que el título refleja un elemento concreto dentro de la construcción, en realidad ofrece un abanico de temas abiertos. Esta serie de aspectos pretendemos tratarlos profundamente hasta el recinto que nos interesa. Este punto no es otro que el tratar una visión canaria sobre el hormigón. En este capítulo dedicado al estado del arte, desplegaremos en primer lugar un apartado referente a los prefabricados y concretamente a los de hormigón. A continuación nos centraremos en el hormigón como material constructivo que es capaz de producir estos elementos prefabricados. En esta andadura y tras situarnos en los referentes históricos mostraremos el hormigón de altas resistencias - HAR -, como antecedente directo del hormigón de altas prestaciones - HAP -. Explicaremos y desarrollaremos según nuestro análisis qué significa cada uno de estos calificativos que muestran cualidades elevadas respecto a otras argamasas. De esta manera, emplaza cada uno de los diferentes tipos de hormigón en la evolución presente. En

este proceso mostraremos al hormigón autocompactante - HAC - como uno de los hormigones de altas prestaciones en la actualidad. Al considerar a este último como el máximo representante del espectacular desarrollo conseguido por la ciencia del hormigón, lo desarrollamos unitariamente y como último punto del estado del arte a nivel general.

Es necesario señalar también en esta introducción que este capítulo se refiere al estado de la ciencia a nivel internacional y general, separando concientemente el estado del conocimiento del hormigón canario para el capítulo siguiente por lo específico de sus circunstancias y de sus referencias. Es por tanto este capítulo segundo la leyenda general a seguir en todo el trabajo y el siguiente título tercero la reseña definida para la compresión de nuestros hormigones canarios.

2.2 PREFABRICACIÓN DE HORMIGÓN

La actividad constructiva actual viene determinada por factores tecnológicos, económicos y sociales manifiestos en las últimas décadas. Nos referimos en concreto a la fuerte competitividad en el mercado, la cual nos lleva a decidir en cada proyecto el material así como la técnica de ejecución. Para esta elección debemos atender a las altas demandas de confort de la población en general, además de las necesarias condiciones de seguridad laboral de los operarios de la construcción. A ello debemos sumar la necesidad de reconocer la creciente conciencia medioambiental que nos obliga a buscar materiales y métodos respetuosos con nuestra naturaleza.

En este título mostraremos que la prefabricación con hormigón cumple correctamente con los cometidos que se espera de una buena construcción. Desarrollaremos el significado de la prefabricación con sus ventajas e inconvenientes. También expondremos que su procedimiento industrializado facilita el desarrollo de nuevas tecnologías y materiales. En tal sentido, se evidencia

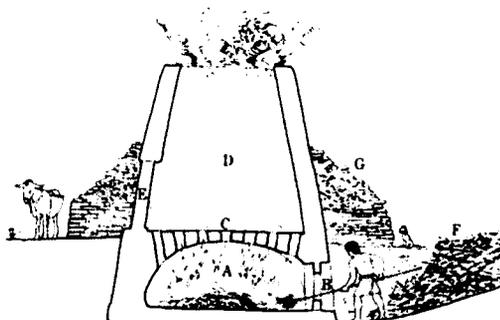
que este método de construcción proporciona un camino idóneo para la investigación con nuevos hormigones.

2.2.1 Antecedentes históricos en prefabricación

Una ligera aproximación a la historia nos ayuda a centrarnos en el significado de la prefabricación en la actualidad. Tihamer Koncz, en sus importantes tratados acerca de prefabricación y de construcción industrializada, reflexiona sobre la influencia de la técnica y los materiales en la arquitectura a través del tiempo (KONCZ, 1968 y 1977; entre otros). Nos muestra la complejidad de la edificación, las características de la manufacturación y nos desarrolla los factores que influyen en la industrialización de la construcción.

Es evidente que la técnica y los materiales influyen sobre la arquitectura. Siempre han existido relaciones recíprocas entre la técnica y sus materiales con la arquitectura en su desarrollo. “Los egipcios construían con piedra por ser este el material disponible, siendo su consecuencia las luces entre apoyos que se podían salvar por estos elementos sin necesidad de armadura. El material y la técnica han permanecido igual en la arquitectura griega.

La madera permitió producir mayores luces. Algunas piedras y el mármol permitían el arte decorativo. Los romanos, con la cúpula, aumentaron notablemente las luces de las construcciones. El arquitecto debía regirse por el estado del desarrollo de la técnica de la bóveda y de las propiedades de los



Proceso de prefabricación de ladrillos

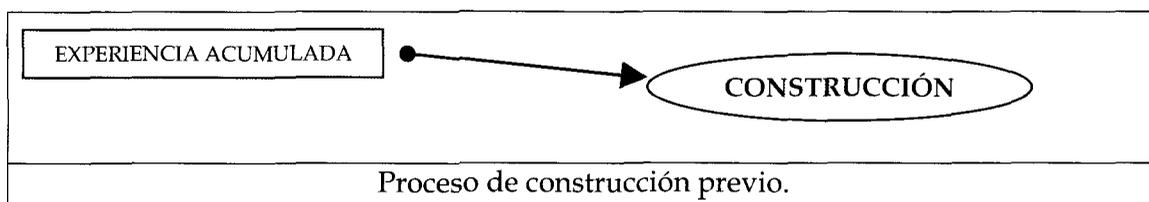
materiales. Las iglesias de la Edad Media reflejan los principios de la estática conocidos entonces. Gracias al acero se pudieron aceptar los esfuerzos de tracción y, mediante los tirantes, las fuerzas horizontales debidas al peso propio. Con la

utilización del hormigón armado y la combinación de las buenas propiedades de ambos materiales, hormigón y acero, se impulsó la técnica de la construcción” (KONCZ, 1977: p. 9).

Hasta el siglo XVIII, parece que los filósofos eran los únicos que se sentían responsables de cualquier nueva forma de pensamiento, eran todavía partidarios de la idea de que la Grecia clásica había resuelto todos los problemas en arquitectura.

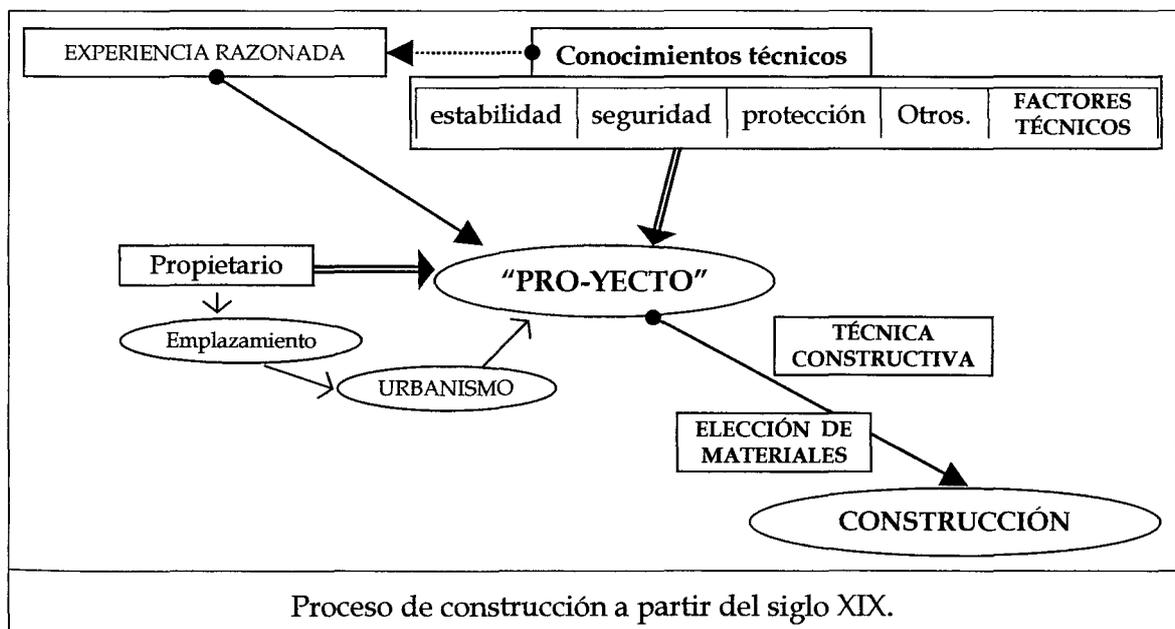
En este mismo periodo comenzó Paxton a construir su Palacio de Cristal en Londres y también el jardinero Monier inventó el hormigón armado debido al resquebrajamiento de sus macetas. Los primeros resultados de estas nuevas técnicas fueron; en 1747, la *École des ponts et chaussées* de París, en acero de perfiles; en 1776, el puente *Coalbrookdale* en hierro fundido; en 1801, el primer puente sin soportes sobre el río Támesis; entre 1830 y 1840 la construcción de grandes hangares en París; culminando este periodo con la construcción de la Torre Eiffel en 1889 (MEYER-BOHE, 1969). Parece con estos datos que el hombre importante en la construcción era entonces el ingeniero, quedando el arquitecto relegado a simple realizador de fachadas.

Los primeros pasos de la industria de prefabricación en hormigón también datan de esta época como nos lo demuestra la fabricación de un barco en Francia en 1848 por parte de Lambot; la jardinera realizada por Monier (Francia - 1849), Coignet - vigas (Francia - 1891), *Wayss & Freitag* - pilares (Alemania - 1906), Edison - edificios industriales (EE.UU. - 1907), Attebury - vivienda (EE.UU. - 1908) (BRUCE y SANDBANK, 1972).

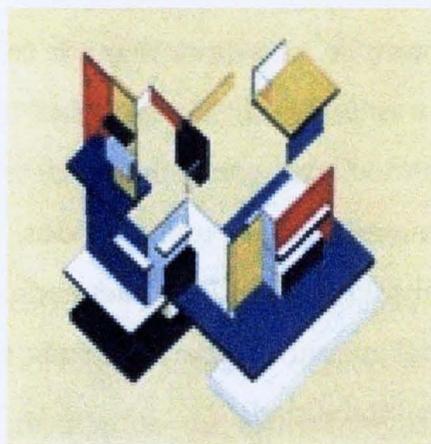


La combinación de múltiples factores sociales, económicos y técnicos en la Primera Revolución Industrial instauran la mecanización de la realización constructiva. La complejidad de la construcción se hace cada vez mayor. Ha de cumplir, en primer lugar, la función exigida por el propietario. Otros factores como la estabilidad, la seguridad frente a incendios, la protección térmica, acústica y atmosférica son también determinantes en su técnica constructiva y elección de materiales. De todos modos, la arquitectura del edificio no puede desarrollarse absolutamente libre, depende de la forma del solar, de su situación y alrededores del mismo. Deberá además respetar las normas de construcción, urbanismo y habitabilidad.

Surge en esta época la importancia del proyecto como tal. La complejidad de la ejecución material del edificio hace necesario el "pro-yectar", que viene a significar "pre-hacer", es decir, previo a la ejecución material de las obras (MARTÍN, 1997: pp. 59-71).

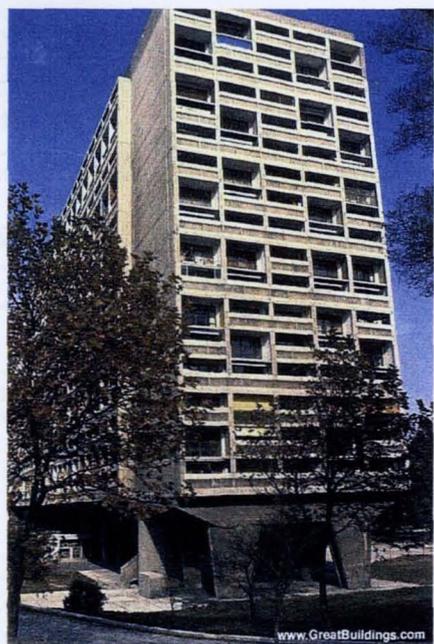


Aparte de la Revolución Industrial, otro de los motivos para esta nueva construcción lo constituyó la 'Revolución Óptica', es decir, el aumento de capacidad perceptiva e imaginativa del hombre. Las perspectivas aéreas de los grandes maestros holandeses sustituyeron las ya anticuadas ideas frontales. Theo Van Doesberg pintó en 1920 una 'casa moderna', un entrelazamiento de superficies planas con cubos transparentes que se construyó muchos años más tarde (MEYER-BOHE, 1969). Estos gráficos proyectan construcciones con imaginados elementos industrializados.



(Van Doesberg) Ideas a principios del siglo XX

Durante el periodo 1950-1970, los sistemas cerrados a base de grandes paneles fueron importantes en Europa. En estas décadas, impusieron de forma implacable sus leyes de actuación en pro de la economía y de espaldas a la arquitectura. No nos parece necesario desarrollar estos métodos, ya que no aportarían aspectos importantes para el desarrollo de nuestro trabajo de investigación y podrían desvirtuar este primer acercamiento a la cuestión. Para ahondar más en este contenido hemos acudido a Bohdan Lewicki que nos despliega los métodos y resultados de la construcción industrializada en Polonia, la U.R.S.S. y el resto de los países del Este desde 1946 hasta finales de los sesenta (BASSO; AGUIRRE; ANABITARTE; RICART; KRISTENSEN; LEWICKI; BLACHÉRE y FERNÁNDEZ, 1968: pp.



Unidad de habitación de Marsella.
Arq. Le Corbusier

195-232) y a Svend Kristensen que nos muestra múltiples aspectos interesantes sobre la prefabricación ejecutada en Dinamarca y Alemania en la década de los cincuenta y sesenta que bien puede representar las ejecuciones en la Europa occidental (BASSO et al., 1968: pp. 165-194). Por otra parte, Berndt nos amplía la información sobre múltiples sistemas de prefabricación usados en Alemania en la década de los sesenta, nos expone aspectos técnicos que debemos tener en cuenta para la ejecución de viviendas con prefabricados de hormigón. Hoy en día se ha superado netamente los periodos de supervalorar la técnica en detrimento de la sensibilidad. Casi todas las tendencias extremistas en el arte de la construcción se han refundido en una síntesis cabal y bien proporcionada (BERNDT, 1969).

Nuestro país debido a las circunstancias históricas que nos llevaron a la autarquía no caminaba por igual recorrido y nos encontramos inicialmente con que “la prefabricación de elementos de hormigón pretensado para la edificación se inició en España en el año 1945 con la fabricación de una vigueta pretensada mediante alambres de 2mm de diámetro en la fábrica de Pacadar en Madrid. La longitud de la vigueta era de 3,50 m. y el canto de 16 cm. Desde entonces, han transcurrido casi 60 años. En este periodo se ha desarrollado una auténtica industria de prefabricados para la edificación que ofrece soluciones eficaces, económicas, de alta tecnología y calidad, que se integran habitualmente en el proceso constructivo de la edificación” (BURÓN; PELÁEZ; GÓMEZ y VALENTÍN, 2002: p. 362).

Posteriormente, con el comienzo de la década de los setenta se inicia la crisis. Esta dificultad de la industria de la prefabricación tiene que ver más con circunstancias sociales o económicas que propiamente técnicas. Datos que revelan este cataclismo fueron la crisis energética 1970-73, el aumento de viviendas unifamiliares en detrimento de las viviendas sociales en estos años y las nuevas normativas técnicas. En España, coincide en el tiempo el inicio de la expansión de

los sistemas prefabricados, entre 1973 y 1975, con la crisis de la construcción. Se pasan de 370.000 viviendas construidas en 1974 a 250.000 en 1979 (SALAS, 1988). La estructura del sector construcción no era la idónea para una actuación industrial. En la década de los setenta la proporción entre promoción estatal y libre -20% y 80%- era prácticamente la inversa de las medias de los países de la Europa occidental. En aquel momento, la construcción industrial de viviendas conlleva una serie de gastos fijos, cargas y amortizaciones que no gravan a la construcción tradicional. Por otra parte, la aportación del sistema industrial prefabricado al precio final de venta era modesto -el 15%- en elementos constructivos, que resultaba en sólo un 3% del precio final de la vivienda, necesitando por el contrario inversiones muy importantes. A estas razones expuestas hay que añadir la actuación en función de sistemas foráneos de desacertada elección, además de la falta de apoyo desde la Administración para iniciar este tipo de actuaciones. Por otra parte, en el caso español se tiene el convencimiento de que el ocaso de los sistemas de grandes paneles no es imputable al producto; y es que las viviendas realizadas, por lo general, reproducían las características y prestaciones de promociones tradicionales del mismo estatus (SALAS, 1988).

Con respecto a las Islas Canarias, Aguila García deja constancia de que la empresa *Dragados y Construcciones* monta en Las Palmas de Gran Canaria, una fábrica de la patente *Camus*. Esta industria tuvo una producción de más de mil viviendas al año, en un turno de trabajo (AGUILA, 1974: p. 22).

2.2.2 Posibles definiciones de 'prefabricación'

Cuando hablamos de prefabricación, no siempre estamos hablando de una prefabricación integral, que sería el último estadio, sino que también nos referimos a la prefabricación de una parte de las obras, que pueden ser especialmente elementos de estructura y, en nuestro caso, cerramientos de fachada.

Nos parece interesante aquí resaltar el Seminario de Prefabricación nacido en 1967 en la Cátedra de Historia del Arte de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de Madrid, con “el objetivo de investigar las implicaciones estéticas, técnicas, sociológicas o laborales que la prefabricación planteaba” (FERNÁNDEZ; AGUILÓ; ARANDES; ECHEVARRÍA; ESPINOSA; LÓPEZ y SALAS, 1974). En este trabajo se relacionan una serie de definiciones acerca de la prefabricación de instituciones y personalidades tan ilustres como el Atelier d’Urbanisme et d’Architecture de Paris, G. Blachère, F. Cassinello, el Instituto Eduardo Torroja, T. Koncz, B. Lewicki... De éstas, nos quedamos con las de Lewicki y Koncz cuando se refieren a la prefabricación como “un método industrial de construcción en el que los elementos fabricados por métodos de producción en masa fuera del lugar de su destino definitivo, son montados en obra posteriormente”.

En algunos casos este seminario trata la prefabricación de manera muy idealizada, al comentar, por ejemplo, lo imprescindible de realizar la construcción a través de la industria. La propia historia de la construcción que desarrolla plantea como fin último la prefabricación (FERNÁNDEZ et al., 1974: p. 34). La realidad de los años demuestra que se trata de una manera de construir muy interesante y competitiva a la que, por otra parte, los profesionales de la arquitectura debemos prestar un interés mayor que el que mostramos.

En otro aspecto y para ayudarnos en la búsqueda de una definición exacta de la prefabricación para nuestra investigación, Basso Virules en un análisis de la situación de la prefabricación, nos escribe que “la industrialización de la construcción surge como una consecuencia inmediata de la racionalización del trabajo y de la mecanización de las operaciones” (BASSO et al., 1968: p. 3). La racionalización debe tener un programa explícito definido con claridad, una organización más eficaz de quienes participan en la construcción así como un estudio completo del proyecto y de la ejecución de la construcción. La mecanización

de las operaciones debe realizarse primeramente como automatismo de las manipulaciones y posteriormente como sustitución de la mano de obra por las máquinas.

Antes de adoptar una definición determinada nos parece necesario aclarar una cierta confusión sobre los significados conceptuales de construcción industrializada y prefabricación. Mario Oliveri nos expone este hecho al afirmar que muchas veces “la prefabricación es identificada con la industrialización” (MARIO, 1972).

PREFABRICACIÓN \neq INDUSTRIALIZACIÓN

La prefabricación es anterior a la industrialización y tan antigua como la civilización. El primer elemento de construcción que ha sido prefabricado, tal vez haya sido el ladrillo, producido fuera de la obra mediante sistemas cuyo uso se ha prolongado a través del tiempo, hasta nuestros días. Recordemos la leyenda: “Cuando los hombres se reunieron en la llanura de Mesopotamia para levantar la Torre de Babel, decidieron proceder a la prefabricación de ladrillos cocidos en el fuego para adaptarlos como elementos constructivos de la grandiosa obra” (SIGNORILE, 1965). Encontramos tentativas de prefabricación en todas las épocas históricas. Las piezas pétreas con que fueron construidas las pirámides egipcias llegaban terminadas desde distintos lugares, una vez transportadas por ejércitos de esclavos, para ser colocadas según un programa prefijado, en la posición en la cual hoy las encontramos. En Grecia, los bloques de piedra de las columnas templarias también eran preparados fuera de la obra y sucesivamente montados en el orden y en la posición prevista (MARIO, 1972).

Por otra parte, una característica de la industrialización es la organización sistemática del proyecto y de la realización de la obra. Otra particularidad de la industrialización es la reproducción de los procesos y los elementos. La repetición

de los elementos sólo es viable cuando se puedan emplear éstos para edificios de distintos tamaños o usos. Una producción en serie será posible cuando las piezas tengan una forma predeterminada. Esto quiere decir que la utilización de elementos planteados y producidos en serie es la característica principal de la construcción industrializada. La consecuencia de una producción en fábrica es la inversión, el transporte y el montaje, por el hecho de ocurrir elaboración y utilización en lugares distintos (KONCZ, 1977).

Para nuestro trabajo de investigación y con el fin de especificar el término, entendemos por prefabricación un método de construcción con las siguientes características (CALAVERA y FERNÁNDEZ, 1999):

- Industrial.
- De fabricación en serie.
- En instalaciones fijas.
- Para un cliente que, incluso, puede no ser conocido en el momento de la fabricación.
- Con posterior transporte a obra y montaje de piezas prefabricadas.

2.2.3 Ventajas e inconvenientes de la prefabricación

El que fuera presidente de la comisión de prefabricación de la *fib -Federation Internationale du Beton-*, Arnold Van Acker (VAN ACKER, 2002), nos muestra algunas importantes características que debemos reconocer en los materiales y sistemas elegidos. Debemos examinar la eficiencia, la durabilidad y el respeto por el medio ambiente. La prefabricación de hormigón posee, según estas características, un importante potencial para convertirse en líder de la actividad constructiva en el futuro.

- **Eficiencia:** La eficiencia de un material para una construcción debemos localizarla en la máxima eficacia del propio edificio para su uso. Tendremos en cuenta el coste del material y de la ejecución, pero también el valor del resultado final edificado. Por una parte, el importe económico del material estará sujeto a la función que dicho material cumple en la edificación. Estas prestaciones serán los determinantes de resistencias al desgaste, de aspectos estético-formales, exigencia de mantenimiento y durabilidad. Por otra parte, la validez del sistema de ejecución viene determinada principalmente por la velocidad de construcción y por la seguridad ante el riesgo de accidentes. Es cierto que en un sistema de prefabricación el proceso previo a la ejecución se alarga con una mayor y más detallada definición del proyecto, que deberá precisar tanto el resultado del edificio como el proceso de ejecución. Esto conlleva el retraso del comienzo de las obras, pero a la par se obtendrá un trabajo y resultado rápido, mayor eficacia y se evitarán dificultades inesperadas. Además el precio de la mano de obra durante la ejecución se reducirá de manera considerable debido al menor tiempo de ejecución y al menor personal de construcción puesto que este sistema está más mecanizado.

Respecto al costo, debe considerarse que el prefabricado lleva consigo la necesidad de transporte y montaje (CALAVERA; ALAEJOS; GONZÁLEZ; FERNÁNDEZ y RODRÍGUEZ, 2004: pp. 769-779). El Instituto Técnico de

Materiales de Construcción -INTEMAC- nos expone el delicado proceso del transporte y montaje de piezas prefabricadas de hormigón en una obra. Es evidente que ello redonda de forma importante en el precio (ORMAZABAL; ARMENGOU; AGUADO DE CEA y RAMOS, 2002). Sin embargo, debemos confrontar estos trabajos con las también necesarias cargas de material para la ejecución in situ. Estas últimas además vienen acompañadas de otras labores de almacenamiento y desplazamientos dentro de la propia obra que repercuten en el mayor tiempo de ejecución, además de la pérdida y sobrante de material con el consiguiente sobre-coste. El diseño del prefabricado optimiza la relación entre materia prima y materia final al ejecutarse con un control más intenso y permite abaratar costes al disminuir la cantidad de material primario, los tiempos en obra y factores de seguridad. Asimismo, la oficina técnica del prefabricador puede ahorrar horas de toma de decisión a los proyectistas, además de aportarles experiencia y asesoramiento técnico. En lo relativo al plazo, la prefabricación supone un claro ahorro de tiempo, porque evita las interferencias e inconvenientes propios de la producción a pie de obra.

En el aspecto del resultado final tenemos que destacar:

- La superficie útil conseguida en relación al volumen edificado como valor competitivo del efecto.
- La específica propiedad y óptimo uso que posee cada material de construcción en el lugar adecuado del edificio.
- la adaptabilidad del edificio a un nuevo requerimiento de uso con el fin maximizar su utilización en número de años.

La prefabricación puede diseñar mejor que la construcción tradicional un edificio vacío, libre de condicionantes de tabiquería o instalaciones. Como

consecuencia, será mucho menos costosa una adaptabilidad del edificio que una demolición y renovación.

- **Durabilidad:** La durabilidad de un edificio se mide en la estabilidad de sus materiales. En un sistema industrializado de ejecución de materiales es más factible seleccionar una mejor materia prima para la fabricación del elemento constructivo. Por otra parte, se incrementa la posibilidad de establecer un eficaz control de calidad que garantice el delicado proceso y la correcta terminación del componente prefabricado. Desde el punto de vista funcional, la prefabricación implica un acabado mejor, consecuencia de un trabajo en condiciones menos adversas. A partir de este hecho, se supone una mayor durabilidad, hecho que viene asociado en los elementos de hormigón al nivel de fisuración. También resultarán más optimizadas las resistencias mecánicas (ORMAZABAL et al., 2002).

Una ventaja importante se presenta en la carencia actual en el mercado de mano de obra especializada. Ello implica que la impericia de los operarios pueda dar lugar a defectos en la construcción. En la prefabricación, la especialización y optimización de rendimientos de trabajo es mayor, lo cual reduce el problema. Por otro lado, no existe la incertidumbre acerca de los valores de coste, plazo y garantía. El coste de lo prefabricado vendrá fijado en el contrato al comprar, el plazo cubierto por penalizaciones contractuales y la garantía de durabilidad afianza lo estipulado y compromete a reparar en caso de necesidad.

Según la ONU; “únicamente donde no se construye, o se construye por debajo de las necesidades sociales, es donde no se plantea el tema de la industrialización de la edificación de viviendas”. Existen sofismas planteando inestabilidad de las estructuras o aislamientos en el tiempo -aspectos que afectan a la durabilidad- o, incluso, aumento del paro; es evidente que entre las condiciones en que se movía la construcción tradicional y las que tienen las industrias en la actualidad hay un abismo; manteniendo los casos excepcionales de restauración, ‘arquitectura rural’ y

otros, a nadie se le ocurre plantearse una vuelta generalizada a la situación anterior (AGUILA, 1988).

- Respeto por el medio ambiente: La sostenibilidad del medio ambiente y la seguridad laboral de los trabajadores durante la ejecución de un edificio es primordial en el actual concepto de construcción. Pierantoni Silva y Penadés Martí incluso consideran que estos factores son los que ayudarán a incrementar los niveles de prefabricación en la edificación (PIERANTONI y PENADÉS, 2002). La optimización del material al elaborar el elemento redundará en una menor cantidad de materia prima necesaria para la ejecución por una parte y en una menor cuantía de excedente desaprovechado por la otra. En este sentido, las canteras extraerían sólo la suma de material utilizada para la ejecución de edificación y las escombreras no recibirían el monto exagerado de sobrante al que están acostumbradas. Al prefabricar se evitan vertidos de hormigón en obra, lo cual adquiriría especial importancia al considerar el valor ecológico del emplazamiento. En una planta de prefabricados el volumen de hormigón sobrante se minimiza y los restos se tratan con mayor cuidado. Además, sería muy fácil controlar que esta menor cantidad de excedente se reutilizara como material para el reciclaje.

En zonas urbanas, que es el ámbito en el que se construye la mayor parte de los edificios, es indudable el impacto que tiene para el entorno próximo la realización de una obra. Utilizar tecnologías que reduzcan su incidencia es una necesidad que la sociedad demandará cada vez con mayor fuerza. La razón es que una buena parte de los procesos de producción los realizamos en el taller o en la factoría de prefabricación, dejando para realizar en el lugar de las obras los trabajos de ensamblaje de los distintos elementos que constituyan nuestro edificio. El nivel acústico está controlado en una fábrica especialmente ubicada para soportar esta incidencia, frente a los molestos ruidos en obras itinerantes. Por otra parte, no cabe duda de que dicho impacto para el entorno es directamente proporcional al plazo

de ejecución de la obra. En este sentido, tenemos pues una buena razón para prefabricar ya que, como hemos comentado, podemos reducir considerablemente los plazos de obra.

Estas mismas consideraciones apuntadas en relación al impacto de una obra, nos valen para justificar la necesidad de prefabricar desde el punto de vista de la prevención de accidentes. La reducción del número de tareas y la disminución del tiempo de ejecución en las obras insisten en la previsión de riesgos. Así mismo, al prefabricar se evitan buena parte de los trabajos en altura, lo que disminuye la siniestralidad. Esta relación menor de accidentes y la regularidad de los trabajos con independencia al factor clima será útil en las obras con elementos prefabricados. Además, las tareas de montajes requerirán de un personal especializado que debidamente formado en el Área de Prevención realizará sus ocupaciones con un nivel más alto de seguridad que el personal actualmente tan heterogéneo, con muy baja formación y con elevada proporción de peonaje sin cualificar que hoy trabaja en las obras con sistemas constructivos tradicionales (www.mtas.es).

ÍNDICES DE INCIDENCIA, FRECUENCIA Y GRAVEDAD DE LOS ACCIDENTES EN JORNADA DE TRABAJO CON BAJA EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN EVOLUCIÓN 1999-2002

	1999	2000	2001	2002
Índice de incidencia (por 100.000 trabajadores)	18.794,5	18.769,8	18.307,1	17.315,9
Índice de incidencia de mortales (por 100.000 trabajadores)	25,6	22,9	19,7	21,0
Índice de frecuencia (por millón de horas)	104,7	105,4	102,7	97,4
Índice de gravedad (por mil horas trabajadas)	2,36	2,29	2,27	2,18

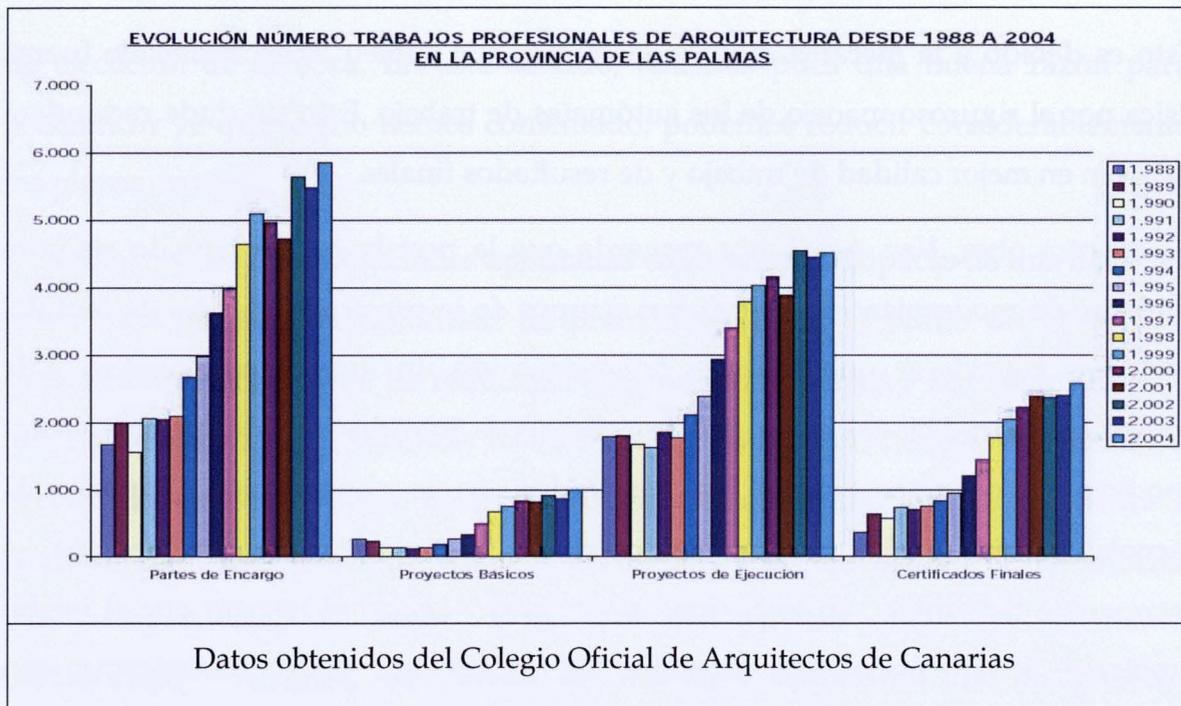
(www.mtas.es) Relación de accidentes de obra en los últimos años

En el plano social, como dato negativo para la prefabricación no debe negarse un mayor interés social de la ejecución in situ, al considerar la creación de empleo en la zona de emplazamiento. Pero como argumento positivo se encuentra las mejores posibilidades de incorporación de la mujer al trabajo en la Construcción.

Esto es debido a la mecanización de las tareas que suplen la necesidad de fuerza física por el riguroso manejo de los autómatas de trabajo. Esto sin duda redundará también en mejor calidad de trabajo y de resultados finales.

En otra obra, Van Acker nos recuerda que la prefabricación ha sido siempre prelude de modernización en muchos campos de la construcción. En este sentido, podemos considerar que siempre ha constituido un avance con respecto a la construcción tradicional en lo que se refiere a la introducción de mejoras en las condiciones de trabajo para los empleados de la construcción. También la tecnología industrial consigue un producto manufacturado que acentúa el incremento de rapidez en ejecución de edificios y realza el respeto por el medio ambiente. Se lamenta en este texto que los tratados acerca de prefabricación son pocos y antiguos, desarrollándose actualmente aspectos monográficos o reducidos de la cuestión (VAN ACKER, 1994).

El necesario cumplimiento de los objetivos empresariales de coste de producción, la calidad de las obras de acuerdo con lo contratado y el plazo de ejecución inaplazable obliga a la introducción en el proceso constructivo de técnicas de industrialización en el mayor grado posible. Dentro de éstas, la prefabricación de hormigón es una de las técnicas de mayor potencial de crecimiento. En el mercado actual existe una necesidad creciente de nuevas edificaciones que se manifiesta en el número de proyectos y licencias de construcción solicitadas (www.coac-lpa.com).



**ESTADÍSTICAS DE EDIFICACIÓN SEGÚN PROYECTOS DE EJECUCIÓN VISADOS
EN LA PROVINCIA DE LAS PALMAS**

ANO: 2004

EDIFICIOS NO VIVIENDAS

USO	Nº EXPTES.	SUPERFICIE EN M2	PRESUPUESTOS
Agricultura y ganadería	53	56.338	655.071,97
Comercial y Oficina	258	340.171	46.150.212,70
Cultural y Religioso	11	4.502	2.903.709,42
Educación	17	60.312	12.127.843,96
Espectáculo	3	1.347	70.000,00
Industria	42	39.653	7.780.181,74
Instalaciones Deportivas	9	17.234	7.853.195,58
Sanitario y Asistencial	14	37.525	21.866.667,88
Sótano	64	94.988	1.029.001,57
Transporte y Comunicación	1	5	7.121,94
Turismo	58	161.659	60.750.352,98
Varios	74	4.249	905.973,68
Totales	604	817.984	162.099.333,42

Datos obtenidos del Colegio Oficial de Arquitectos de Canarias

Además, en los países más desarrollados el coste de construcción por métodos tradicionales es cada vez más alto. Esto es debido al aumento significativo del coste de la mano de obra. La industria de la construcción debe ser capaz de hacer frente al reto de atender a la demanda, con una calidad adecuada y con un proporcionado precio.

Por otra parte, se nos indica que la prefabricación consigue calidades más altas que los sistemas tradicionales, que la durabilidad se puede suponer por lo menos tan larga como la de un edificio con construcción tradicional, que el mantenimiento y los costes de reparaciones son menores, existe disminución de gastos de calefacción como consecuencia del aislamiento térmico superior -panel de doble o triple capa-; se trata de datos recabados en Francia y Suecia en la década de los sesenta y setenta (BERNDT, 1969). Estos fundamentos pueden ser perfectamente extrapolables a un futuro cercano, planteado por nosotros para Canarias, de edificación prefabricada.

Como indicación también queda lo que Salas Serrano nos expone con los argumentos encontrados en el muestrario de la prefabricación frente a la construcción in situ. Él aprecia una mejor capacidad de comercialización, mejoras en las condiciones de trabajo, menor necesidad de mano de obra especializada, mejor materias primas empleadas, disminución del consumo de energía y como aspecto negativo la necesidad de inversión inicial importante (SALAS, 1987). También reflejamos lo que Calavera Ruiz y Fernández Gómez afirman cuando subrayan al hormigón como material idóneo para prefabricados: “Hoy por hoy, el hormigón es el material ideal para la producción de elementos prefabricados, porque tiene las mejores cualidades para ser: formable, enlazable, buen aislante térmico y acústico, resistente al fuego e imputrescible, dimensionalmente estable,

con buenas características mecánicas, de fácil mantenimiento y barato” (CALAVERA y FERNÁNDEZ, 2001).²

Aunque nuestro trabajo de investigación se centra concretamente en presentar e introducir un hormigón de altas prestaciones y de última generación en Canarias, la primera apuesta será la de emplear este hormigón autocompactante para paneles prefabricados de fachada. Por tanto, en función de las referencias consultadas parece lógico que consideremos las ventajas e inconvenientes de lo que supone la prefabricación de hormigón.

- Ventajas:

- los requerimientos constructivos o de diseño pueden ser correctamente incorporados desde el proyecto hasta la factoría.
- Los elementos constructivos o arquitectónicos son manufacturados en industria con condiciones controladas, usando labores seriadas y especialmente materiales seleccionados.
- Los diseños, detalles y proceso de ejecución están muy bien controlados por una especializada organización.
- Existe solape de las distintas etapas de construcción, lo cual supone mayor seriación de piezas iguales y ordenar los sistemas de ejecución de los elementos.
- Una mejor calidad de terminación que la construcción in situ y menor dilatación-retracción del edificio.
- No requiere protección adicional al fuego, frente a estructuras metálicas.
- Menor plazo de construcción de los componentes del edificio.

² José Calavera y Jaime Fernández están especializados en la materia y son catedráticos en prefabricación por la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

- El lugar de trabajo está protegido de las condiciones meteorológicas, humedad o vientos, por tanto, existe independencia del clima.
 - Necesidad de poco personal especializado y fácil especialización del personal.
 - Un menor costo de producción debido al alto grado de industrialización alcanzable.
 - Gran velocidad de ejecución del edificio.
 - Unas mejoras en las condiciones del trabajo.
 - Disminución del consumo de energía.
 - Una mejor adecuación a condiciones medioambientales
- Inconvenientes:
 - Necesidad de transporte y montajes con elementos caros.
 - Especial cuidado en enlaces y juntas.
 - Un umbral mínimo de calidad en lo que se refiere a material y tolerancias muy estrictas.
 - Cierta rigidez de proyecto, que exige coordinación entre proyectistas y especialistas en prefabricación.
 - Necesidad de grandes inversiones iniciales en fábrica.

Teniendo en cuenta los antecedentes expuestos, nuestro equipo de investigación considera que la prefabricación de elementos de hormigón es propicia para la ejecución de edificios. Hay que insistir en que el desarrollo de la prefabricación se ve frenado, a veces, por temores infundados como el miedo a la fealdad, a la monotonía o a que sea sinónimo de baja calidad. También existe aprensión a que las juntas constituyan puntos peligrosos, a la pérdida de puestos

de trabajo o de honorarios de proyecto. Una buena parte de los factores favorables que favorecen a la construcción prefabricada de hormigón procede de las dificultades crecientes con las que se encuentran las estructuras de hormigón armado vertido en obra. A la escasez de encofradores, ferrallas y albañiles conocedores de su oficio, se han añadido durante los últimos años disconformidades entre cliente y constructor por los costes de alguna partida, los plazos de ejecución o la organización de la obra y su seguridad.

Quizás no se ha mostrado el sistema de prefabricación de hormigón como se debiera, esto es lo que parece preocupar a José Ignacio de Llorens Durán cuando escribe que “habría que presentar a la prefabricación no tanto como una alternativa más barata y rentable de escasas prestaciones para el usuario final, sino como un método constructivo más adecuado a las circunstancias económicas y técnicas actuales.” (DE LLORENS, 2002: p. 308).

Ahondamos nuestra reflexión acerca de los prefabricados de hormigón atendiendo a características que posteriormente utilizaremos para nuestras investigaciones. Así sabemos que la prefabricación de edificios utiliza indistintamente las técnicas del hormigón armado como pretensado. En la ejecución del hormigón pretensado existe una rápida transferencia de tensión tras el fraguado del hormigón y por otra parte el hormigón armado requiere una pronta reutilización de los moldes. Estas reseñas exigen resistencias del hormigón a 16 horas del orden de 25 MPa, que suponen resistencias a 28 días del orden de 40 o 50 MPa. Estos datos son importantes y tienen que ver con las prestaciones requeridas del hormigón preparado.

En esta meditación, los profesores Calavera y Fernández nos reflejan aspectos básicos esenciales a tener en cuenta para la ejecución de prefabricados de hormigón que anotamos en nuestro saber con el fin de controlar aspectos que

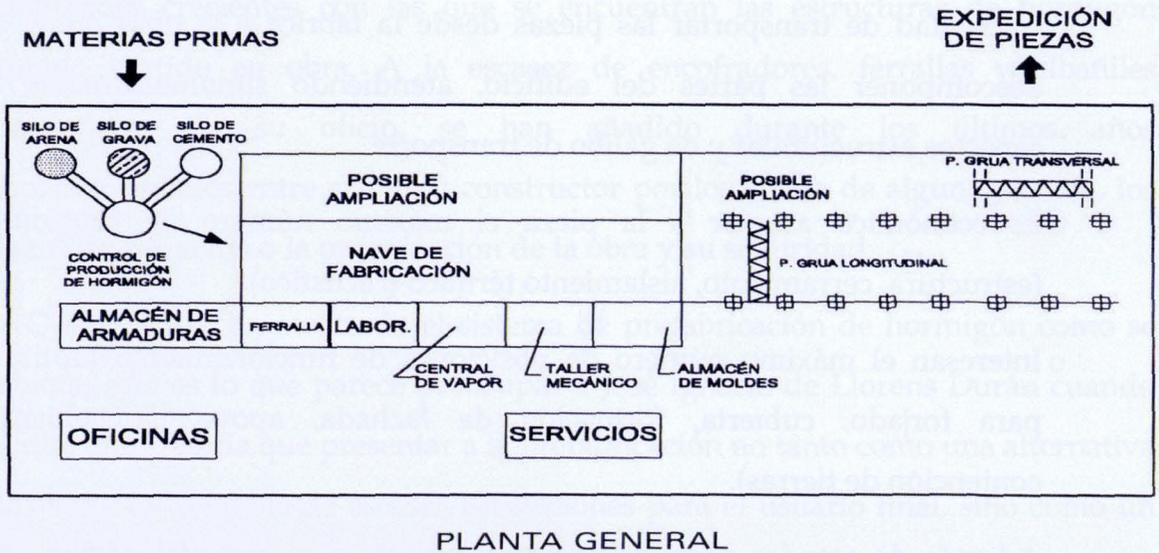
podieran influenciar en nuestra propuesta de hormigón, éstos son (CALAVERA y FERNÁNDEZ, 1999):

- Necesidad de transportar las piezas desde la fábrica a la obra obliga a descomponer las partes del edificio, atendiendo simultáneamente a aspectos estructurales y de gálibo de transporte.
- Es económico asignar a la pieza el máximo número de funciones (estructura, cerramiento, aislamiento térmico o acústico).
- Interesan el máximo número de posiciones de funcionamiento (aptitud para forjado, cubierta, formación de fachada, apoyo de cubierta, contención de tierras).
- Además de atender a consideraciones para la ejecución del edificio, se debe tener en cuenta otras para la fabricación, desmolde, transporte y montaje de las piezas.

En general, podemos afirmar que la prefabricación, al producir muchos miles de piezas iguales, permite fácilmente una experimentación directa con los elementos. Se puede ensayar un número reducido pero suficiente de piezas que indiquen ventajas técnicas y económicas en prefabricación. Una de estas podría ser la optimización del material que redundaría en ligereza, respeto al medio ambiente o economía.

Por último, la instalación en las fábricas de prefabricación son muy variadas y no es objeto de este trabajo entrar en este tema. No dudamos de la importancia de una buena instalación industrial para la ejecución de elementos prefabricados de hormigón, pero sería acometer un tema que no manejamos y que desmerecería nuestra investigación acerca de las prestaciones en el hormigón canario para la ejecución de un elemento prefabricado. Nos remitimos a una figura que representa muy bien un esquema de funcionamiento en una planta de prefabricados

(CALAVERA y FERNÁNDEZ, 1999: p. 14) y a unas imágenes que muestran diversas fases mecanizadas del proceso de trabajo en industria.



Proceso de ejecución en fábrica de prefabricados

2.2.4 Paneles de fachada prefabricados con hormigón

Se entiende por fachada el elemento o conjunto de elementos que se sitúan entre el espacio exterior e interior de un edificio, desempeñando las funciones de separación y aislamiento, tanto térmico como acústico, entre ambos espacios, así como las de protección solar, de viento, lluvia, humos, seguridad, etc... Por otra parte, deben cumplir además las funciones de aspecto estético. Nos referimos a la forma, textura, color, teniendo en cuenta el envejecimiento y conservación.

Los paneles prefabricados de fachada pueden ser utilizados como cerramiento total o parcial de un edificio. Las exigencias funcionales que ha de cumplir serán las propias a una fachada, es decir, de estanqueidad al agua y al aire, aislamiento higrotérmico y acústico; las correspondientes a la durabilidad de los materiales constituyentes y del propio elemento o cerramiento a que da lugar, así como de su mantenimiento; las de seguridad responsables de la cohesión de los elementos, resistencias mecánicas y comportamiento ante el fuego.

Como hemos ido concretando, el cerramiento de las naves industriales puede realizarse mediante paneles prefabricados de hormigón. Los paneles pueden clasificarse en portantes o no portantes, según transmitan cargas verticales o se limiten a una función de cerramiento. Generalmente, se trata de paneles autoportantes, es decir, que sólo resisten su propio peso y acciones derivadas del viento.



Paneles de fachada en construcción

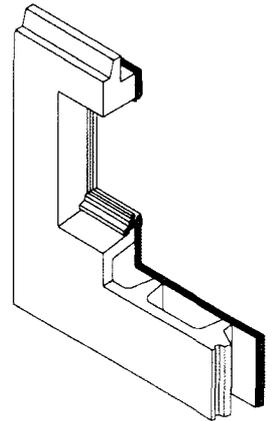
La idea de emplear paneles para la prefabricación integral de fachadas, si bien ha tenido su desarrollo en tiempos

relativamente recientes, es realmente una idea tan antigua como la prefabricación. En 1875, Lascelles planeó ya paneles de fachada. Posteriormente, a finales del siglo XIX y principios del XX se pierde bastante este planteamiento. Aparecen algunas patentes durante este período, pero hasta principios de los años cincuenta no adquiere auténtica importancia. La aparición de un nivel práctico importante se presenta en 1952 cuando Le Corbusier la utiliza en sus Unidades de Vivienda en Marsella. A partir de esta época, la prefabricación de paneles de fachada no ha cesado de desarrollarse. Cabe destacar los países de Estados Unidos, Francia, Inglaterra y los países nórdicos. En años recientes a los países destacados en este campo, Holanda y Bélgica. La utilización en España ha sido relativamente modesta. En nuestro país se ha utilizado habitualmente elementos de hormigón que no incorporan ningún tipo de aislamiento, ni acabado interior. De esta manera, para vivienda se ejecuta una solución mixta entre la prefabricación integral y la construcción tradicional, dejando paneles de fachada preparados para trasdosar (CALAVERA y FERNÁNDEZ, 1999).

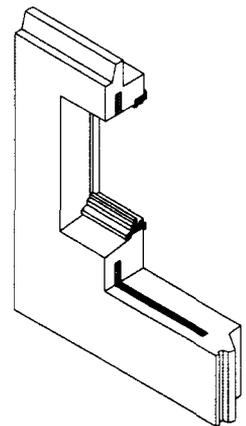
La prefabricación de paneles de fachada ha evolucionado de forma importante en los últimos años hacia caminos muy diferentes, aunque se aprecia una general tendencia hacia unidades cada vez de mayor tamaño y mayor peso. El proyecto de paneles de fachada -como el de piezas prefabricadas- requiere una estrecha colaboración entre el proyectista y el especialista en prefabricación, para no producir errores importantes. Estos paneles de cerramiento con unas dimensiones importantes permiten reducir el número de juntas en fachada y obtener un buen ritmo de ejecución. Admiten formas muy variadas y acabados superficiales diferentes, con tratamientos que permiten dejar el árido visto, estampaciones estéticas, color y otras. En una terminología general también podemos hablar de paneles cerrados o abiertos según tengan el perímetro completamente continuo o dejen huecos en el contorno.

Los paneles de fachada prefabricados de hormigón son paneles cuyo material constitutivo es el hormigón. Por su peso, según la NBE-CT-79, son paneles pesados porque pesan más de 200 Kg/m². Según su composición puede ser homogéneo, es decir de una sola capa de hormigón, o multicapas, formados por hormigón y materiales aislantes o por diferentes capas de hormigón.

Los paneles homogéneos precisan de un trasdosado in situ -para vivienda- que los complete en cuanto a sus funciones de aislamiento térmico y acabado interior, por lo que se suele incorporar una capa de aislamiento térmico y otra de tabiquería. Estos inconvenientes se obvian con la utilización de hormigones ligeros que constituyen el espesor total de la fachada, asumiendo por sí mismo la función de aislamiento térmico. Los hormigones ligeros se obtienen a partir de áridos ligeros (poliéster expandido, piedra pómez, pizarra expandida, arcilla expandida), de hormigones sin finos -con granulometrías específicas- y de hormigones celulares añadiendo compuestos químicos que producen gases que quedan ocluidos en la masa del hormigón. Según se disminuya la densidad del hormigón aumentará su capacidad aislante, pero disminuirá su resistencia. Existen soluciones bicapa, en la que la cara exterior sea de un tipo de hormigón con todas las posibilidades expresivas y técnicas que necesiten y la interna con otro tipo de hormigón. Los paneles multicapa están constituidos, en general, por una capa de aislante térmico entre dos de hormigón.

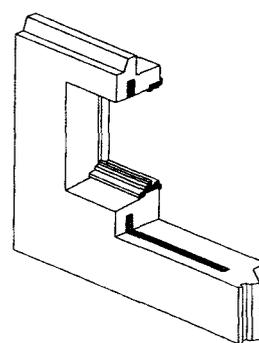
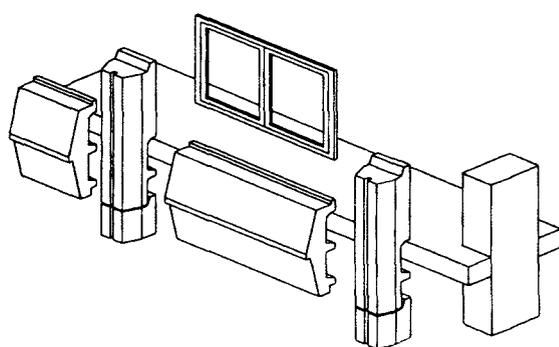


ELEMENTO PARA TRASDOSAR

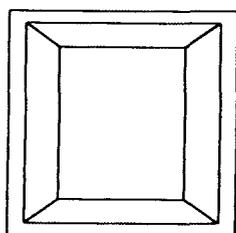


ELEMENTO SANDWICH CON PLACAS DE UNIÓN RÍGIDA

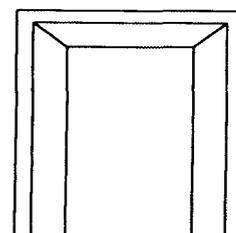
Como se ha venido reflejando previamente, es posible establecer ciertas clasificaciones diferentes por su peso -pesadas o ligeras-, por su composición - homogéneos o multicapas-, por su forma -cerrados o abiertos-, por su posición resistente -autoportante o no portante-, por su posición en relación a los elementos estructurales -sujetos a elementos resistentes verticales o fijados a forjados- (AGUILA, 1988). Estas clasificaciones nos ayudarán en la confección de nuestra terminología específica a lo largo del trabajo.



PANEL INTEGRAL DE FACHADA



PANEL CERRADO



PANEL ABIERTO

De la misma manera que para los prefabricados, siempre en función de las referencias consultadas, es lógico que consideremos las ventajas e inconvenientes de lo que suponen los paneles de fachada de hormigón para naves industriales

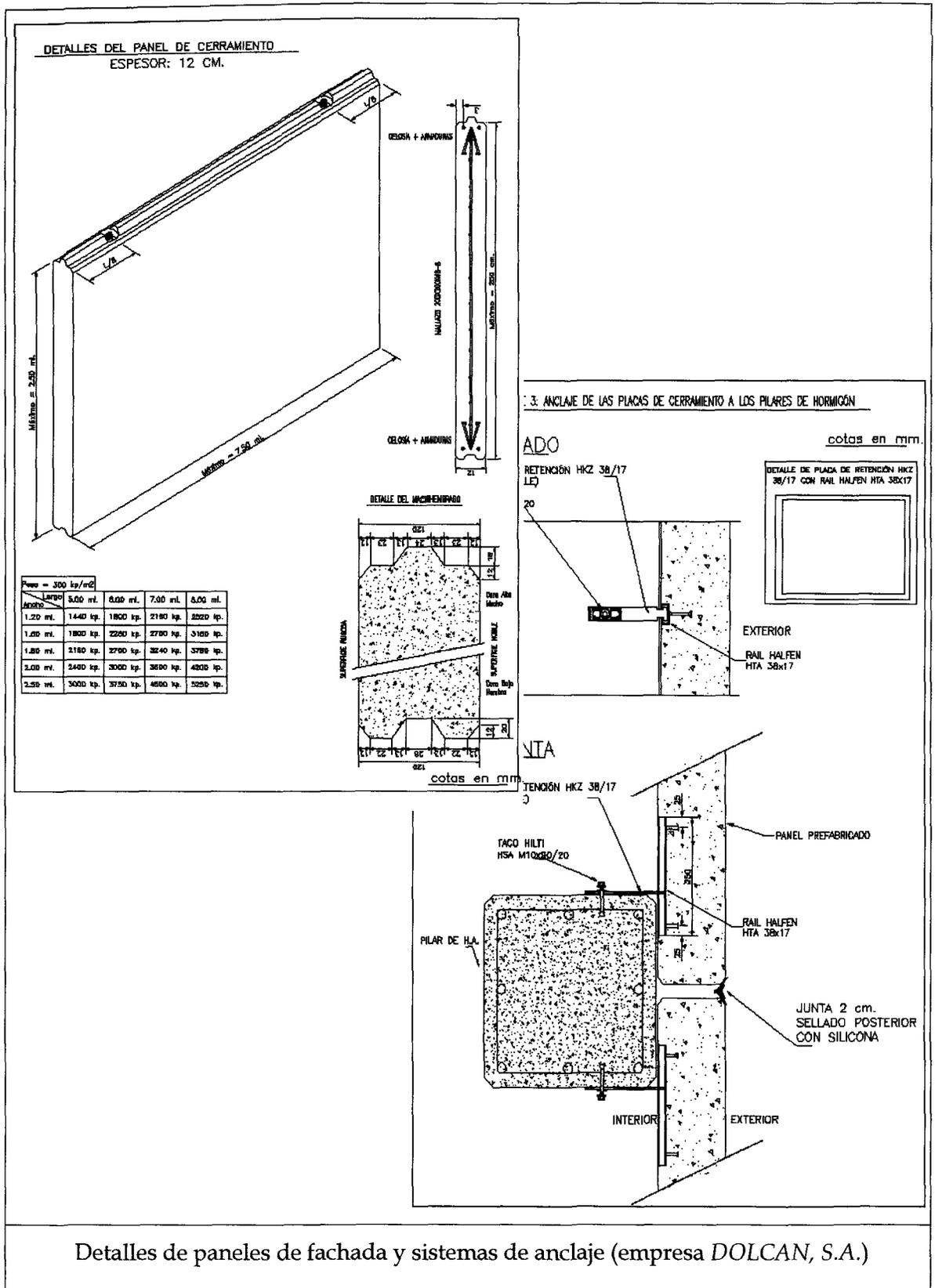
- **Ventajas:**

- Grandes posibilidades plásticas con formas prácticamente ilimitadas además de texturas y colores diversos, llegando a lo que se ha venido a llamar "hormigón arquitectónico".

- Elevado control de calidad, al ser elementos producidos en fábrica.
- Buena resistencia frente al fuego.
- Puesta en obra rápida
- Bajos costes de mantenimiento.
- Gran durabilidad.
- Posibilidad de acabado interior.
- Función de arriostramiento para el edificio.

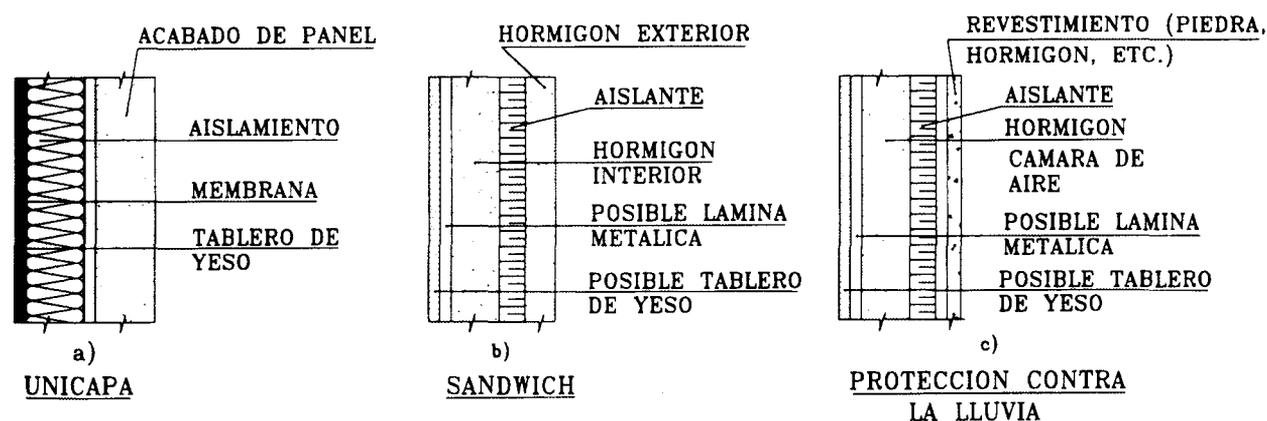
Los inconvenientes no los vemos como tal, sino que encontramos en la ventaja del elevado control de calidad la solución para atender a los posibles problemas por falta de cuidado en la ejecución de estos paneles. En este sentido, pasamos a describir aspectos que creemos importantes tener en cuenta en la ejecución de prefabricados de hormigón para fachada.

Existen múltiples sistemas de anclaje y apoyo del panel a la estructura del edificio. Asimismo, también existen variadas técnicas de cosido y sellado entre piezas. Para una profundización en estos detalles técnicos recomendamos la reseña de Berndt donde se nos muestra múltiples sistemas de prefabricación, quizá algo pretéritos pero sugestivos (BERNDT, 1969). Por otra parte, siempre será recomendable dirigirnos a la empresa de prefabricados elegida y estudiar con detenimiento el sistema adoptado. Creemos que estos ejemplos que a continuación mostramos son significativos por lo común de su uso en Canarias. Su utilización principal se refiere a paneles prefabricados de hormigón para fachada en edificios industriales (Gráficos cedidos por la empresa "Prefabricados DOLCAN, S.A.").



Detalles de paneles de fachada y sistemas de anclaje (empresa DOLCAN, S.A.)

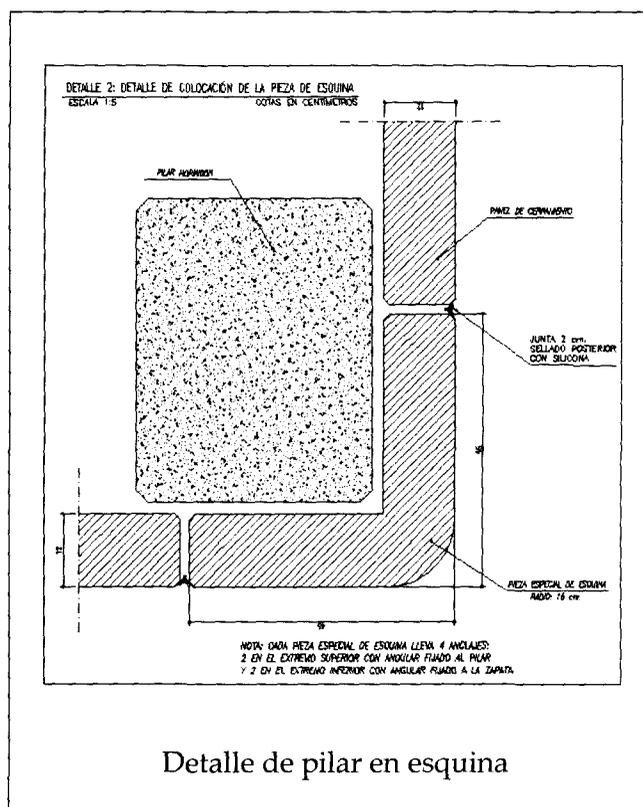
Desde el punto de vista del aislamiento térmico, una solución frecuente, pero no la más correcta, es el elemento sándwich con placas de unión rígida. Esta solución es un panel monolítico de hormigón armado que tiene incluido en una gran parte de su superficie una capa de material para aislamiento térmico. Sin embargo, el sistema presenta un número elevado de puentes térmicos. Cuando el elemento sándwich tiene capas de hormigón independientes -exterior e interior- no existen los puentes térmicos anteriormente mencionados. Estas láminas independientes se deben coser mediante chapas de acero inoxidable que permitan la dilatación libre de cada una de las piezas y que eviten problemas de corrosión. Las figuras del libro monográfico de prefabricados de Calavera y Fernández indican algunos detalles. La siguiente representación muestra sistemas típicos de paneles de fachada con diferentes constituciones transversales, como variante del panel simple de hormigón (CALAVERA y FERNÁNDEZ, 1999: p. 39).



Atendiendo a los aspectos estructurales, se debe atender a los esfuerzos producidos en el momento del desmoldeo, transporte y almacenamiento en fábrica, ya que se suelen producir esfuerzos de diferente valor y signo que los previstos. Además este desencofrado y primer transporte de la pieza se produce a muy pocas horas -16 horas, incluso 7 horas en algunos casos- (Empresa KERKSTOEL, en Grobbendonk, Bélgica). La Fib - *Federation Internationale du Beton* - recomienda una resistencia mínima para el momento de desmoldeo de 10 MPa y a los 28 días de 25

MPa para paneles no portantes. Análogamente, se deben considerar las probables situaciones críticas del panel durante las operaciones de carga en fábrica, transporte a obra y montaje. Se trata de realidades con esfuerzos dinámicos que no son fáciles de prever. Constructivamente es recomendable biselar las aristas con el fin de evitar roturas debidas a golpes y la apreciación de pequeñas desviaciones entre piezas contiguas durante el montaje.

Como criterio de composición habrá que atender a todos los datos referentes a las coordinaciones modular y dimensional. Se considerarán todas las relaciones modulares de los componentes aislados y de las combinaciones resultantes. En el diseño formal es recomendable la consideración previa del retranqueo de los soportes de la línea de fachada, con el fin de que los paneles puedan pasar libremente por delante de ellos. De esta manera, no se ven coaccionados por estos elementos en la composición del cerramiento. Además, se simplifican los sistemas de fijación y los pilares no darían lugar a puentes higrotérmicos (Ver los detalles previamente mostrados, cedidos por la empresa "Prefabricados DOLCAN, S.A.>").



La forma debe permitir su apoyo en la estructura donde se vaya a fijar, consiguiendo que la pieza sea autoestable y facilitando las tareas de anclaje a la estructura. En el diseño de piezas hay que considerar el desmoldeo, empleando

formas que favorezcan la extracción. Los elementos formales del panel a tener en cuenta serán:

- Su forma geométrica y volumétrica.
- Su relieve o forma exterior.
- Su textura superficial -acabado exterior y coloración-.

En relación a los materiales utilizados se trata de un hormigón de los tipos H-25 o H-30, de consistencia plástica, generalmente compuesto de cemento, áridos de Ø 20-40 mm y arena de Ø inferior a 5 mm. En este apartado, no hay que olvidar que se podría utilizar dos calidades distintas de hormigón; una superficial para la cara vista con el acabado específico y otra para el interior relleno de hormigón estándar. En el caso de realizar esta opción, la capa exterior debe tener un espesor mínimo de 2,5 cms o 1,5 veces el tamaño máximo del árido (AGUILA, 1988). El recubrimiento debe ser el establecido por la EHE y EFHE.

Las cualidades esenciales que deben presentar los moldes son la precisión y estabilidad de las formas. Se debe tender al moldeo horizontal con estanqueidad completa en bordes. Los moldes deben presentar simplicidad en el proceso de fabricación y posibilidad de modificaciones que puedan ofrecer un mismo molde. Debe tener resistencia al desgaste y a la deformación apta para un número máximo de uso. Pueden ser moldes de madera, metálicos, plásticos, de hormigón, contramoldes superficiales para marcar las variadas formas de la cara vista (poliestireno expandido, poliuretano expandido, caucho sintético...)

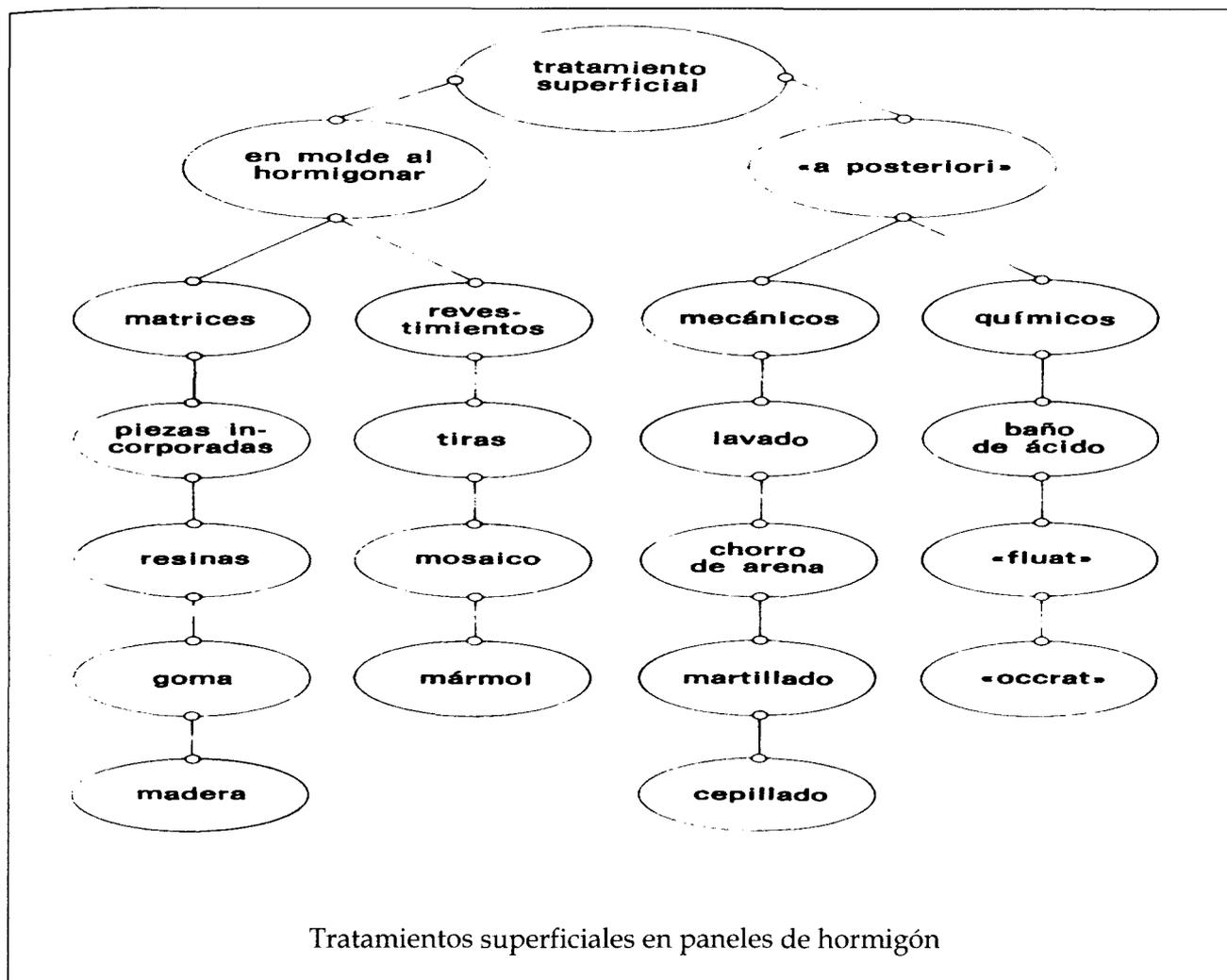
Nos basamos en una referencia en la que Águila García nos resume el proceso de fabricación en tres fases. La primera fase corresponde a la limpieza del molde, aplicación del desencofrante, fijación de costeros perimetrales, colocación del revestimiento de fachada -si lo llevara-, situación de la ferralla (preparada previamente en taller auxiliar), de los separadores y del resto de los elementos

incorporados. La fase intermedia supone el vertido de la primera capa y sucesivas - si fuera multicapas- con el alisado del parámetro superior. El hormigonado se suele hacer con hormigón de consistencia semiplástica con vibración del molde. La fase final afecta al tratamiento térmico para el acelerado del fraguado, seguido del desmoldeo, control de calidad, repasos y almacenamiento (AGUILA, 1988). El almacenamiento se hace en posición vertical mediante los caballetes adecuados.

El aspecto exterior superficial del panel puede depender de la forma del molde. De esta manera se pueden conseguir superficies lisas, acanaladas, grecados, nervaduras, plegaduras, curvaturas en una o dos direcciones... También se pueden utilizar relieves superficiales mediante dibujos impresos en contramoldes de caucho, poliéster expandido, madera... Se pueden también realizar tratamientos mecánicos con el hormigón tierno (el alisado con reglas alisadoras o con llanas), o también con el hormigón endurecido (dejar el árido visto utilizando un retardador de fraguado en la superficie inferior y cepillando o lavando la superficie, aplicación superficial de chorro de arena, labrado de cantería). Otro tratamiento aplicable es el químico, a base de cepillos impregnados en ácidos que den mayor o menor brillantez. El coloreado del hormigón mediante la incorporación de pigmentos en la masa del hormigón o a través del color de los áridos, si estos quedan vistos.

Otra posibilidad de terminación exterior serán los revestimientos como chapados, pinturas o revocos. En concreto con las pinturas se pueden obtener infinita variedad de colores y tonos de una gran durabilidad. Igualmente se pueden aplicar impermeabilizaciones o protecciones con barnices a base de siliconas y de resinas acrílicas, siempre que el hormigón esté suficientemente curado, limpio y sin eflorescencias.

Para todos estos tratamientos es muy factible realizar previamente maquetas a escala natural.



El estudio del proceso de transporte y montaje de las piezas prefabricadas debe formar parte del proyecto y de la coordinación de la obra para evitar una fuente de problemas y una causa no infrecuente de accidentes. La complejidad, tamaño y peso de los paneles de fachada hacen necesario estudiar detenidamente el transporte y en cualquier caso disponer de caballetes especiales en los vehículos. El montaje se debe hacer continuo con el transporte de la fábrica a obra para evitar un nuevo almacenamiento en lugar inadecuado. Existen métodos estandarizados para el manejo, transporte y montaje que muestran tipos de ganchos, grilletes y anclajes de empleo común, prácticas normalizadas en sistemas y puntos de apoyo de las piezas, efectos dinámicos producidos en los movimientos de transporte. Se debe

vigilar especialmente el efecto derivado del viento, maniobras de volteos y de ubicación. Para concretar más en este contenido debemos leer los “aspectos particulares de las estructuras prefabricadas” que expone específicamente este contenido del manejo y colocación de piezas prefabricadas (CALAVERA, ALAEJOS, GONZÁLEZ, FERNÁNDEZ y RODRÍGUEZ, 2004: pp. 769-779).

En el momento de la ubicación de la pieza en el edificio, las juntas son un componente esencial desde el punto de vista de transmisión de cargas -cuando se trata de paneles portantes-, para su estética, su impermeabilidad al agua y al viento. Calavera y Fernández exponen esquema de diferentes tipos de juntas y destaca la preferencia del doble sellado al sellado simple. Las uniones entre paneles son necesarias por razones de resistencia estructural de los paneles, especialmente, a cargas de viento. Estas uniones pueden ser secas mediante perfiles metálicos inoxidable soldados o atornillados y también pueden ser uniones húmedas realizadas con mortero (CALAVERA y FERNÁNDEZ, 1999).

Para terminar, y siempre atendiendo a nuestras reseñas, se deben considerar otros aspectos para una ejecución correcta de paneles de hormigón para fachada;

- Cuidar del color del árido cuando éste vaya a quedar visto.
- Los moldes deben ser objeto de una inspección periódica cuidadosa.
- Se debe respetar unas tolerancias dimensionales estrictas.
- En piezas terminadas se deben rechazar fisuras con ancho superior a 0,05 mm en acabados lisos y 0,1 mm en acabados con árido visto.
- Recomendar un mantenimiento y reposición de juntas cada 8/10 años.
- Cuando se utilicen pigmentos hay que considerar la compatibilidad de los pigmentos con los demás elementos de la masa de hormigón, la reconsideración de la dosificación del hormigón, la posibilidad de decoloración con el tiempo, la uniformidad de los pigmentos, incluso la

utilización de un lote único de pigmento para el conjunto de paneles de cada partida.

2.2.5 Contexto normativo en prefabricados de hormigón para fachada

Hemos desarrollado las particularidades de los paneles prefabricados de hormigón para fachada. Es evidente que consideramos que éstas deben ser reguladas en la normativa que los reglamente. Aunque Ortiz Bonet se refiere a elementos estructurales prefabricados, frente a nuestros elementos de fachada prefabricados, creemos que confirma nuestra opinión cuando manifiesta que “el desarrollo normativo que ha implicado la incorporación a Europa: normas nacionales, Eurocódigos ENV y EN y Normas de Producto, ha puesto de relieve que la prefabricación de elementos estructurales de hormigón presenta particularidades que deben ser recogidas de algún modo por estas normas. Estas particularidades se pueden resumir en unas necesidades: menores pesos que implican pequeños espesores, y servidumbres de los procesos de fabricación (elementos sin cercos); y unas virtudes: producción industrializada en un entorno favorable en el que las operaciones se repiten y los sistemas de trabajo se perfeccionan, con fuertes controles de fabricación y productos finales, etc” (ORTIZ, 2002: p. 338).

“No todos los hormigones, incluso con idéntica resistencia característica, tienen iguales prestaciones de durabilidad, pues dependen de aspectos como la porosidad, tipo de cemento, etc. Los hormigones de los prefabricados, realizados con altas dosificaciones, supercementos, baja relación agua/cemento, plastificantes, molde metálico, vibración exterior, (además de un riguroso control de calidad) y así lo corroboran las escasas investigaciones comparativas realizadas hasta ahora, están sin duda entre los mejores en comparación con los de obra, por lo que interesa encontrar un sistema económico de tipificación y control que permita reducir

responsablemente los recubrimientos exigidos tras demostrar en un sistema de control una durabilidad cuantificable objetivamente como superior.” (ORTIZ, 2002: p. 340).

La normativa referente a paneles de fachada prefabricados de hormigón actualmente está en un proceso de revisión. Según la futura comercialización de productos de construcción en Europa que va a realizarse en base a las Normas de Producto Europeas. Éstas están desarrolladas por el comité CEN-TC229 y estarán basadas en los Eurocódigos EN, de aplicación obligada en Europa y que dependen del CEN-TC 250 (ORTIZ, 2002).

En otra reseña, Hue García nos explica el desarrollo actual de las normativas referentes a prefabricados de hormigón de la que recogemos aspectos destacados. En 1988 se aprobó la Directiva de Productos de la Construcción (CPD), que es la base para la preparación de normas comunes europeas. En ella se considera que un producto es adecuado para su uso, cuando se ajusta a una de ellas. La marca CE los hace fácilmente reconocibles y se les debe permitir la libre circulación y utilización en toda la UE (HUE GARCÍA, 2002).

“En la CPD se definen los seis requisitos esenciales de las obras de construcción que son importantes para el bienestar general: «la resistencia mecánica y la estabilidad», «la seguridad en caso de incendio», «la higiene, la salud y el medio ambiente», «la seguridad de utilización», «la protección contra el ruido» y «el ahorro de energía y el aislamiento térmico». Se entiende por «producto de construcción» cualquier producto fabricado para su incorporación con carácter permanente a las obras tanto de edificación como de ingeniería civil. La CPD se les aplica en la medida en que los requisitos esenciales estén relacionados con ellos. Deben interpretarse de forma que las obras tengan un grado de fiabilidad adecuado con respecto a ellos, siempre que estén en una normativa. La CPD dice que se establecerán documentos interpretativos (ID) con el fin de dar forma concreta a

estos requisitos esenciales en el aspecto técnico, que servirán como base para las normas armonizadas (hEN) u otras especificaciones técnicas, y para la elaboración o concesión de los documentos de idoneidad técnica europeos.” (HUE GARCÍA, 2002: p. 49).

“Las EN [Normas Europeas] de productos prefabricados de hormigón -PPH- contienen aspectos como campo de aplicación, formas y dimensiones de los productos, otras normas aplicables o relacionadas, definiciones y símbolos utilizados, requisitos que se exigen a los materiales a emplear, a los sistemas de fabricación y a los productos terminados, tolerancias, dimensiones mínimas, resistencias mecánicas y al fuego, propiedades acústicas y térmicas, durabilidad, transporte, manejo y montaje, métodos de ensayo, evaluación de conformidad mediante ensayos de tipo y control de producción, usos y aplicaciones, detalles constructivos y de instalación en las estructuras... (...) Estas EN se elaboran bajo la responsabilidad del CEN/TC 229 ‘Productos prefabricados de hormigón’. (...) Se ocupa de todo tipo de PPH, ya sean estructurales -PPEH-, como vigas de puente o losas alveolares de forjados, o no estructurales, como piezas para terrazo o mobiliario urbano y de jardín.” (HUE GARCÍA, 2002: pp. 53-54).

“Los PPEH tienen relación con el hormigón y con sus estructuras. Como material es competencia del CEN/TC 104 ‘Hormigón y productos relacionados’, que entre otras normas elabora la EN 206 ‘Comportamiento, fabricación y control del hormigón’, pero también otras referentes a ejecución. Las estructuras son competencia del CEN/TC 250 que elabora los EC y entre ellos el EC2. Los PPH, en sus aspectos no estructurales, son competencia del CEN/TC 229.” (HUE GARCÍA, 2002: p. 55).

Aparte de esta normativa desarrollada para prefabricados, es de obligado cumplimiento para los paneles prefabricados de hormigón no portantes para fachada, la normativa básica a considerar:

- NBE-CT-79; sobre condiciones térmicas en los edificios.
- NBE-CA-81; sobre condiciones acústicas en los edificios.
- NBE-CPI-96; condiciones de protección contra incendios en los edificios.

Además debemos tener presente el código técnico de la edificación - CTE -, de reciente actualidad, que presenta unas exigencias más estrictas y acordes con la realidad de nuestra sociedad actual. Estos requerimientos que debemos pretender de los materiales constructivos actuales garantizarán una calidad y durabilidad para el uso y disfrute de sus moradores.

Existe también una norma tecnológica, que aunque no tiene carácter obligatorio, es de uso recomendable; NTE-FPP-75; de fachadas prefabricadas de paneles. Por último, hay que tener en cuenta la utilidad de exigir a todo panel de fachada a utilizar, el estar en posesión del correspondiente documento de idoneidad técnica -DIT-. Aparte se debe tener en cuenta, como hemos desarrollado, las normas europeas y, en concreto, las de Productos Prefabricados de Hormigón - PPH-.

2.2.6 Realizaciones con prefabricados de hormigón para fachada en Canarias

En Canarias, el hormigón también ha conformado un interesante modelo de expresión formal. Más allá de su servicio como elemental material de sustentación de cargas, ha generado un peculiar lenguaje arquitectónico como metáfora subjetiva de su 'materia volcánica' (véase *Arquitectura Viva* nº 51, 1996). Tras el tiempo, encontramos modelos significativos de hormigón visto destacando a los arquitectos Pedro Massieu, Salvador Fábregas o la firma Saavedra/Díaz-Llanos en los años sesenta y setenta del pasado siglo. También de estas décadas y hasta la actualidad, encontramos el trabajo, tanto de Luis Cabrera como de Luis López Díaz o Manuel de La Peña, basado en la expresión resultante por la morfología de las cubiertas

laminares. Debemos nombrar como ejemplarizantes de lo expuesto, entre otros (GUIGOU, 2002):

- Los Apartamentos Don Pedro, en el Sur de Gran Canaria; con terminación en hormigón visto alternado con cantos de piedra natural de playa (Arq. Massieu). Página 54, nº 1.
- El Hotel Don Juan, en Las Palmas de Gran Canaria; una torre cilíndrica con 23 plantas de altura en hormigón visto (Arq. Massieu). Pág. 54, nº 2.
- Sede del COAC, en Santa cruz de Tenerife; con un acabado en hormigón visto de textura muy acertada (Arq. Saavedra y Díaz-Llanos). Pág. 54, nº 3.
- Edificio Wildpret, en Santa Cruz de Tenerife; con terminación en fachada a base de paneles prefabricados de cerramiento (Arq. Saavedra y Díaz-Llanos). Página 54, nº 4.
- Estación de Servicios La Estrella, en Puerto de La Cruz, Tenerife; con cubierta de lámina reglada en forma de estrella (Arq. Cabrera). Pág. 54, nº 5.
- Fábrica Frigo, en Telde y Almacenes Viuda de Peñate, en Las Palmas de Gran Canaria; con cubierta en forma de paraboloides (Arq. López Díaz). Pág. 54, nº 6.
- Iglesia Ecuménica de Playa del Inglés, en Gran Canaria; con estructura en forma de cubierta laminar (Arq. De La Peña). Pág. 54, nº 7.
- Edificio Tamarco, en Las Palmas de Gran Canaria; con acabado de hormigón visto en diferentes formas y texturas (Arq. Fábregas). Pág. 54, nº 8.
- Locales del Club Natación Metropole, en Las Palmas de Gran Canaria; se trata de un conjunto de cubiertas de superficie reglada (Arq. López Díaz).
- Pabellón de Deportes del Puerto de La Cruz, en Tenerife; cubierta laminar de hormigón (Arq. López Díaz). Pág. 54, nº 9.



1



2



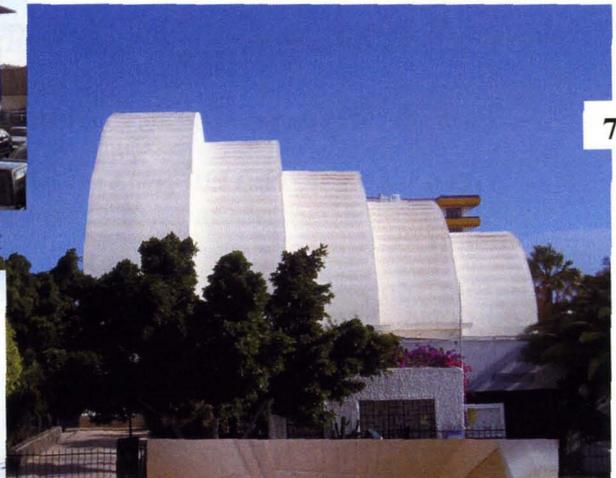
4



5



6



7



8



3



9

Ejemplos de hormigón visto en Canarias (Primer período)

De reciente actualidad, destacamos otros edificios en Canarias que recurren al hormigón para su concepción arquitectónica. Los arquitectos Guigou y Pérez Luzardo han destacado en las Islas por su investigación científica aplicada al hormigón. Esta teoría la han reflejado en muchas de sus ejecuciones en obra. Por otra parte, el equipo AMP Arquitectos ha utilizado en varias de sus obras premiadas al hormigón como fachada vista de manera muy expresiva. El arquitecto Feo Ojeda también ha sabido utilizar al hormigón como exposición formal de su Arquitectura. El trabajo reconocido del equipo GPY Arquitectos también ha empleado al cemento como material conformador. Singularmente, también es de destacar el excepcional trabajo en Canarias de Santiago Calatrava, así como de Herzog y De Meuron -reconocidos arquitectos por su tratamiento con el hormigón en edificios por todo el mundo-. De lo mostrado, destacamos por el uso expresivo del hormigón en fachadas:

- Laboratorio de Obras Públicas, en Tenerife; cubierta con forma de conoide reglado (Arq. Guigou y Pérez Luzardo).
- Edificio de la ONCE, en Las Palmas de Gran Canaria; con fachada de hormigón pigmentado (Arq. Pérez Luzardo). Página 57, nº 10.
- Centro de Talasoterapia del Hotel Gloria Palace, en San Agustín, Gran Canaria; con estructura en forma de cubierta laminar (Arq. López Díaz). Pág. 57, nº 11.
- Edificio Proa, en Santa Cruz de Tenerife; edificio que expresa las cualidades morfológicas del hormigón visto (AMP Arquitectos). Pág. 57, nº 12.
- Espacio Cultural Tanque Cepsa, en Santa Cruz de Tenerife; singular obra que emplea al hormigón visto en su concepción más ciclópea y basamental (AMP Arquitectos).

- Sede de la Presidencia del Gobierno de Canarias, en Santa Cruz de Tenerife; edificio representativo de la Administración Pública que utiliza el recurso del hormigón como expresión de solidez (*AMP Arquitectos*). Pág. 57, nº 13.
- Auditorio de Tenerife; edificio distintivo de la cultura en Canarias con una morfología muy singular realizada gracias a la unión de la estructura de acero y hormigón armado (Arq. Calatrava). Pág. 58, nº 14.
- Instituto Rafael Arozarena de La Orotava, en Tenerife; centro docente con acabado de hormigón tratado con veladuras degradadas de diferentes tonalidades de color (*AMP Arquitectos*). Pág. 58, nº 15.
- Edificio Ción, en Santa Cruz de Tenerife; edificio de viviendas con fachada resuelta a base de paneles móviles de hormigón visto coloreado con aceites (*AMP Arquitectos*). Pág. 58, nº 16.
- Centro Cultural San Bernardo, en Los Silos, Tenerife; sala polivalente sensacionalmente integrada en el entorno con fachada exterior e interior de hormigón visto (*GPY Arquitectos*).
- Instituto de Enseñanza Secundaria Marina Cebrián, en La Laguna, Tenerife; edificio de docencia con fachada en hormigón visto y paneles de hormigón texturizado a modo de parasol (*GPY Arquitectos*).
- Escuela de Artes Escénicas de Tenerife, en Santa Cruz de Tenerife; con excelente combinación de hormigón y madera en fachada exterior e interior (*GPY Arquitectos*). Pág. 58, nº 17.
- Cubierta del vestíbulo principal del Hotel Meloneras-Palace, en Gran Canaria; cubierta laminar confeccionada con hormigón y cubierta con aplacado de cerámica (Arq. López Díaz). Pág. 58, nº 18 y nº 19.

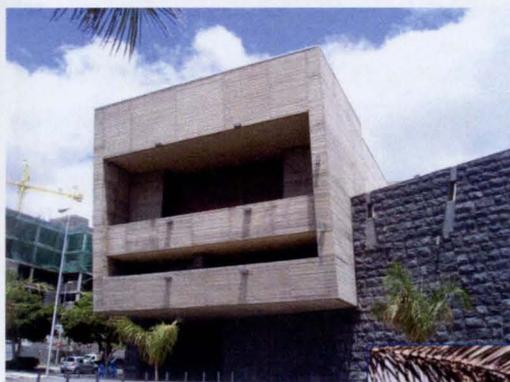
- Palacio de Congresos, en el Sur de Tenerife; utilizando al hormigón como una interpretación nueva de las formas paisajísticas y tectónicas mediante volúmenes concretos con áridos de piedra chasnera (*AMP Arquitectos*).
- Museo Oscar Domínguez, en Santa Cruz de Tenerife; trabajo excepcional de los arquitectos suizos reconocidos, que reflejan un pixelado en el muro de fachada a base de un hormigón pigmentado muy fluido (*Arq. Herzog y De Meuron*). Pág. 58, nº 20.



11



12

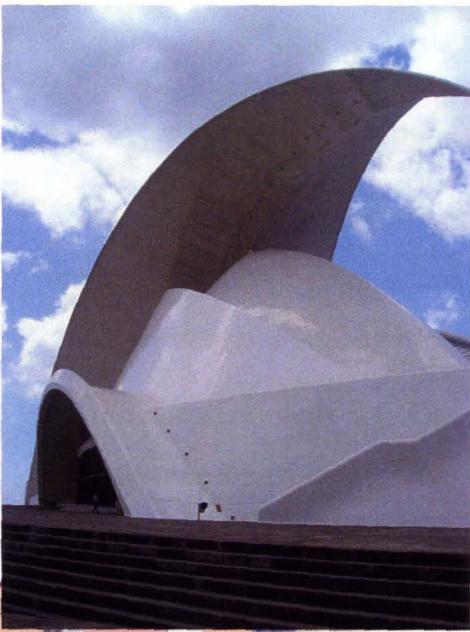


13



10

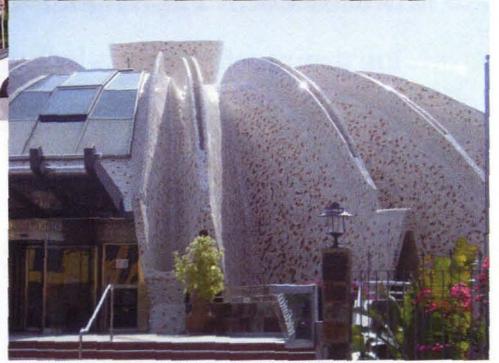
14



18



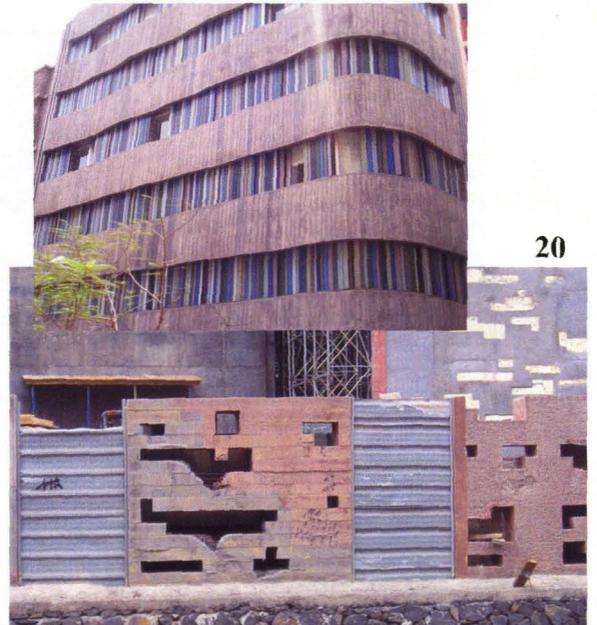
19



16



20



17



15



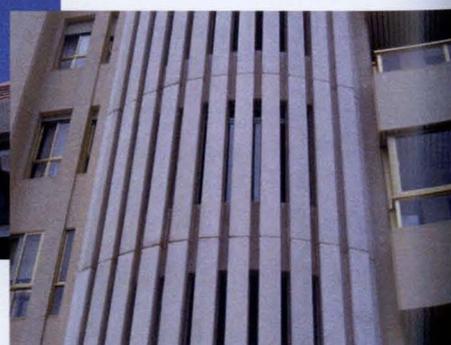
Ejemplos de hormigón visto en Canarias (Segundo Período)

Por otra parte y a pesar de la trascendencia actual, no existen estudios significativos acerca de los prefabricados de hormigón para fachadas en Canarias. Una referencia de Águila García ya citada nos reflejaba la seña de más de mil viviendas por año en Las Palmas de Gran Canaria a principios de los años setenta (ÁGUILA, 1974). El seminario de prefabricación de Fernández Ordóñez (1974) puntualiza la fecha de 1967 hasta 1968 para la construcción de esta factoría. Los edificios residenciales ejecutados suponen 1.200 viviendas en el núcleo de La Paterna y otras 1.400 viviendas en el Polígono Cruz de Piedra, ambos en el municipio de Las Palmas de Gran Canaria. La localización protegida del viento norte de los conjuntos propició un acierto para las condiciones de habitabilidad frente a otras propuestas en mesetas donde la humedad proveniente de los alisios ha provocado múltiples problemas de humectación. El procedimiento de montaje de paneles es el sistema *CAMUS* y la factoría presentó un alto grado de mecanización. El equipo es en su mayoría de procedencia francesa y las fases de trabajo son muy adecuadas para el objetivo marcado. Esta industria tuvo una capacidad de ejecución de 1.600 viviendas al año, pero estuvo concebida para ampliar esta producción hasta 3.000 residencias anuales. Sin embargo y aunque el resultado de estos edificios fue el correcto (en función de sus expectativas), no llegó a prosperar esta iniciativa de industrialización de la prefabricación en Canarias.

La arquitectura turística también optó en algunos edificios por la ejecución de paneles prefabricados. Encontramos en el sur de Gran Canaria paneles portantes y no portantes para fachada. Algunos ejemplos concretos de apartamentos los encontramos en San Agustín, también hoteles en Playa del Inglés y Maspalomas, edificios comerciales como el Faro I. Más reciente es el Centro Comercial Faro II del arquitecto Fábregas que se resuelve con prefabricados de hormigón proporcionados por la empresa *ESCOFET*. De estas décadas encontramos también como ejemplo el edificio comercial de Galerías Preciados, de los equipos de

arquitectos Feduchi y Cáceres Morales, que fue cerrado con paneles de hormigón tratados con chorro de arena a presión.

De ejecución más actual es el edificio residencial Granca, en Las Palmas de Gran Canaria, de los arquitectos Juárez y Bordes, que contiene un expresivo panel que ocupa dos plantas de altura confeccionado con GRC y que presenta una terminación pétreo a la vez que tamizada.



Paneles de hormigón prefabricado en Canarias

En la actualidad, no es factible la realización de viviendas con prefabricados de hormigón en Canarias. Tanto el panel alveolar como el panel macizo de hormigón que se fabrica en las Islas no cumplen con los requisitos indispensables de habitabilidad. La solución se enfocaría hacia la elaboración en Canarias de paneles multicapa unidas a un diseño de soluciones arquitectónicas específicas.

Sin embargo, consideramos esencial un estudio pormenorizado acerca de los paneles prefabricados de hormigón. No nos cabe duda debido al importante porcentaje de suelo urbano destinado a uso industrial, así como el creciente número de edificaciones industriales en los últimos años debe hacernos recapacitar del efecto producido en nuestro paisaje.



Efecto negativo sobre el paisaje canario

Si bien por otra parte también encontramos ejemplos que nos sirven para ilustrar los trabajos bien realizados. Los arquitectos, previamente citados, Saavedra y Díaz-Llanos presentaron diferentes chapados prefabricados con hormigón para fachada en edificios residenciales como el Wildpret, así como en el Hotel Palm Oasis de Maspalomas -acabado en piedra volcánica característica de nuestra tierra-. De reciente actualidad, se han premiado unas naves industriales en la dársena pesquera del puerto de Santa Cruz de Tenerife del equipo de Arquitectura y Medio

Ambiente *AMA*. Para este edificio se diseñó un sistema que permite la integración y separación de las naves mediante paredes de elementos modulares de hormigón armado.

2.2.7 Consideraciones particulares a la prefabricación de hormigón

Estamos convencidos de que la industria de la construcción requiere un cambio importante en la selección de los componentes de los edificios. Se están incrementando los requerimientos acerca de las prestaciones de estos elementos y con los materiales prefabricados es posible atenderlos. La apelación de más altos requerimientos para edificios comerciales, industriales, civiles o domésticos hace replantear el arte de construir. La industria de hormigón prefabricado está perfectamente preparada para acometer estas altas demandas por el nivel de calidad de la prefabricación que está incrementándose enérgicamente. (ELLIOT, 2002).

El nivel de prefabricación en la construcción de edificios está creciendo en este nuevo siglo. También aumenta la construcción mixta donde otros materiales están siendo combinados con hormigón prefabricado para proveer de más eficiencia a los edificios. Por otra parte, la industria de la construcción está siendo requerida para un diseño multifuncional, donde el óptimo uso de los componentes que forman los edificios debe ser maximizado. La prefabricación presenta más rápidas alternativas que los tradicionales métodos de ejecución in situ.

En un último apartado Van Acker nos expone que estos recursos del sistema de construcción prefabricado no sólo responden a las clásicas ventajas relatadas de condiciones de trabajo, tecnología punta y velocidad de construcción. “Además atienden a las nuevas propiedades de materiales como las altas prestaciones y auto compactación del hormigón, a sistemas de estructuras y edificación mixtos, a alta

tecnología de manufactura, automatización, servicios integrados de productos y otros” (VAN ACKER, 2002: p. 684).

Los técnicos y profesionales de la construcción debemos prestar atención a las nuevas instancias demandadas. No debemos encasillarnos únicamente en nuestros tradicionales métodos de operación. La prefabricación de paneles de hormigón es, como consecuencia de lo desarrollado en este capítulo, una opción apropiada para la ejecución de fachadas en edificios industriales, además de otras posibilidades. Debemos aguzar el conocimiento en las nuevas propiedades del hormigón que se han desarrollado en las últimas décadas y aplicarlas como prestaciones directas para el edificio.

Hay quienes opinan que el sector de la construcción, por una serie de circunstancias específicas no admite un proceso de industrialización. Somos de opinión contraria, sin que ello deba hacer presuponer que la vía de la prefabricación a base de elementos de hormigón sea ni el único ni el mejor de los caminos. Los sistemas industrializados continúan siendo perfectamente válidos e incluso aconsejables en determinadas circunstancias. En algunos casos la industrialización de la construcción aparece como una necesidad si se trata de responder a la demanda de edificación de manera científicamente responsable y tecnológicamente adecuada. En este sentido, la prefabricación se ha instaurado indudablemente en la ejecución de una tipología de edificios muy clara; nos referimos al edificio industrial.

El edificio industrial se construye en urbanizaciones destinadas a este uso y aparece por tanto muy concentrado. No se refleja la sensación real de la cantidad que existe porque no lo vemos en nuestras ciudades o pueblos, sólo los percibimos desde las autopistas en las afueras de la ciudad o próximos al puerto o aeropuerto. En realidad el edificio sólo se trata de un gran contenedor de paredes y cubierta donde implantar la planta de producción o albergar el almacenamiento. El edificio

en sí mismo no importa en la mayor parte de los casos. Sólo algunos ejemplos reconocen que su edificio es la imagen de la empresa y se preocupan en darles un tratamiento de fachada. No importa el aislamiento, no importa la sustentación, no importa la estética, sólo importa la cubrición de las posibles inclemencias del tiempo y la seguridad ante la incursión indebida de extraños. Al recorrer estas urbanizaciones encontramos que la ejecución está muy sistematizada. Como ejemplo de elementos prefabricados de hormigón encontramos las paredes exteriores, resueltas con paneles de hormigón de grandes dimensiones.

También debemos añadir que esta industrialización no ha llegado a la empresa de prefabricados del hormigón de la misma manera que a la producción de otros objetos de uso humano. Por parte del arquitecto, "la industrialización requiere una metodología moderna del proyecto que partiendo de los elementos básicos componentes, establezca una sintaxis que permita configurar una nueva realidad construida. Por parte de la industria, es necesario una apertura al proyecto, y un grado de mecanización suficiente para hacer compatible el producto con los requerimientos económicos de la vivienda actual." (NAVARRO y ESCAÑO, 2002: p. 514).

2.3 HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES

En el apartado anterior hemos subrayado que los paneles prefabricados de hormigón son adecuados para fachada. Las prestaciones que son demandadas a estos elementos constructivos deben resolverse no sólo con el diseño de la pieza en sí mismo, sino también con la evolución del material constitutivo. El material constituyente del panel que estamos tratando en esta tesis es, como es obvio, el hormigón. En esta sección analizaremos la evolución del hormigón en las últimas décadas con el fin de comprender la mezcla actual, y qué prestaciones ofrece. Éstas se entienden como unos servicios prestados para su cometido en el elemento constructivo durante la ejecución y posteriormente también en la función del edificio.

A lo largo de este capítulo desplegaremos el desarrollo técnico del hormigón a lo largo del tiempo. Inicialmente, haremos una recorrido general de los antecedentes históricos que conducen a los hormigones con prestaciones específicas. Situaremos los hormigones de altas prestaciones como la siguiente evolución de los hormigones de alta resistencia. Por último, pondremos énfasis especial en el hormigón autocompactante como el exponente máximo del desarrollo del hormigón en los últimos años.

2.3.1 Antecedentes históricos

La historia del cemento está referida siempre a la del hombre en la búsqueda de un espacio para vivir con la mayor comodidad, seguridad y protección posibles. Esta relación se inicia en el momento en el que el ser humano comenzó a aplicar esfuerzos para delimitar su espacio vital, satisfaciendo primero sus necesidades de vivienda y después levantando construcciones con requerimientos específicos. Templos, palacios, museos, viviendas son el resultado de un esfuerzo que suponen hito y fundamento del progreso de la humanidad.

Pocos datos y confusos se tienen de la utilización de la cal y sus derivados en época neolítica. Los más antiguos y conocidos se remontan, al menos, a hace más de 9.000 años donde se han encontrado suelos edificados de esa edad en el Yiftah, en Israel, que presentaban una resistencia a compresión de 40MPa. Otros ejemplos que datan del año 6.000 a. J.C. se encuentran en Anatolia en la actual Turquía y en Djeitun (Turkmenistan), al oeste del mar Caspio, existen también morteros de cal en viviendas pertenecientes a culturas del tercer y cuarto milenio antes de Jesucristo. En Mesopotamia apareció un horno de cal del 2500 a. J.C. (MELLAART, 1981).

El pueblo egipcio utilizaba un mortero, mezcla de arena con materia cementosa, para unir bloques y losas de piedra al erigir sus asombrosas construcciones.

Los constructores griegos descubrieron que ciertos depósitos volcánicos, mezclados con caliza y arena producían un mortero de gran fuerza, capaz de resistir la acción del agua, dulce o salada. Un material volcánico muy apropiado para estas aplicaciones lo encontraron los romanos en un lugar llamado *Pozzuoli* con el que aún denominamos este tipo de roca: puzolana.

Con los agregados apropiados, fueron capaces de producir el *Opus Caementitium* o "cemento romano", precursor de nuestro hormigón y que dio origen al término cemento (VITRUBIO, 1987).

El descubrimiento de los aglomerantes hidráulicos, es decir, susceptibles de endurecer en contacto con el agua, se remonta a 1756. Smeaton, encargado de dirigir la construcción del faro de *Eddyston -Plymouth-* se propuso encontrar una cal que pudiera resistir la acción del agua del mar. Los ensayos efectuados con una caliza de *Averthan* dieron resultados positivos. Hacia 1812, Vicat estudió las mezclas de calizas puras y arcillosas, demostrando definitivamente que las propiedades hidráulicas dependen de los componentes que se forman durante la cocción entre la cal y los constituyentes de la arcilla.

En 1824, el constructor inglés Joseph Aspdin y James Parker, elaboran y patentan un cemento que afirman ser tan duro como la piedra de Pórtland (éste es el origen del llamado "cemento Pórtland"), producto obtenido mediante el cocido de una mezcla de calcáreos y arcilla finamente molida. En 1845 Isaac Johnson obtiene el prototipo del cemento moderno quemado a alta temperatura, con una mezcla de caliza y arcilla hasta la formación del "*clinker*". La exposición universal de 1891 permitió una demostración del nuevo producto y le dio una gran publicidad. A partir de ese momento, la mayor parte de los fabricantes de aglomerantes practicaban la calcinación a alta temperatura y la cal fue reemplazada progresivamente por el cemento y por el hormigón. El hormigón, como producto elaborado con cemento, se origina por una mezcla de la pasta hecha de agua y cemento con áridos, de modo que al hidratar el cemento y endurecer la pasta, los granos quedan bien adheridos.

Desde finales del siglo XIX los principios básicos de la fabricación del hormigón no han experimentado cambios. Sin embargo, han evolucionado técnica y científicamente de manera muy importante. En este sentido cabe destacar el descubrimiento de una gama de aglomerantes derivados del Pórtland, aglomerantes de mezcla (cementos



Hormigón a principios de siglo XX

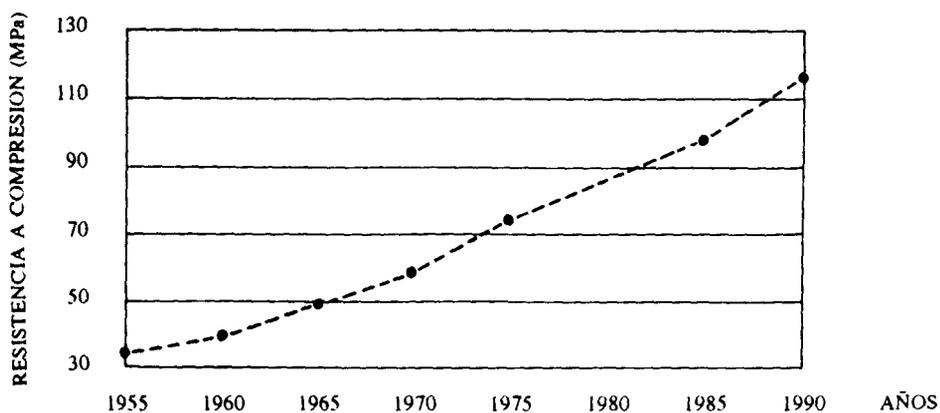
puzolánicos, metalúrgicos, etc.) y aglomerantes especiales (de aluminio). Además, estos avances también consistieron en la introducción de otros materiales adicionales a los inicialmente considerados. Con la incorporación al hormigón de nuevos productos se hizo posible modificar a voluntad alguna de sus propiedades.

Un grupo dentro de estos productos fundamentales en la evolución del hormigón a lo largo del siglo XX es el conjunto de los aditivos reductores de agua. Esta afirmación la manifiesta la importante investigación y literatura habida al respecto, tanto en libros como en artículos comentados. También se demuestra en el hecho de que hoy en día no es posible elaborar estos hormigones de altas prestaciones, a los que nos referimos, sin los aditivos reductores de agua. Teniendo en cuenta lo perjudicial que resulta el exceso de agua en la confección de aglomerantes, podemos afirmar que cualquier aditivo que implica disminuir esta relación del agua y cemento beneficia la mezcla. De hecho, el enemigo principal de un buen hormigón es la sobreabundancia de agua en su amasado (FAVRE, 1991).

En los años treinta del pasado siglo se desarrollaron una primera generación de aditivos que permitían reducir el agua del hormigón aproximadamente un 10% o conseguir, con igual relación agua/cemento, un aumento de la fluidez (DOMÍNGUEZ, 2003). Años más tarde se constataría la mejora de otras propiedades del material, especialmente, la plasticidad, la compacidad y la resistencia (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993). En los años sesenta se desarrolla una segunda generación de aditivos reductores de agua. Estos aditivos, que reciben el nombre de superplastificantes o reductores de agua de alta eficacia, suponen una revolución en el mundo del hormigón, ya que permiten confeccionar hormigones de altas resistencias y altas prestaciones que sin su utilización serían impensables.

2.3.2 El hormigón de altas resistencias - HAR -

A partir de estas fechas, el incremento de resistencias en el hormigón es constante. En este gráfico del libro dedicado al hormigón de alta resistencia de Germán González-Isabel, observamos la evolución significativa de las resistencias a compresión del hormigón en las últimas décadas (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993: p. 11).



Evolución de la Resistencia a compresión en los últimos años

Los hormigones de alta resistencia -HAR- llevan este calificativo por su condición de resistencia mecánica. En concreto, corresponde a una resistencia a compresión de este hormigón que supera un nivel exigido por la normativa. Con todo se trata de la única característica indispensable para esta clase de hormigón. En efecto, Callander, Clark y Lees coinciden con Aguado y Olivier al señalar que el término H.A.R. pudiera no ser suficientemente preciso y proponen el más preciso hormigón de altas prestaciones -HAP-, significado que añade a las características inherentes de alta resistencia otras como facilidad de compactación, resistencia ante agentes agresivos, mayor durabilidad, etc... Como destacan los autores, es

condición imprescindible una serie de concurrencias (CALLANDER, CLARK y LEES, 1992) y (AGUADO y OLIVIER, 1992):

- La necesidad de utilizar un reductor de agua de alta actividad.
- Un bajo contenido en agua y una adecuada relación agua/cemento.
- Una docilidad suficiente.

Según Germán González-Isabel, la definición que mejor recoge los aspectos de estos hormigones es la adoptada por el CEB-FIP. Para estos organismos, los hormigones de alta resistencia son mezclas de mortero de cemento y áridos cuya resistencia a compresión -determinada sobre probeta cilíndrica- está comprendida entre el límite que al respecto establecen las normas nacionales y 130 MPa, valor este último que representa en la práctica el valor máximo de resistencia alcanzable con áridos convencionales. En España la normativa EHE marca el HAR a partir de 50 MPa. Consideramos acertada esta última definición que se basa en la resistencia mecánica a compresión, para los hormigones de alta resistencia. Creemos que cuando nos referimos a hormigones cuya característica fundamental es la alta resistencia mecánica debemos definirlos como H.A.R., independientemente de otras características colaterales alcanzadas (CEB-FIP, 1990).

Estas definiciones nos hacen reflexionar acerca de las restantes cualidades que acompañan a los H.A.R. De manera análoga cabe pensar que cuando lo que intentamos conseguir es alguna de las otras cualidades, deberíamos denominar al hormigón según dicha prestación superior. Así, por ejemplo, 'hormigones de alta durabilidad' o de alta docilidad. No obstante consideramos cuando buscamos un grupo de ellas o todas en general el hormigón debería llamarse hormigón de altas prestaciones -H.A.P.- y en su caso, especificar la propiedad predominante.

Nuestro trabajo de investigación trata acerca de los H.A.P., debido a las múltiples prestaciones que hemos intentado alcanzar en nuestras experiencias y

dentro de éstas, la autocompacidad ha sido la característica prioritaria. Sin embargo, entendemos que los H.A.R. suponen el antecedente en la historia de este grupo de hormigones con determinantes características. Nosotros hemos recogido múltiples datos del libro de Germán González-Isabel, dedicado a los hormigones de altas resistencias, para establecer un acercamiento concienzudo a estas mezclas con importantes resistencias a compresión. Corresponda, por tanto esta referencia inicial a la generalidad de toda la sección de H.A.R. (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993).

2.3.2.1 Observaciones previas del hormigón de altas resistencias

Los hormigones de alta resistencia presentan unas particularidades que los diferencian claramente de los hormigones convencionales. Esta consideración debe atenderse de cara al proceso de producción de estos materiales. Es necesario decir, por tanto, que los sistemas habituales de acopio de materias primas al aire libre, de medición del contenido en agua y humedad, de incorporación de aditivos y adiciones deben corregirse y adaptarse a una mayor precisión de control.

Debido a esta diferencia tajante entre este hormigón y el tradicional, no son adecuados los métodos de dosificación habituales de Fuller, Bolomey, De la Peña, Faury, etc. Se constata en esta reseña que cualquiera de los husos granulométricos de referencia empleados en los métodos citados conduce a incorporar cantidades de arena muy superiores a las que son recomendables para los H.A.R. Similar conclusión respecto de estos métodos se establece al determinar la cantidad de agua necesaria para amasar estos hormigones. De hecho, como ya hemos comentado, siempre vamos a encontrar en la bibliografía consultada coincidencia en señalar como imprescindible la reducción de agua al mínimo necesario para conseguir la hidratación del material conglomerante. Estas afirmaciones debemos hacerlas extensivas de igual forma para los H.A.P. puesto que los componentes y procesos de producción son muy similares, como veremos a lo largo de este capítulo.

En los H.A.R. además se adoptan cantidades algo mayores de cemento de las habituales para hormigones convencionales. Esta circunstancia junto con la condición anterior tiene como resultado una baja relación agua/cemento que obliga al empleo de superfluidificantes o superplastificantes de probada eficacia. Por otra parte, es muy conveniente una adición mineral que reduce el calor de hidratación y colabora en mejorar la docilidad del hormigón resultante. Generalmente, se utiliza una adición derivada de la fabricación del silicio metálico denominado microsílíce (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993).

En los hormigones tradicionales, las dosificaciones habitualmente utilizadas confieren a la pasta de mortero unas características resistentes muy inferiores a la de los áridos empleados. Esto conlleva que la rotura del hormigón se produce generalmente por agotamiento de la capacidad de dicha pasta. Por el contrario, en los hormigones de alta resistencia y como consecuencia del fuerte incremento experimentado de la capacidad resistente de la pasta de mortero, es muy posible agotar la capacidad resistente del árido grueso, por lo que es imprescindible estudiar exhaustivamente el material para optimizar la capacidad de resistencia de la pasta en el hormigón. Esta especificidad del material hace problemática su fabricación industrial si se continúa con los sistemas habituales de mala práctica. Por otra parte, es muy factible su realización, únicamente será necesario el rigor en la elección de los materiales y en el proceso e elaboración. Como apunta González-Isabel (1993) “aunque es relativamente fácil la obtención de H.A.R. en laboratorio bajo condiciones controladas, su producción a escala industrial puede resultar más problemática” (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993: p. 15). Según C. Parthenay, en la fabricación de hormigón de alta resistencia nada es “aproximado”. Por el contrario, se requiere toda la atención y los conocimientos de los profesionales de la industria del hormigón (PARTHENAY, 1992).

Con respecto al hormigón convencional, el hormigón de altas resistencias necesita un control de producción más estricto. En este sentido, un hormigón común presenta un nivel tensional de servicio muy por debajo de la resistencia requerida, mientras que en los HAR está circunstancia no se da, por lo que el compromiso es mayor. Además el error en la incorporación de algunos componentes (aditivo o adición) puede ser trascendental. El autor Fernández Gómez nos expone las particularidades de este control del hormigón de altas resistencias como material, así como de sus componentes (FERNÁNDEZ GÓMEZ, 2003).

2.3.2.2 Materiales constituyentes del hormigón de altas resistencias.

Los materiales constituyentes de los hormigones de alta resistencia son, en general, los empleados en la elaboración del hormigón convencional. Nos referimos al cemento, agua, áridos, arenas y finos. Pero además resulta obligada la incorporación de un agente reductor de agua de alto rango o superfluidificante y de una adición, generalmente de microsílíce, para resistencias superiores a los 80 MPa. Analizaremos las características y propiedades de los mismos, contemplando los aspectos que tienen mayor incidencia en los H.A.R.

- El cemento: Parece lógico pensar que para la fabricación de H.A.R. resulte obligatorio el uso de cementos de los tipos I/55 o I/55 A. No obstante y demostrado por las distintas investigaciones al respecto, no encierra duda de que además de la propia resistencia del cemento, existen otros factores que condicionan la resistencia del hormigón resultante. Nos referimos, por ejemplo, a la finura del material o a su composición mineralógica. En tal sentido y según González-Isabel, sería además “razonable dejar abierta la posibilidad de estudiar la incorporación de cementos de categoría inferior a la inherente a los cementos I-55; condicionada,

naturalmente, a la verificación de su idoneidad". Resulta eficaz el uso de cementos I/55, pero factible la utilización de cementos I/45 (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993).

Debemos atender a los materiales constituyentes del cemento, puesto que su composición mineralógica, su estructura química y su finura de molido influirán tanto en las capacidades mecánicas como en la demanda de agua, favoreciendo o perjudicando las resistencias a edades tempranas, la consistencia o docilidad en estado fresco o las resistencias finales. Como ejemplo, leemos que el SC₃ (silicato tricálcico) contribuye decisivamente a la resistencia en las primeras edades y en la resistencia final; por su parte, el SC₂ (silicato bicálcico) tiene menor incidencia al principio, pero su importancia es primordial después; por el contrario, el contenido de AC₃ (aluminato tricálcico) tiene una básica influencia en las edades tempranas (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993). Escogidos estos contenidos en la elección del cemento nos proporcionarán, en este caso derivado para las resistencias, unas prestaciones determinadas. Al mismo tiempo, los estudios del equipo de Hanna establecen que, para el cemento pòrtland, el contenido de AC₃ en valores superiores al 8% del contenido de cemento es causa notable de pérdida de fluidez del hormigón y de obtención de fraguados y endurecimientos rápidos. González-Isabel, concreta que para el empleo de cementos Pòrtland puzolánicos o de escorias se precisa un análisis exhaustivo (HANNA; LUKE, PERRATON y AITCIN, 1989).

Por lo demás, siempre es conveniente tener un análisis químico completo del conglomerante y ensayos previos en laboratorio, puesto que un determinado superfluidificante puede comportarse de manera diferente con cementos distintos. Dicho comportamiento depende fundamentalmente de la finura de molido y de su composición química.

Como patrón de referencia, mostramos los valores de composición química exigidos por la ASTM C-150 a los cementos del tipo II en la fabricación de hormigones de alta resistencia.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Pérdida al fuego	Residuo insoluble	AC ₃
≥ 20,0%	≤ 6,0%	≤ 6,0%	≤ 6,0%	≤ 3,0%	≤ 3,0%	≤ 0,75%	≤ 8,0%

- Los áridos: Como ha quedado despejado anteriormente, la baja relación agua/cemento es fundamental a la hora de configurar un hormigón con alta resistencia. Este aspecto implica la necesidad de que el agua demandada por el árido sea lo más baja posible. Esta instancia de agua es función principalmente de la forma y tamaño de los áridos, de la cantidad de partículas finas adheridas en éstos y de la composición mineralógica del material.

Los áridos los encontramos directamente en la naturaleza, esto es, en las rocas (excepto los productos artificiales que en ciertas ocasiones utilizamos como áridos y que no contemplamos en esta investigación). A nivel inicial los podemos clasificar según su procedencia en áridos directos e indirectos. Los áridos directos o naturales precisan sólo la operación de extracción y clasificación. Cuando además exige la trituración se le considera indirecto o de machaqueo. Esta clasificación la consideramos adecuada para nuestra exposición. Recogemos de este mismo libro una tabla que clasifica los tipos de roca más significativos (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993: p. 35).

CLASIFICACION DE LAS ROCAS

CLASIFICACION	FORMACION	TIPOS		CARACTERISTICAS GENERALES	ARIDOS MAS SIGNIFICATIVOS
IGNEAS	Son originadas directamente por la consolidación de un magma procedente del interior de la corteza terrestre.	PLUTONICAS O INTRUSIVAS	Consolidadas a grandes profundidades bajo un régimen de enfriamiento lento (Presentan estructura granulada).	Suelen dar áridos buenos, duros, tenaces y densos, siempre que se encuentren en estado inalterado. En caso contrario y debido a diversos procesos (caolinitización de los feldespatos p. ej.) pierden la cohesión que une sus granos y desaparece la mayoría de sus buenas propiedades.	GRANITO, SIENITA, DIABASA, DIORITA, GABRO, OFITA, SERPENTINA, PORFIDOS.
		HIPOABISALES O FILONIANAS	Consolidadas a profundidades intermedias, con enfriamiento menos lento y por etapas (Presentan estructura microgranulada).		
		VOLCANICAS O EFUSIVAS	Consolidadas en la superficie terrestre con enfriamiento rápido (Presentan estructura microgranulada o vítreo).		
SEDIMENTARIAS	Pueden considerarse cuatro períodos: a) Desintegración de rocas ya existentes. b) Transporte de los productos de desintegración por aire o agua. c) Sedimentación de los productos arrastrados. d) Consolidación.	SILICEAS		Al ser mucho más variadas que las ígneas, sus características también lo son. En general, pueden considerarse como no convenientes para la obtención de áridos aquellas rocas que presentan poca densidad o mucha absorción. Las de naturaleza caliza son las que producen mejores áridos. Las evaporitas formadas por las anhidritas, yesos y sales no son nunca apropiadas.	SILEX ó PEDERNAL, ARENISCA, CUARCITA, ARCOSA, MACINO, CONGLOMERADOS, GRAUWACA, GRAVAS, ARENAS
		ARCILLOSAS			ARCILLA, CAOLIN, MARGA, FILADIO, PIZARRA
		CALIZAS			CALIZA, CALIZA MARMOREA, CONGLOMERADOS, CALIZOS, MARMOL, DOLOMITA, ANHIDRITA, ALGEZ.
MIAMORFICAS	Pueden proceder de cualquiera de los dos grupos anteriores, siendo modificados posteriormente por procesos internos de calor o de presión.			Son rocas que presentan características intermedias de las de los grupos anteriores.	GNEIS, MICACITAS, TALCOXITAS, FILITAS.

La normativa española determina unas características cuyo cumplimiento es exigible a los áridos utilizados en la fabricación de hormigones. Estas exigencias se incluyen en la siguiente tabla (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993: p. 36).

CARACTERISTICAS A DETERMINAR	METODO DE ENSAYO	VALORES DE ESPECIFICACION
Análisis granulométrico	UNE 7139	
Terrones de arcilla	UNE 7133	≤ 0,25%
Partículas blandas	UNE 7134	≤ 5,00%
Material retenido por el tamiz 0,063 (UNE 7050) y que flota en un líquido de peso específico 2.	UNE 7244	≤ 1,00%
Compuestos de azufre	UNE 83120	≤ 0,4%
Reactividad con los álcalis del cemento	UNE 7137	NO REACTIVOS
Resistencia al desgaste	UNE 83116	≤ 40
Absorción de agua	UNE 83134	≤ 5%
Contenido de finos ⁽¹⁾	UNE 7135	≤ 1% ⁽¹⁾
Pérdida en peso frente a sulfatos	UNE 7136	≤ 12% (sulfato sódico); ≤ 18% (sulfato magnésico)
Coefficiente de forma ⁽²⁾	UNE 7238	≥ 0,25 ⁽²⁾

En general, González-Isabel considera aplicables estas mismas exigencias para los áridos en la elaboración de HAR, con excepción de los áridos lajosos. Según esta referencia, éstos deberían estar relegados a la posibilidad de empleo en hormigones de alta resistencia. Esta enunciación refleja la ineptitud de estos áridos para la ejecución de hormigones especiales.

Evidentemente, establecida la preferencia de elegir como áridos las rocas de nuestro entorno, se recomienda un estudio que analice sus características físico-químicas y la composición mineralógica. Este examen conllevará una respuesta ante la validez del árido para la elaboración de hormigón especial. Más adelante, entraremos en profundidad en esta cuestión que refleja una de las problemáticas de los áridos canarios, como ya estudiara en su momento la tesis doctoral de Guigou Fernández (GUIGOU, 1989).

Atendiendo a la superficie específica, debemos considerar que el mayor tamaño de árido implica la posibilidad de disminuir el agua, lo cual se traduce en incremento de resistencia. Pero este efecto puede no resultar suficientemente positivo debido a otras derivaciones de signo contrario, como nos expone González-Isabel. Nos referimos, por una parte, a que la zona de transición entre el árido y la pasta de cemento se hace más heterogénea y, por otra, a la mayor resistencia de los áridos de menor tamaño. Esta segunda circunstancia es debida a la eliminación de los defectos internos del árido de tamaño superior como poros, microfisuras o materiales blandos en el proceso de machaqueo. En los hormigones de alta resistencia, precisamente por la elevada sollicitación mecánica a que son sometidos los áridos, esta consecuencia citada es extraordinariamente importante. Además, se ha de observar que los áridos indirectos pueden presentar estados de fisuración debido a la voladura y posterior machaqueo.

De todo ello, deducimos que se considera favorable el uso de áridos naturales y se recomienda utilizar unos tamaños máximos de áridos menores a los habituales,

optándose generalmente por los comprendidos entre 10 y 12,5 mm. También reseña que, previo análisis de las características, no debe desdeñarse la posibilidad de emplear un tamaño máximo que oscile entre 20 y 25 mm para HAR.

- La arena: Los áridos finos apropiados para la fabricación de HAR deben ser los obtenidos por procedimientos naturales a partir de sus rocas de origen. Se considera que los granos de las arenas de machaqueo son poco recomendables para la elaboración de HAR, debido a su forma excesivamente angulosa. Esta geometría y el excesivo contenido en polvo derivado del proceso de obtención redundan en alta demanda de agua. La consecuencia directa es una trabajabilidad insuficiente para conseguir hormigones de altas resistencias.

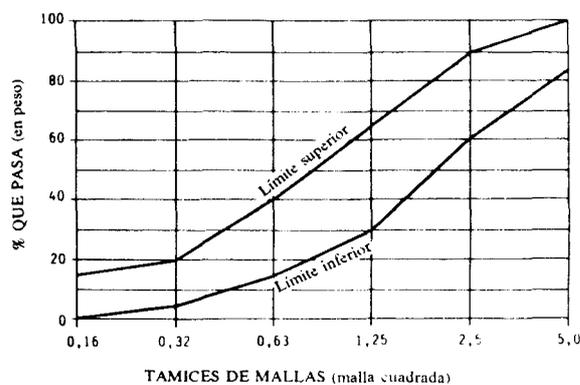
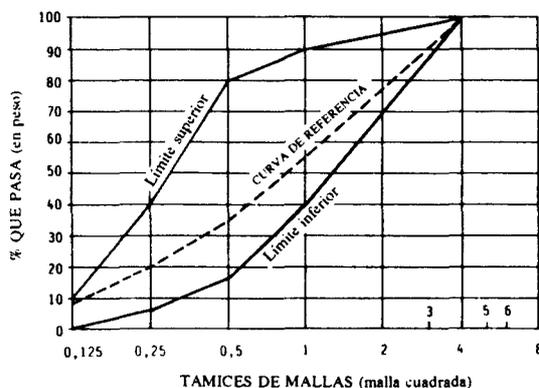
Parece evidenciarse que un valor óptimo en las características de este constituyente son las arenas rodadas y limpias con módulos de finura próximos a 3 y equivalentes de arena superiores. También se admite la posibilidad de soluciones intermedias entre arenas naturales y de machaqueo, siempre quedando suspendido a los ensayos específicos necesarios.

La variación de humedad entre dos fracciones diferentes del mismo acopio de arena puede suponer un importantísimo desequilibrio. Un ejemplo expuesto supone que entre la parte superior e inferior de un mismo depósito existen diferencias de humedad superiores al 5%. Esto implica una cantidad de agua incorporada al hormigón de 36 litros por metro cúbico, que supone una relación agua/cemento muy superior frente al valor previsto. Esta consideración implica la exigencia de vigilar la extracción y almacenamiento de las arenas, en lo que se refiere fundamentalmente a la humedad. Resulta vedado el almacenamiento de arenas a la intemperie y obligatorio el control exacto de las cantidades de material incorporadas en el hormigón, diferenciando con toda claridad qué parte corresponde a elementos sólidos o líquidos. En la tabla siguiente se recogen las especificaciones exigidas por la normativa española a las arenas aptas para su

utilización en hormigones, también se consideran aptas en la preparación de HAR (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993: p. 55).

CARACTERISTICAS A DETERMINAR	METODO DE ENSAYO	VALORES DE ESPECIFICACION
Análisis granulométrico	UNE 7139	
Terrones de arcilla	UNE 7133	≤ 1,00%
Material retenido por el tamiz 0,063 (UNE 7050) y que flota en un líquido de peso específico 2. .	UNE 7244	≤ 0,50%
Compuestos de azufre	UNE 83120	≤ 0,4%
Materia orgánica	UNE 7082	MENOR QUE EL PATRON
Equivalente de arena	UNE 83131	≥ 80 ⁽¹⁾
Contenido de finos	UNE 7135	≤ 6% ⁽¹⁾
Reactividad con los álcalis del cemento	UNE 7137	NO REACTIVO
Friabilidad	UNE 83115	≤ 40
Absorción de agua	UNE 83133	≤ 5%
Pérdida en peso frente a sulfatos	UNE 7136	≤ 10% (sulfato sódico); ≤ 15% (sulfato magnésico)

Generalmente se considera recomendable el empleo de áridos finos con módulos de finura comprendidos entre 3,00 y 3,20. Una elección excesivamente fina -módulo de finura inferior a 3,00- implicaría demasiada superficie específica de material y mayor demanda de cemento y agua. La consecuencia final sería una pasta más viscosa e inadecuada para los fines previstos. Las siguientes tablas representan curvas granulométricas de referencia para las arenas, incluyendo límites superior e inferior, propuestas por el autor Cimma y García Ballester (CIMMA, 1991) (GARCÍA BALLESTER, 1992) y (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993: p. 56 y 57).



- El agua: Se pueden adoptar los criterios de idoneidad de agua admitidos en los hormigones tradicionales, salvo la consideración adicional relativa a la posibilidad de utilizar agua de mar en confección de hormigones en masa, debido a la pérdida de resistencia que esto implica. Se presenta tabla con criterios vigentes al respecto en la Instrucción española (JIMÉNEZ MONTOYA; GARCÍA y MORÁN, 2000: p. 30)

ANÁLISIS DEL AGUA DE AMASADO Y CURADO

Determinación	Limitación impuesta por la Instrucción española	Riesgos que se corren si no se cumple la limitación	Observaciones
pH	MÍNIMO 5	<ul style="list-style-type: none"> - alteraciones en el fraguado y endurecimiento. - disminución de resistencias y de durabilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - la Norma soviética admite hasta un pH igual a 4. - con cemento aluminoso no deben usarse aguas de pH superior a 8.
Sustancias disueltas totales	MÁXIMO 15 gramos por litro	<ul style="list-style-type: none"> - aparición de eflorescencias u otro tipo de manchas. - pérdida de resistencias mecánicas. - fenómenos expansivos a largo plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> - por sustancias disueltas se entiende el residuo salino seco que se obtiene por evaporación del agua. - en zonas sujetas a fluctuaciones de nivel de agua, conviene rebajar el límite a 5 gramos por litro.
Contenido en sulfatos, expresados en ión SO_4	MÁXIMO 1 gramo por litro	<ul style="list-style-type: none"> - alteraciones en el fraguado y endurecimiento; pérdidas de resistencia. - puede resultar gravemente afectada la durabilidad del hormigón. 	<ul style="list-style-type: none"> - con cemento SR puede llegarse a 5 g/l. - la Norma soviética admite hasta 2,7 g/l con portland normal y 10 g/l con SR. - atención al contenido en sulfatos del cemento y los áridos, cuando se está cerca del límite. - se debe ser más estricto con el agua de curado.
Contenido en ión cloro	MÁXIMO 3 gramos por litro	<ul style="list-style-type: none"> - corrosión de armaduras u otros elementos metálicos. - otras alteraciones del hormigón. 	<ul style="list-style-type: none"> - para hormigón en masa puede elevarse el límite de tres a cuatro veces. - para hormigón pretensado debe rebajarse el límite a 1 gramo por litro.
Hidratos de carbono	No deben apreciarse	<ul style="list-style-type: none"> - el hormigón no fragua. - otras alteraciones en el fraguado y endurecimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> - La sacarosa, glucosa y sustancias análogas alteran profundamente el mecanismo de fraguado de los cementos.
Sustancias orgánicas solubles en éter	MÁXIMO 15 gramos por litro	<ul style="list-style-type: none"> - graves alteraciones en el fraguado y/o endurecimiento. - fuertes caídas de resistencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - el ensayo pone de manifiesto la presencia de aceites y grasas de cualquier origen, humus y otras sustancias orgánicas vegetales, que muestran una interacción con la cal liberada del cemento. - atención a la materia orgánica de la arena, cuando se está cerca del límite.

- Los aditivos: Según todas nuestras referencias consultadas, no hay ninguna duda de la necesidad de utilizar aditivos en la confección de estos hormigones. Respecto a los aditivos superfluidificantes reductores de agua, González-Isabel opina que “su descubrimiento marca el comienzo de una nueva etapa tecnológica en la fabricación de hormigón en la que es posible la obtención de productos con características consideradas incompatibles hasta entonces: Hormigones fluidos, sin segregación y baja relación agua/cemento, u hormigones fluidos de baja retracción y alta o muy alta resistencia.”

Para los HAR - a principio de la década de los noventa -, los aditivos utilizados eran los superfluidificantes reductores de agua con una composición química según las categorías (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993):

- CATEGORÍA A: Condensados de melamina – formaldehído sulfonado.
- CATEGORÍA B: Condensados de naftaleno – formaldehído sulfonado.

Ambas familias reciben el nombre de superfluidificantes, reductores de agua de alto rango o superplastificantes. La posibilidad de empleo de elevadas dosis de estos aditivos ha permitido la adopción de valores de relación agua/cemento de 0,22 o 0,23, lo que se traduce en la obtención de un producto final con muy baja porosidad y, como consecuencia, de muy alta resistencia. González-Isabel establece en 0,19 o 0,20 el valor límite inferior recomendable en la relación agua/cemento para posibilitar la completa hidratación de las partículas de cemento.

Posteriormente, en el desarrollo de los hormigones autocompactantes desplegaremos unas más desarrolladas anotaciones acerca de los aditivos superfluidificantes en la actualidad.

- Las adiciones: Para conseguir valores de resistencia superiores a los 80 MPa, además de los constituyentes anteriormente comentados, es exigible el uso de adiciones minerales. Existen algunas alternativas para elaborar HAR que podrían

ser cenizas volantes, escorias de altos hornos y puzolanas, pero la adición mineral más recurrida es el humo de sílice o microsílíce; esto es debido a su mejor capacidad potencial de incremento de resistencia frente a las otras opciones. La microsílíce se obtiene como subproducto de la manufactura industrial del ferrosilicio y silicio metálico en hornos de arco eléctrico a elevadas temperaturas. En el hormigón, la microsílíce se combina con la cal libre del cemento y permite una distribución más uniforme de los productos para su hidratación. Además, las finas partículas de la adición mineral incorporadas en el seno de un hormigón fresco mejoran la cohesividad y la trabajabilidad (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993). Dicha adición mineral es capaz de reducir la exudación y la tendencia a la segregación, dado que sus partículas interrumpen el flujo de agua que normalmente existe entre las partículas de cemento y los áridos. Con esto se consigue un hormigón más homogéneo que no presente debilidades microestructurales por la mayor relación agua/cemento en unas zonas que en otras. Por otra parte, el tamaño y la forma esférica de las partículas de microsílíce permite rellenar los huecos existentes entre los alargados y angulosos granos de cemento. Esta razón contribuye a obtener una baja relación agua/cemento y como consecuencia, una mayor densidad de la pasta de cemento con los beneficios de resistencia y durabilidad que esto representa.

Al mismo tiempo, existe otra razón por la que la microsílíce es fundamental en la confección de HAR; se trata de la potenciación de la capacidad adherente entre los áridos y la pasta. En microestructura, existe una zona de la pasta muy cerca del contacto con el árido que se la ha definido como 'zona de transición'. La adición del humo de sílice implica también una obtención de zonas de transición cuya capacidad resistente y de adherencia resulta extraordinariamente incrementada. Al igual que el resto de los materiales constituyentes, esta adición debe tener su adecuada proporción en la dosificación. Un estudio de INTEMAC -Instituto

Técnico de Materiales de Construcciones- destaca que existe un incremento importante de agua demandado por parte de la microsílíce añadida y que un aumento de la adición por encima de lo necesario no lleva a aumentar las resistencias. Estos datos hacen suponer que aumentar el humo de sílice por encima de lo estrictamente necesario no mejora las resistencias y además significa un mayor gasto (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993).

Asimismo, se debe añadir que en regiones donde el humo de sílice es un producto de importación incorpora un sobrecoste de transporte importante, razón que debe tenerse en cuenta para el caso de Canarias.

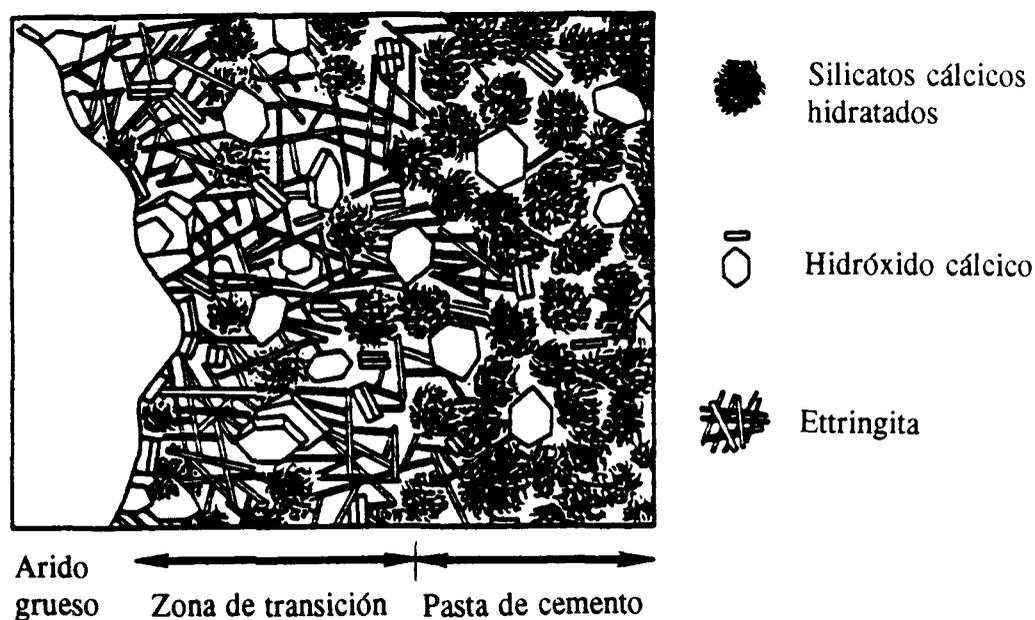
2.3.2.3 Microestructura del hormigón de altas resistencias

Tradicionalmente, el hormigón ha sido considerado como un material formado por áridos ocluidos en una matriz de pasta de cemento. Es cierto y en términos generales podemos considerar que un hormigón está constituido por un 65-75% de áridos y un 25-35% de pasta de cemento. Las características prestadas por esta mezcla resultarán de las que ofrezcan los propios áridos en sí mismos, de la pasta de cemento y de la adherencia entre ambos.

El árido lo suponemos bueno puesto que ha sido seleccionado en canteras por su buen comportamiento. Sin embargo, la pasta de cemento endurecida es un material heterogéneo y poroso. La resistencia de la pasta de cemento obedece, por una parte, a la naturaleza de la parte sólida de dicha pasta, que también admitimos como buena puesto que depende directamente del cemento, el cual está caracterizado como resistente. Por otra parte, también está en manos de su porosidad. Zaitsev analizó la relación de la resistencia con la distribución y tamaño de poros. De esta manera estableció que la disminución del número de poros y del tamaño máximo de los mismos conduce a incrementos de resistencia del material.

La porosidad es principalmente función de la relación agua/cemento y del grado de hidratación de la pasta (ZAITSEV, 1980).

Un examen más detallado ha demostrado que existen diferencias microestructurales entre el conjunto de la pasta de cemento y la pasta contenida en una capa de 50 a 100 μm de espesor, localizada alrededor de las partículas de árido grueso, conocida como “zona de transición”. Además de resistencia por si mismo, debe dar adherencia con el grano grueso. El siguiente gráfico muestra lo que sucede en el área de transición (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993: p. 23):



Debido al agua depositada, por efecto pared, en la superficie de los áridos gruesos, la relación agua/cemento de la pasta en la zona de transición es mayor a la existente en una distancia superior. Como secuela de esta abundancia de agua se forman agrupaciones de grandes cristales que tienden a cerrar un considerable volumen de huecos. La diferencia microestructural entre la pasta de cemento existente en la zona de transición y el núcleo de la pasta de cemento es fundamental a la hora de determinar las características resistentes del hormigón. Si consideramos al hormigón como una cadena de elementos compuesta por tres

eslabones: árido grueso, zona de transición y zona de núcleo, la primera fisura comienza a desarrollarse en la zona de transición. Por consiguiente, la mejora de la resistencia de esta zona es ineludible para la obtención de hormigones de alta resistencia.

Según Jambor, la relación agua/cemento afecta no solamente a la porosidad de la pasta de cemento, sino que incide en la calidad de los productos de hidratación. Los productos de hidratación que cristalizan en el espacio ocupado por el agua que rodea las partículas de cemento son conocidos como productos externos. Los productos de hidratación obtenidos en reacciones en estado sólido del cemento se designan productos internos y son más compactos y cristalinos (JAMBOR, 1976). Es decir, mientras el hormigón se encuentra en estado fresco se van conformando productos cristalinos muy débiles pero a medida que el hormigón va solidificando, por tanto constriñendo el espacio por otros cristales ya formados, la cristalización es más entrelazada y compacta. Por tanto y según se deduce de esto, la mejora de la resistencia del hormigón pasa por una baja relación agua/cemento, que significa la disminución y mejora de la porosidad (reduciendo su cantidad, su tamaño y defectos puntuales) y también por la menor cristalinidad de los productos de hidratación (mejorando la calidad de los silicatos cálcicos hidratados del cemento).

2.3.2.4 Consideraciones particulares del hormigón de altas resistencias

Una vez analizados los materiales que constituyen el hormigón de altas resistencias y reflexionado en como se relacionan, tenemos una visión general de los inicios del cambio de hormigón tradicional a los hormigones desarrollados en las últimas décadas. Como complemento podemos sintetizar que a los materiales conocidos en la ejecución de hormigón como son el cemento, el agua, la arena y los áridos se han incorporado los aditivos superfluidificantes y las adiciones minerales. También éstos forman parte de los materiales constituyentes en el

hormigón actual y han sido fundamentales en su evolución. No podemos repasar el hormigón contemporáneo sin referirnos a ellos.

Atendiendo a esta presentación asumimos las bases fundamentales para la obtención de hormigones de alta resistencia:

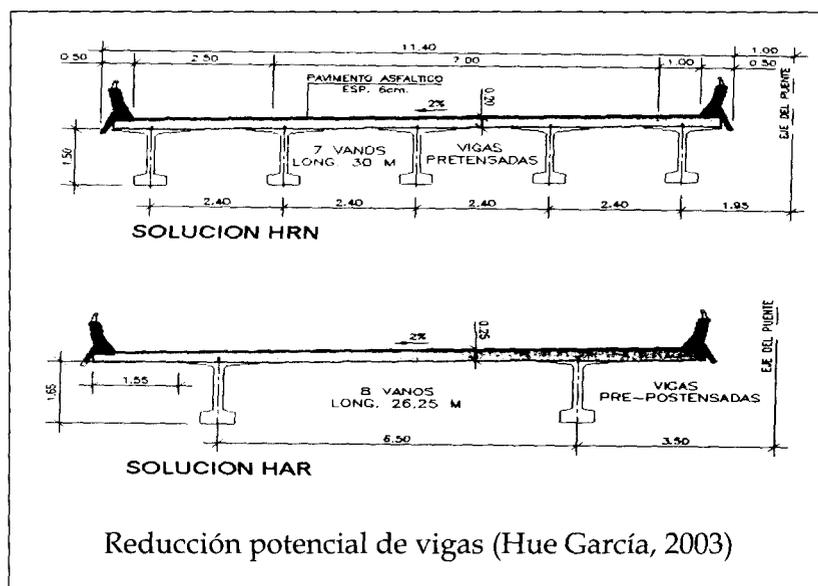
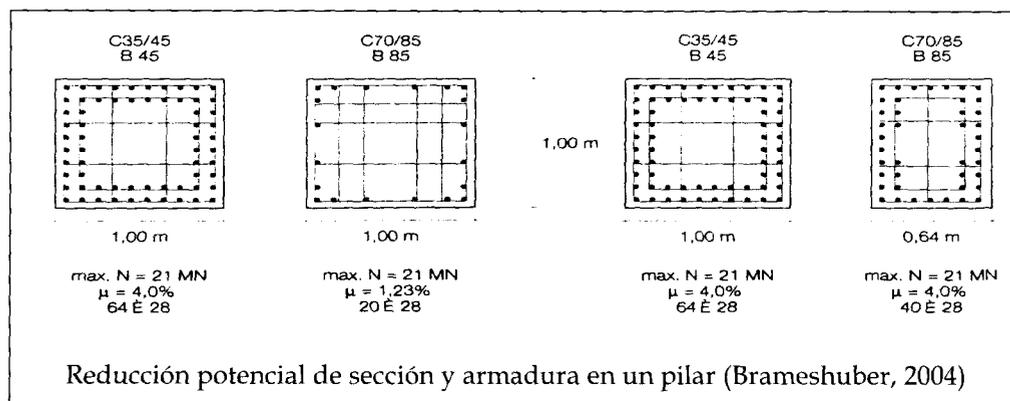
- Adopción de una baja relación agua/cemento.
- Uso obligado de superfluidificantes.
- Utilización de cementos de resistencia suficiente.
- En resistencias muy elevadas, incorporación de productos de adición, generalmente microsílíce.

Estas consideraciones son esenciales para el siguiente paso que comprende los hormigones de altas prestaciones. Como escribíamos al inicio de este apartado, consideramos el hormigón de altas resistencias como primer paso del hormigón de altas prestaciones.

En muchas ocasiones durante el trabajo de investigación hemos ahondado en temas relacionados con el hormigón de altas resistencias, ya que nos confiere reflexiones trascendentes y vinculantes a los hormigones de altas prestaciones. Hemos decidido concentrarnos al exponer nuestra investigación para no desvirtuar el contenido primordial del texto. Sin embargo, nos gustaría citar nuevamente a Germán González-Isabel (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993) en su exposición acerca de las principales realizaciones con HAR y a Fernando Hue García (HUE GARCÍA, 2003) que realiza una concreta exposición de las aplicaciones en España del HAR en la prefabricación. Conocer y entender el uso definitivo de los materiales nos sitúa en la vía correcta de la investigación; *investigar con el fin de aplicar*.

2.3.3 El hormigón de altas prestaciones - HAP -

Como sabemos, el uso del hormigón de altas resistencias lleva implicaciones de mejora que van más allá de la simple resistencia mecánica del material. Indudablemente, aprovechando la capacidad portante se permite el ahorro de espacio ocupado por estructura portante y consecuentemente, aumenta la superficie útil. Wolfgang Brameshuber muestra la reducción potencial de la sección al utilizar un hormigón de alta resistencia. Incluso reduciendo la cantidad de armadura, con el objetivo de facilitar la ejecución del trabajo, se puede reducir la sección transversal un 30%, respecto al hormigón convencional (BRAMESHUBER, 2004: p. 72). También Fernando Hue García nos muestra gráficamente unas prestaciones en un HAR (HUE GARCÍA, 2003: p. 48).



Además, la disminución de porosidad que lleva implícita el HAR, conlleva también un aumento de la impermeabilidad ante agentes externos perjudiciales. Esta circunstancia implica poder producir elementos constructivos especialmente resistentes a las condiciones climáticas, es decir, elementos que sean duraderos y por otra parte, que protejan el medio ambiente contra sustancias líquidas peligrosas.

Cuando estas últimas intenciones se han antepuesto a la necesidad de altas resistencias mecánicas, o al menos considerado de la misma manera, se ha obtenido el hormigón de altas prestaciones -HAP-.

2.3.3.1 Posibles definiciones del hormigón de altas prestaciones

Hemos comentado anteriormente que, incluso para el que nosotros hemos definido de altas resistencias, Callander, Clark y Lees estimaban apropiado el término 'hormigón de altas prestaciones' debido a las otras características inherentes (CALLANDER; CLARK y LEES, 1992). De igual consideración que estos últimos eran Aguado y Olivier (1992). Nosotros sostenemos que es adecuado denominarlo 'hormigón de altas resistencias' teniendo en consideración los aspectos históricos entre los años sesenta y ochenta del pasado siglo, así como que la característica fundamental impulsada era la capacidad mecánica.

El hormigón de altas prestaciones -HAP- ha florecido como tal a partir del inicio de la década de los noventa. Se comienza a definir de esta manera al hormigón que ha logrado otras propiedades como la trabajabilidad, la resistencia ante agentes agresivos, la durabilidad o el mejor acabado superficial. Una vez conseguido en el desarrollo del hormigón unas excelentes resistencias, también son solicitadas otras prestaciones.

En una búsqueda de definiciones del HAP y presumiendo que Internet es la vía principal de búsqueda de información en la actualidad, si entramos en sus páginas

encontramos millares de concepciones del hormigón de altas prestaciones. Por ejemplo, *Google* localiza aproximadamente 35.000 resultados en español en 0,04 segundos Internet. Razonablemente no todas tienen porqué ser nociones correctas, pero sí que nos expresa la multitud de sentidos acerca de este calificativo para el hormigón (www.google.es).

Nuestro equipo ha establecido dos opiniones generales entre los que distinguen al hormigón de altas prestaciones como globalizador con muchos subgrupos y los que consideran al hormigón de altas resistencias como precedente al desarrollo del hormigón de altas prestaciones.

En la primera tesitura podemos encontrar a Wolfgang Brameshuber. Este autor engloba dentro de los hormigones de alto rendimiento (en nuestra terminología hormigones de altas prestaciones) a los hormigones de alta resistencia, a los hormigones armados con fibras o tejidos y al hormigón autocompactable como “algunos de los hormigones especiales que existen hoy en el mercado” (BRAMESHUBER, 2004: p. 72). En este mismo sentir y más completa es la relación que establece Palacios Navarrete y Navarrete de Cárcer acerca de los que ellos denominan hormigones especiales. Cabe destacar también la cualidad que estos autores manifiestan al definirlos como producto industrial, opinión que es compartida por nosotros. El listado nos sirve para presentar una relación de los hormigones actuales en el mercado español. También es adecuado manifestar el necesario avance en su normalización y en la generalización de su demanda, con la seguridad de que están siendo productos interesantes para el sector de la construcción (PALACIOS, NAVARRETE; 2003). Los hormigones que presentamos desde la lectura de estos autores son:

- HAR: Son hormigones de altas resistencias mecánicas; mayor de 50 MPa (según EHE). Es recomendable la fabricación en planta de elaborados o mediante planta preparada en obra.

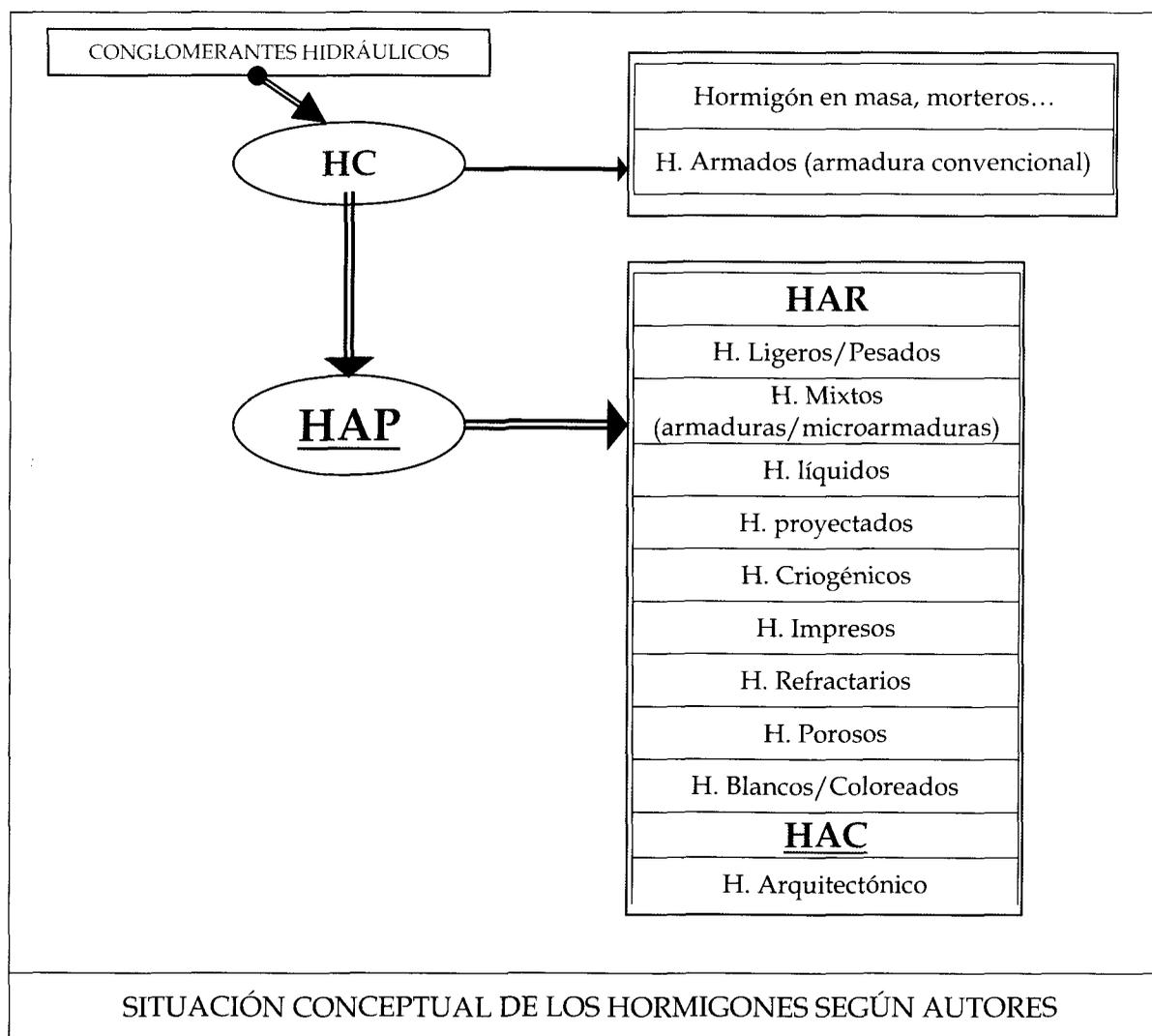
- Hormigones ligeros: Son hormigones de baja densidad; menor de 2.000 Kg/m³. Se suele utilizar en restauración de forjados o relleno de huecos en estructura. Las torres KIO en Madrid es un ejemplo de este tipo de hormigón.
- Hormigones pesados: Tienen alta densidad; mayor de 2.800 Kg/m³. Utilización muy específica en confinamientos de salas de cobalto en los hospitales. Se utiliza árido pesado como barita o plomo, además de alto contenido en cemento y adición.
- Hormigones con fibras: Son hormigones de baja retracción y alta tenacidad. Se utilizan principalmente adiciones de fibras de polipropileno, fibras de vidrio o fibras de acero. El objeto de esta añadidura es principalmente mejorar la resistencia del hormigón ante la fisuración por retracción plástica, como mejora de impermeabilidad y acabado de superficies. Además infieren al hormigón un comportamiento estructural más eficaz.
- Hormigones líquidos para pilotajes: Son hormigones para cimentaciones especiales, con un asiento en cono de Abrams mayor de 18 cms. Su peculiaridad estriba en la obtención de hormigones con escurrimientos altos pero con una matriz bien cohesionada que impida la rotura de su masa durante la puesta en obra, un empuje cohesivo contra el relleno de bentonita y una adaptación del hormigón al terreno que evite oquedades.
- Hormigones autocompactables: Son hormigones de fácil colocación y excelentes acabados. Deben poseer una alta cohesividad para asegurar la matriz compacta, baja relación agua/cemento y seguro conocimiento de su comportamiento una vez fabricado. Son hormigones con gran futuro en el ámbito de la construcción.

- Hormigones proyectados o gunitas: Son hormigones colocados por proyección en vía húmeda y/o seca. Éstos se aplican especialmente en muros, taludes y túneles. Adquieren gran eficacia aquellos con aportación de fibras, adiciones y aditivos acelerantes que mejoran sustancialmente el comportamiento y la puesta en obra, evitando o disminuyendo el rebote y descuelge.
- Hormigones criogénicos: Son hormigones para uso en instalaciones de gases licuados. Su uso es muy excepcional, con exigentes controles de calidad en materiales componentes y en resultado de hormigón.
- Hormigones impresos: Se trata de hormigones utilizados en soleras decorativas. Basados en hormigón estándar y dominio del tiempo de fraguado.
- Hormigones refractarios: Resistentes al fuego, requieren la utilización de cementos muy concretos y áridos de buen comportamiento ante altas temperaturas.
- Hormigones porosos: Son hormigones que permiten drenar agua a su través. Se pueden utilizar en pistas polideportivas, parkings y pavimentos de rodadura. Se trata de hormigones con bajos contenidos en árido fino. Requiere una importante energía de amasado, un estricto control de la adición de agua y una puesta en obra cuidada.
- Hormigones blancos y de color: Son hormigones para uso estético. Su complejidad radica en la utilización de cementos blancos y/o pigmentos, además de la posibilidad de emplear áridos de tonos claros. Se debe prestar atención en la dosificación a los módulos de forma y absorción de agua de los cementos y pigmentos incorporados en cada caso. Es esencial disponer de zonas de fabricación exclusivas para este tipo de hormigón y mantener

limpias con esmero, puesto que su principal problema estriba en los cambios de coloración no controlados.

Nosotros queremos también incluir en este listado:

- Hormigones con textiles: Son hormigones vinculados a los hormigones con fibras, pero con la particularidad de que las fibras están configuradas en textiles. Básicamente, su función es inferir al hormigón resistencia a la fisuración por retracción, mejorar la impermeabilidad y mejorar el comportamiento estructural en general.



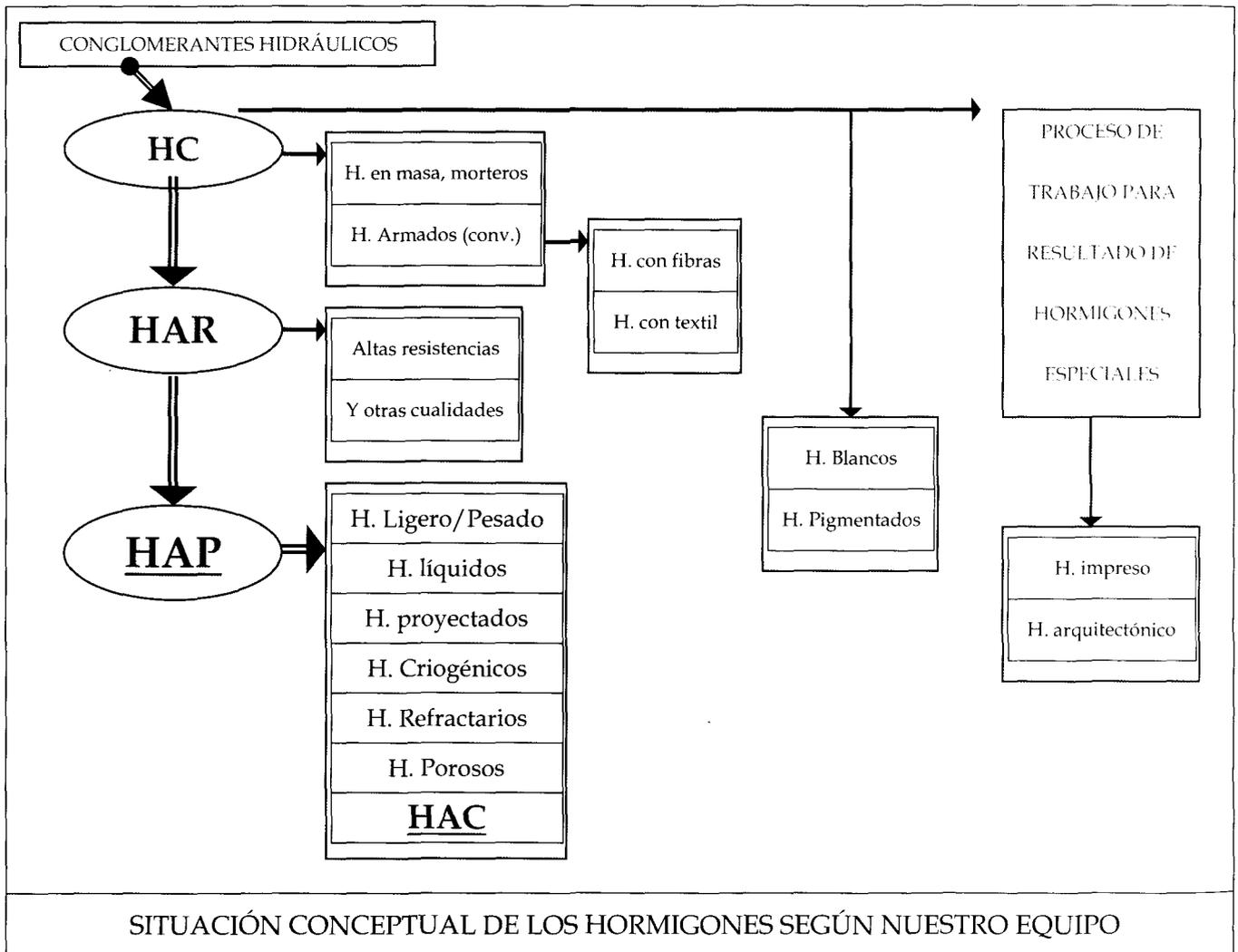
Por otra parte, entre los que piensan que el hormigón de alta resistencia es precursor del hormigón de altas prestaciones se encuentran Germán González-Isabel (1993), Fernando Hue García (2003), el equipo de Calavera, Alaejos, González, Fernández y Rodríguez (2004), además de nosotros mismos.

Hue García es el más rotundo de estos casos al pretender definir cualquiera de éstos como HAR. Él define el hormigón de alta resistencia como una mejora del hormigón convencional mediante una dosificación y realización más cuidada. Iguala el hormigón de altas prestaciones con el de altas resistencias, simplemente considera que es un cambio de denominación. Incluso los hormigones con fibras entrarían en la denominación de HAR, según el autor (HUE GARCÍA, 2003). Entendemos de esta lectura que el autor sitúa al hormigón de altas resistencias como precursor de los otros hormigones y estamos de acuerdo con este juicio, pero por otra parte, no compartimos la razón de definir todo como su ascendiente. El hormigón autocompactante lo puntualiza como un nuevo tipo de hormigón que conduce a la obtención de un HAR.

Nuestro equipo de investigación entiende que el H.A.R. es predecesor del hormigón de altas prestaciones. Dentro de los H.A.P. se encuentran los hormigones que ofrecen unas cualidades que facilitan las tareas de la ejecución, que tienen una impermeabilidad y durabilidad muy considerable, unas altas resistencias a corto y a largo plazo, además de un superior acabado. Dentro de estas cualidades existe una que ha destacado en los últimos años por encima de las demás. Nos referimos a la autocompacidad, es decir, a la cualidad de compactarse por sí mismo con el propio peso. Defendemos esta idea que es más consecuente con la evolución en el tiempo, a la vez que con los propósitos predefinidos en el desarrollo del material.

Además de este grupo también existen otros hormigones especiales que han experimentado auge en las últimas décadas. Es indudable que éstos también ofrecen prestaciones. Nos referimos a los hormigones con fibras o textiles, a los

hormigones con densidad prefijada, hormigones drenantes, hormigones coloreados o blancos. Nosotros entendemos que éstos han evolucionado por camino paralelo al de los hormigones de altas prestaciones y autocompactante, además de diferentes entre sí. Caso diferente es también el hormigón estampado, el hormigón arquitectónico y otros que afectan preferentemente a los moldes o maneras de ejecutar, pero no al componente hormigón y sus constituyentes. Nuestra reflexión es revalidada al comprobar que es posible interrelacionar las propiedades de un grupo con las de otro de manera paralela y no lineal, como lo ilustramos en el siguiente gráfico.



Como comprobamos es posible aplicar, por ejemplo, hormigón coloreado tanto al hormigón tradicional, como al de alta resistencia o al autocompactante. También será viable la utilización de un hormigón con fibras para el proyectado como para el autocompacto. También, en cualquier caso se puede hacer un buen hormigón arquitectónico, esto es, con cualidades estéticas. Sin embargo, no es razonable ofrecer autocompacidad a un hormigón tradicional; o es ejecutado con métodos tradicionales o con superfluidificantes que consiguen fluidez. Tampoco es lógico conjugar hormigón con fibras de vidrio, metálicas y textiles; generalmente se elige una armadura u otra puesto que cumplen equivalentes funciones.

En consecuencia, podemos definir a los hormigones de altas prestaciones como la mezcla con pasta de cemento, áridos -incluidas las arenas-, aditivos y adiciones minerales -según el caso- que confieren una serie de prestaciones distintivas del hormigón convencional y que resultan en cualidades tanto para la elaboración como para el resultado final del producto.

Esta definición independiza al grupo de los hormigones mixtos, por ejemplo los hormigones armados, con fibras o textiles, hormigones con reciclados o con plomo. Estos componentes favorecen al hormigón a través de un material añadido, el cual tiene una elaboración completamente independiente de la fabricación del propio hormigón. En este grupo estaría también el hormigón armado donde la armadura convencional es completamente autónoma para el desarrollo del hormigón como material en sí mismo -aunque lógicamente no dudamos de la complicidad inherente entre estos componentes-.

También desvinculamos de los hormigones de altas prestaciones a los hormigones que basan su principal cualidad en el proceso de trabajo y no en la mezcla como material, como los hormigones impresos o proyectados. El proceso de trabajo siempre ha resultado esencial para la terminación de un hormigón, incluso dando formas, aspectos y facilidad de ejecución, pero no consideramos que deba

estar establecido en el mismo conjunto que los hormigones de altas prestaciones que basan su fundamento en la composición de materiales constituyentes.

Por otra parte, creemos que el tipo de cemento no debe estar incluido como un material distinto. Uno de los componentes siempre ha sido el cemento (puzolánico o blanco) y cada uno le confiere unas características determinadas. El cemento blanco nos puede beneficiar tanto con los hormigones convencionales como con los autocompactables. Los pigmentos se consideran adiciones dentro de las normativas que confieren también una cualidad: el color. Tampoco consideramos que deban estar alineados con los hormigones de altas prestaciones por las mismas citadas consideraciones.

Entendemos acertado considerar al hormigón de altas prestaciones como la consecución del hormigón que previamente había conseguido altas resistencias y ahora logra otras prestaciones antepuestas, sin quitarle valor a las resistencias mecánicas. Además, creemos que dentro de los HAP el hormigón autocompactante es el mayor exponente del desarrollo revolucionario del material en los últimos años.

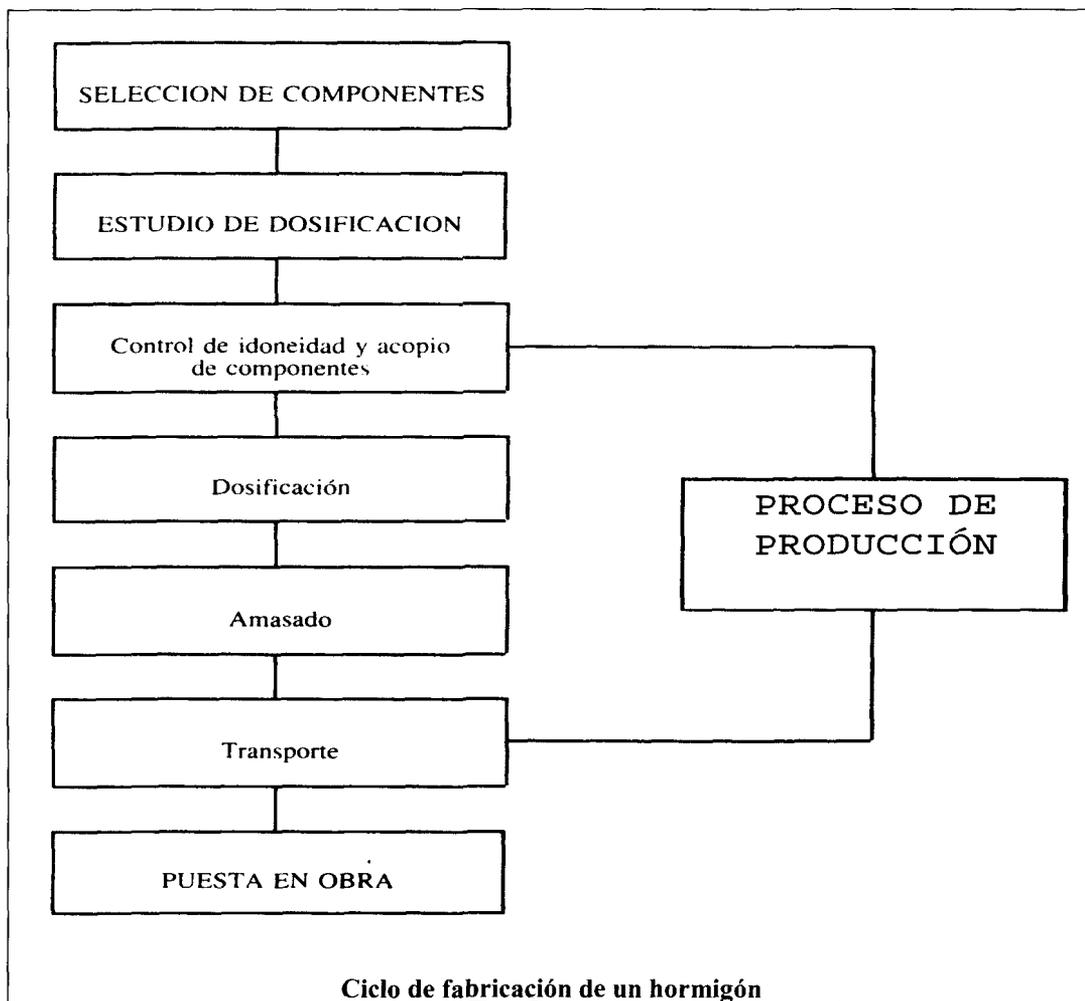
2.3.3.2 Pautas en la ejecución del hormigón de altas prestaciones

De igual forma que los HAR, los materiales constituyentes del HAP continúan siendo el cemento, el agua, los áridos, la arena, los aditivos y las adiciones. La manera de relacionarse estos materiales, atendiendo también a su microestructura, es equiparable básicamente a la de los hormigones de alta resistencia, aunque con las particularidades específicas de cada tipo de prestación que singularice. Para los HAP, compartimos las mismas consideraciones esenciales que apunta González-Isabel con los HAR. Este autor nos muestra las pautas básicas que debemos seguir en la fabricación y puesta en obra de este hormigón (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993).

La fabricación industrial de un hormigón de altas prestaciones debe pasar previamente por la verificación en laboratorio de la idoneidad de la dosificación establecida. Independiente a esta verificación previa, es evidente que resulta ineludible la obligatoriedad del cumplimiento de las condiciones de fabricación más exigentes de entre las contempladas en la actualidad. En este sentido debemos atender básicamente a:

- Un control estricto de la calidad de los componentes.
- Una atención especial a la invariabilidad de la relación agua/cemento.
- Una dosificación exacta de todos los materiales constituyentes.
- Una determinación periódica de la granulometría y humedad de los áridos.
- Una atención constante al posible desajuste de elementos de medida.
- Un laboratorio a pie de planta.

González-Isabel expresa en el siguiente gráfico el ciclo de fabricación que un hormigón debe cumplir, tanto los HAR como los HAP (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993: p. 114).



Para cumplir con estos requisitos planteados es necesario un control de calidad eficiente a lo largo de todo el proceso de producción. El nivel de calidad exigible a los diferentes constituyentes del hormigón de altas prestaciones y a los procesos de dosificación, amasado, transporte, puesta en obra y curado de dichos hormigones debe extenderse a los aspectos relacionados con los procedimientos y métodos de control de sus características (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993). Calavera establece que “El Laboratorio de Ensayos es evidentemente una herramienta, que resultará poco útil si no va integrada dentro de una actividad completa de control de calidad” (CALAVERA, 1991).

En el caso de los hormigones de alta resistencia -entiéndase también hormigones de altas prestaciones- “es necesario un control de producción muy cuidadoso, debido a la necesidad de garantizar un producto homogéneo y en el cual no podemos bajar el nivel de control a base de subir la calidad del producto” (FERNÁNDEZ GÓMEZ, 2003: p. 68). Esta reflexión indica la precisión en la dosificación de todos los materiales. Con un hormigón tradicional era posible sobredosificar el cemento de manera que daba un margen de seguridad en la composición de todos los materiales. Sin embargo, con un HAR o un HAP la exactitud en la composición de los materiales constituyentes es esencial debido al fuerte poder de influencia sobre la mezcla de algunos de ellos. Una mínima variación del aditivo superfluidificante o de la adición de microsílíce conllevará una modificación significativa de las cualidades del hormigón resultante. También el cemento, el agua y los áridos influirán notablemente en el comportamiento del hormigón. El texto de Fernández nos muestra con exactitud las exigencias que se deben vigilar en un correcto control de producción (FERNÁNDEZ GÓMEZ, 2003).

2.3.3.3 Puntualizaciones técnicas del hormigón de altas prestaciones

A continuación se exponen los pasos necesarios para la confección y puesta en obra de un hormigón de altas prestaciones, empleando para ello las indicaciones que expone la instrucción normativa en el caso de los hormigones de alta resistencia -*Anejo 11 de la Instrucción del Hormigón EHE*. Debe ser aplicable en la confección de HAP empleado en todas aquellas ocasiones en las que se requieran elevadas resistencias finales -superiores a 50 N/mm² a 28 días en probeta cilíndrica de 15x30 cm, según Anejo 11 de la EHE (EHE, 1998).

Inicialmente, es preciso disponer de los siguientes datos de partida:

- Clasificación del ambiente en que se encuentra la estructura afectada dentro de los grupos señalados en la EHE, en el artículo 8.2.3.

- Se tomará la consistencia medida según el ensayo UNE 83313:1990.
- Tamaño máximo del árido definido en el Artículo 28.2 de la Instrucción EHE.

No existen métodos específicos para el diseño de hormigones de altas prestaciones. Los métodos convencionales de dosificación de hormigón tradicional -Fuller, Bolomey...- no ofrecen resultados satisfactorios porque en este caso se trabaja con curvas totalmente discontinuas, empleando elevadas cantidades de cemento (o cemento más adición) y relaciones agua/cemento bajas. Para ello, resulta imprescindible realizar ensayos previos con los materiales originales de la obra para ajustar las dosificaciones. Algunas consideraciones que deben atenderse son:

- El cemento debe proporcionar elevada resistencia mecánica con la finalidad de conseguir una pasta de elevadas prestaciones. Generalmente se emplean cemento I-52,5R y I-42,5R, aunque son perfectamente utilizables los cementos SR y de bajo calor de hidratación así como los cementos tipo II (www.bettor-mbt.es). De cualquier manera, el cemento debe presentar una baja demanda de agua y su contenido en C₃A debe ser mínimo (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993).
- En la dosificación de los hormigones pueden incorporarse adiciones. La microsílíce, debido a su elevado poder puzolánico, es la adición más adecuada para la fabricación de hormigones de elevadas prestaciones, ya que mejora de forma importante propiedades como la impermeabilidad, compacidad, resistencia a la segregación y resistencia mecánica. La microsílíce debe contener un elevado porcentaje de SiO₂ amorfo (www.bettor-mbt.es) y su cantidad dosificada no excederá el 15% (EHE, 1998: anejo 11).

- Teniendo en cuenta que la cantidad de agua añadida a la mezcla es uno de los factores que determinan directamente las resistencias tanto iniciales como finales, así como otras muchas prestaciones del hormigón, la relación agua/cemento deberá mantenerse lo mas baja posible.
- El empleo de superplastificantes es imprescindible para obtener trabajabilidades aceptables con las relaciones agua/cemento mencionadas. Los aditivos basados en melaminas y derivados de naftalenos son adecuados, aunque los mejores resultados se obtienen con los aditivos basados en éter de policarboxílico (www.bettor-mbt.es).
- En general se deben utilizar arenas naturales lavadas, con bajo contenido en finos, aunque las arenas de machaqueo también pueden ser utilizadas. Arenas de mala calidad pueden incrementar la demanda de agua y reducir así las prestaciones del hormigón a corto y largo plazo. Se recomienda un módulo de finura próximo a 3 (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993). Las arenas empleadas deberán cumplir con las exigencias descritas en EHE-98, en su artículo 28.
- La resistencia de los áridos no debe ser inferior a la que caracterizará la pasta o, por defecto, a la especificada para el hormigón en cuestión. El tamaño máximo del árido debe limitarse a 20 mm por razones de adherencia con la pasta y para minimizar la rotura de éstos. La humedad y absorción de los áridos debe estar perfectamente controlada para considerar con exactitud el agua de adición (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993).

El tiempo de amasado es superior al del hormigón convencional (se recomienda incrementarlo un 50%). Se escogerá el método adecuado de transporte en función de las necesidades concretas de la obra, protegiendo el hormigón de las inclemencias del tiempo y de las vibraciones para evitar alteraciones en la

homogeneidad. En este aspecto, Berger-Böcker nos expone experiencia concreta acerca del futuro de la tecnología del hormigón (Berger-Böcker, 2002).

Un buen proceso de colocación del hormigón debe evitar que se produzca una pérdida de homogeneidad y conseguir que la masa llene perfectamente todas las esquinas y rincones del encofrado y recubra bien las armaduras en toda su superficie. Antes del vertido se debe comprobar si el sistema de encofrados resiste las presiones que origina la velocidad de hormigonado. Además es necesario prever las juntas de hormigonado dejando esperas embebidas si fuese necesario. Se debe evitar la caída libre del hormigón desde una altura superior a los dos metros, a fin de impedir que se rompa la homogeneidad de la mezcla. La correcta puesta en obra seguirá las prescripciones del artículo 70 de la EHE-98 y del Anejo 11 de la EHE-98.

El método de compactación a seguir será función de la consistencia. A la vez, se adaptará en lo posible a las condiciones particulares de cada caso (Artículo 70.2 de la EHE y el Anejo 11 de la EHE) (www.bettor-mbt.es).

Consistencia	Tipo de compactación
Seca	Vibrado energético
Plástica	Vibrado normal
Blanda	Vibrado normal o picado con barra
Fluida	Picado con barra o vibrado ligero
Autocompactable	No necesita compactación

Los hormigones de altas prestaciones generan un elevado calor de hidratación. Esto sumado a la reducida cantidad de agua, lo hace susceptible a fenómenos de desecación. Para ello el curado resultará imprescindible, ya que la calidad final de un hormigón de alta resistencia va estrechamente ligada con la eficiencia del curado. Un curado insuficiente o ineficaz produce retracción y fisuración, lo que reduce de forma considerable la resistencia y la durabilidad. Este proceso deberá realizarse manteniendo húmedas las superficies de los elementos hormigonados desde el primer momento de su colocación y prolongarlo aproximadamente unos 7 días, dependiendo de las características del ambiente y del tipo, clase y cantidad de cemento. El curado mediante agua debe seguir las exigencias del Artículo 27 de la EHE referente a la calidad del agua empleada. Los procedimientos de curado se describen en el Artículo 74 de la EHE.

Los diferentes moldes o encofrados se retirarán sin producir sacudidas ni choques en la estructura cuando el hormigón haya alcanzado la resistencia necesaria para soportar con seguridad y sin deformaciones los esfuerzos a los que se verá sometido. Para facilitar la tarea de desencofrado se puede utilizar productos antiadherentes que serán aplicados al molde antes de verter el hormigón. El Artículo 75 de la EHE y el Anejo 11 de la EHE describen las operaciones de desmoldeo.

Para el control de la correcta ejecución de los trabajos podrán tomarse muestras del hormigón -según norma UNE 83300-1984- para la realización de los siguientes ensayos:

- Consistencia según UNE 83313-1990.
- Resistencia a compresión según UNE 83304-1984.
- Impermeabilidad según UNE 83309-1990EX.
- Contenido en aire residual según UNE 83315-1996.
- Resistencia a flexotracción según UNE 83305-1986.

2.3.3.4 Consideraciones particulares del hormigón de altas prestaciones

En este apartado hemos expuesto lo que supone el hormigón de altas prestaciones para nuestro equipo de investigación. También hemos analizado sus materiales constituyentes, además de valorar la importancia del proceso de elaboración y de su control de producción. Como complemento podemos nuevamente extractar que consideramos al hormigón de altas prestaciones como un siguiente paso en la evolución del hormigón de altas resistencias. La mayor parte del estado del saber acerca del HAR nos vale para exponer nuestra reflexión sobre los HAP. En las ocasiones en que se requiere preferentemente otros servicios del hormigón antes que la resistencia mecánica, o cuando además de las resistencias se les demanda otros, nuestro equipo lo considera hormigón de altas prestaciones.

Atendiendo a estas manifestaciones aplicamos las bases vitales para la obtención de hormigones de altas prestaciones:

- Adopción de la mínima relación agua/cemento.
- Uso obligado de superfluidificantes, preferentemente policarboxílicos.
- Uso opcional de otros aditivos para mejorar determinadas características.
- Para resistencias muy elevadas, incorporación de productos de adición, generalmente microsílíce.

- Arenas y áridos de buena calidad, homogéneos y con la menor absorción de agua posible.
- Tamaño máximo de árido generalmente menor de 20 mm.
- Necesarios conocimientos previos mediante ensayos en la elección de los materiales y en el diseño de la dosificación.
- Equilibrada y exacta mezcla de todos los materiales constituyentes.
- Estricto control de recepción de materiales -atendiendo especialmente a la humedad- y de la producción.

Estas observaciones son básicas para la ejecución de todos los hormigones que se consideren de altas prestaciones. Ahora bien, existe un tipo de hormigón dentro de los HAP que ha destacado por encima de los demás en estos últimos años y que ofrece una característica esencial que deriva en muchas otras. Nos referimos al hormigón autocompactante. Este hormigón es parte y continuidad de los hormigones de altas prestaciones.

Como escribíamos al inicio de este apartado, consideramos el hormigón de altas resistencias como paso previo en el tiempo del hormigón de altas prestaciones. Ahora añadimos que el hormigón autocompactante es continuación del desarrollo de los HAP. Este hormigón cuya característica determinante es la autocompacidad será el que trataremos en el siguiente apartado. Esta próxima sección comprende la parte teórica más cercana a nuestra experimentación.

2.3.4 El Hormigón Autocompactante - HAC -

A lo largo de este gran apartado, dedicado al estado del arte y referido al tema de paneles prefabricados de hormigón, hemos ido desarrollando al elemento y al material constituyente en su desarrollo. El desenlace de la evolución histórica del hormigón culmina en la actualidad con este fluido, con esta “piedra líquida” (ISASI, 2005). El hormigón autocompactante ha sido el fin último que perseguimos con esta investigación. Por tanto, es este próximo subcapítulo el que concentra la más densa literatura que nos ha guiado en nuestro trabajo a lo largo de estos años.

No nos cabe duda de que el hormigón se encuentra en la actualidad en un buen momento. No solamente por el avance experimentado como material, sino que este desarrollo ha llevado a la realización de múltiples congresos dedicados, a cuantiosas publicaciones y a una renovada imagen del hormigón en construcciones recientes. Este trabajo intenta reflejar lo más significativo en investigación acerca del hormigón autocompactante.

2.3.4.1 Acercamiento general al hormigón autocompactante

El uso de hormigón autocompactante -HAC-, también llamado autocompactable y autocompacto, ha crecido con rapidez. Inicialmente, centros de estudio del hormigón en varios países, principalmente Japón, Suecia, EEUU y Alemania investigaron intensamente su aplicación y las posibilidades en su implementación. Posteriormente se ha continuado analizando las primeras experiencias incluyendo sus resultados y posibilidades de mejora (OKAMURA y OUCHI, 1999).

En la actualidad, se trata de una tecnología que aún se encuentra en evolución y los nuevos avances quizá recomienden una modificación o ampliación de los requisitos y exigencias del HAC. En definitiva, se continúa explorando sus especificidades para una incorporación adecuada al mercado de la industria del

hormigón así como para dar una reglamentación que especifique sus características. En el apartado anterior (véase 2.3.4.1) ya reflejábamos la visión de Palacios y Navarrete cuando destacaban la necesidad de normalizar y generalizar su demanda (PALACIOS y NAVARRETE, 2003: p. 39).

El HAC se ha descrito como “el desarrollo más revolucionario de las últimas décadas en el campo de la construcción con hormigón” (www.efnarc.org, 2002: p. 1).

Las primeras investigaciones del hormigón autocompactante se realizan en Japón a final de la década de los ochenta. Se pretendía encontrar hormigones que no dependieran de la habilidad de la mano de obra para el vertido y la vibración, principalmente en los elementos con gran cantidad de armado. De esta manera se aseguraba la durabilidad y la fiabilidad en las estructuras de hormigón armado (OKAMURA, 1997). Posteriormente, también en Japón gracias a éste y otros autores se continúa esta iniciativa de conseguir hormigones capaces de ser colocados sin vibración o compactación. Poco a poco se van considerando las ventajas de este nuevo material (OKAMURA; OZAWA y OUCHI, 2000). El éxito fue posible gracias a los aditivos superfluidificantes para hormigón.

Ravindra Gettu y Luis Agulló desarrollan un “estado del arte del hormigón autocompactable” muy completo y reciente que nos acerca al conocimiento general de este material (GETTU y AGULLÓ, 2004).

Continuando con la referencia histórica sabemos que más tarde, en Europa, inicialmente en Suecia y Alemania se adoptó el HAC con entusiasmo tanto en el sector del hormigón prefabricado, como del hormigón preparado; lo mismo en la construcción que en la obra civil. Prueba de esto es el primer simposio internacional de RILEM sobre el hormigón autocompactante. Este congreso es de las más importantes referencias actuales acerca del tema (SKARENDAHL y PETERSSON, 1999). Además la revista técnica especializada de Alemania *CPI* - (en

español) *PHI - Planta de Hormigón Internacional*- ha dedicado numerosos artículos a lo largo de los últimos años que resaltan el desarrollo del hormigón autocompacto en este país, sin olvidar que ha sido impulsora de congresos internacionales sobre el tema, especialmente el *BWI-Kongress 2002 -II Congreso Internacional PHI 2002*, Bonn, Alemania-.

Aparte de esta lectura atenta como aprendizaje, la federación europea dedicada a sistemas específicos de hormigón y productos químicos especializados para la construcción nos indica que las aplicaciones prácticas tienen siempre que venir acompañadas de una importante investigación de las características físicas y mecánicas del HAC ([www. Efnarc.org](http://www.Efnarc.org) "Especificaciones y directrices para el hormigón autocompactable -HAC" Febrero de 2002; pag. 1). Se ha de controlar el hormigón en estado fresco y en estado endurecido. Esto debe de ser así debido a que se trata de un material muy específico y su comportamiento no es fácil de predecir. Nuestra parte fundamental en este trabajo ha sido experimental dedicando gran parte del tiempo dedicado a los ensayos de caracterización.

2.3.4.2 Antecedentes específicos al hormigón autocompactante

Según hemos reflejado en el apartado anterior (véase epígrafe 2.3.2), sabemos que el empleo del hormigón en la construcción es muy antiguo, por ejemplo en las ciudades de Troya y Mecnas encontramos hormigones de piedras aglomeradas con arcilla y los romanos a su vez lo utilizaron más habitualmente en termas, acueductos, etc.

Desde la aparición del cemento Pórtland, en la primera mitad del siglo XIX, el hormigón no ha sufrido una transformación esencial en su composición, pero sin embargo, su utilización ha ocupado un lugar dominante en la construcción y sus propiedades para aumentar la resistencia con el tiempo y adaptarse a las formas que convengan al proyectista, han hecho de él en un breve plazo, ya en el siglo XX,

uno de los elementos de mayor utilidad en el campo de la construcción. Como sabemos, este éxito se ha debido fundamentalmente a su asociación con el acero para constituir el hormigón armado y, posteriormente, con aceros especiales - hormigón pretensado -.

Los últimos avances que se han producido en la industria del hormigón (elaborado y prefabricado) desde el punto de vista de diseño, resistencia, durabilidad, colocación, etc. han estado íntimamente ligados a investigaciones de nuevas familias de aditivos que han sido desarrollados por la industria de la química aplicada a la construcción. El autor Domínguez García-Cuevas (2003) nos desgana la evolución histórica de los aditivos a lo largo del siglo XX hasta la consecución de estos químicos que llevan a conseguir total fluidez en el hormigón. Más adelante analizaremos en profundidad estos aditivos fluidificantes por lo fundamental que resultan en la consecución de esta investigación.

Como resultado de lo que han ido consiguiendo los fluidificantes a lo largo del tiempo podemos señalar que se han utilizado hormigones con resistencias cada vez más elevadas, valorando fundamentalmente la relación agua/cemento y poniendo menos trabas a la consistencia. Las diferentes formas conseguidas por el hormigón incluyen:

- Hormigón seco: Se ha fabricado en los momentos en los cuales el aditivo no se utiliza con asiduidad. Con este tipo de hormigón se pretende conseguir una relación agua/cemento razonable para no perjudicar demasiado las resistencias mecánicas. El principal problema radica en la correcta colocación en obra.

- Hormigón plástico: Se ha preparado más habitualmente a partir de la aparición de los primeros aditivos plastificantes en polvo; este tipo de aditivos añadidos al hormigón en dosificaciones aproximadas del 0.3% respecto de la masa del cemento permiten reducciones de agua del 8% al 10%. Se consigue mejor

docilidad en su puesta en obra y una menor relación agua/cemento, consecuentemente mayor resistencia.

- **Hormigón blando:** Se comienza a fabricar con la aparición de los plastificantes de segunda generación, con más poder de reducción de agua. Éstos permiten mayores dosificaciones, entre el 0.6 y el 0.8% respecto de la masa del cemento -o incluso mayores-, lo que supone reducciones de agua del 15% o superiores. La consecuencia es mejor trabajabilidad y mayor resistencia.

- **Hormigón fluido:** En el pasado, este tipo de hormigón en la mayoría de los casos era rechazado por los controles de obra debido a que un exceso de agua podría dar lugar a una disminución de las resistencias. La aparición de los superfluidificantes disminuyó el problema de los hormigones fluidos y en muchos casos de los hormigones líquidos. Este tipo de aditivos permite dosificaciones del 1% al 1,5% respecto de la masa del cemento, que conduce a reducciones de agua superiores al 20%. Con la aparición de estos aditivos se elimina la idea de que este tipo de hormigones no se debe utilizar. En la actualidad se usa con frecuencia donde se requiere este tipo de consistencia por la presencia de gran cantidad de armaduras.

- **Hormigón Autocompactante:** Este hormigón se comienza a preparar con la aparición de los nuevos polímeros como superfluidificantes de tercera generación, que se pueden considerar como aditivos hiperfluidificantes. Estos aditivos con dosificaciones del 1 al 3% respecto de la masa del cemento o a veces más según las necesidades, permiten reducciones de agua superiores al 30%. Como hemos señalado, estudiaremos en profundidad el alcance de estos aditivos superfluidificantes en la consecución de autocompactos.

Podemos decir que se ha ido evolucionando siempre con familias de aditivos que aumentan la trabajabilidad del hormigón incluso reduciendo en algunos casos las relaciones agua-cemento por debajo de 0,30. Fernández Gómez nos cita que las relaciones agua/cemento pueden llegar a 0,27 (FERNÁNDEZ GÓMEZ, 2003: p. 67). Por su parte, González-Isabel nos escribe la posibilidad de emplear relaciones a/c con valores de 0,22 o 0,23. Incluso este mismo autor expone como el valor límite inferior en 0,19 o 0,20 (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993: p. 68). Por lo tanto, con este tipo de relación se obtiene un producto final con una muy baja porosidad. Como consecuencia se mejoran las resistencias a corto y a largo plazo, la impermeabilidad y durabilidad. Además, se favorece una buena colocación, lo que redundará también en una mayor durabilidad.



Hormigón Autocompactante fluyendo -
noviembre de 2004

Es necesario aclarar que estos datos se refieren a casos generales, de aplicación internacional, entendiendo que las particularidades canarias nos llevan a unos resultados claramente diferenciados. En este sentido, podemos decir que si bien González-Isabel señala el requerimiento de obtener resistencias a compresión a 28 días de 60 MPa lo que implica una relación agua/cemento no superior a 0,40, nosotros podemos afirmar que hoy por hoy en Canarias llegar a esta relación a/c es complicado. Más aún cuando el objetivo es obtener una docilidad de trabajo correcta. Más tarde, en subcapítulo aparte, analizaremos estas señas de identidad de nuestro hormigón.

2.3.4.3 Definición del hormigón autocompactante

Para reflejar el significado del hormigón autocompactante, correcto es comenzar por quien realizó los primeros trabajos de investigación y aplicación además de darle nombre. Según Okamura un hormigón autocompactante es aquel que es capaz de fluir en el interior del encofrado, rellenándolo de forma natural, pasando entre las barras de armadura y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso (OKAMURA, 1997: pp. 50-54). Más tarde, Okamura y su equipo de trabajo especificarán que deben satisfacer los tres requisitos siguientes. Primero, el hormigón debe fluir libremente por cada rincón del encofrado sin el uso de vibración. Segundo, los efectos derivados de la generación de calor, endurecimiento o retracción por secado deben ser mínimos. Tercero, la permeabilidad del hormigón frente a la penetración de oxígeno, cloruros y agua debe ser mínima (OKAMURA; OZAWA y OUCHI, 2000: pp. 3-7).

En España, los especialistas Revuelta Crespo y Fernández Luco lo definen como un hormigón que no necesita de energía externa para conseguir el llenado completo de los encofrados y el recubrimiento de la armadura de refuerzo (REVUELTA, 2003: p. 1) y (REVUELTA y FERNÁNDEZ LUCO, 2003: p. 133). Otra definición la encontramos con Pacios, Palacios y Gettu que precisa al HAC como un material extremadamente fluido en estado fresco, que puede colocarse por gravedad sin necesidad de vibrado u otros medios de compactación, manteniéndose homogéneo y cohesivo sin segregación ni sangrado. Además, continúa estos autores, en estado endurecido y utilizando un buen diseño alcanza valores altos de resistencia y presenta buena durabilidad (PACIOS, 2003: p.144) y (PALACIOS; PACIOS y GETTU, 2004: p. 47). Continuando con definiciones de equipos de investigadores nacionales especializados en la materia tenemos también a Ravindra Gettu y su departamento. Ellos asumen la definición que el profesor Hajime Okamura daba en 1997 respecto a la fluidez y relleno del

encofrado por su propio peso. Por otra parte, además añaden la cita de Bartos y Grauers en 1999 acerca de que el hormigón después de colocado debe ser homogéneo. Por último, concretan en la definición dada por Okamura y su equipo en 2000, bautizando al material como “hormigón autocompactable de altas prestaciones”, satisfaciendo los tres requisitos previamente citados (GOMES; GETTU y AGULLÓ, 2001: p.27), (GETTU; GOMES; AGULLÓ y BERNARD, 2003: p. 15) y (GETTU y AGULLÓ, 2004: pp. 52-53).

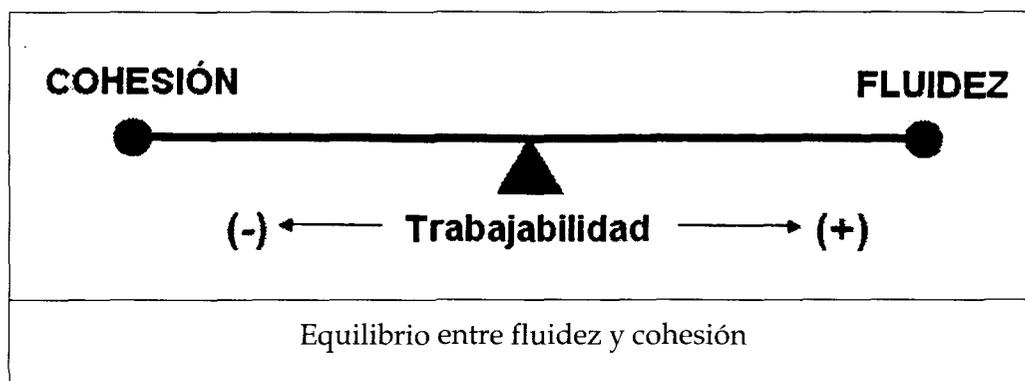
En extensión, existen muchas definiciones sobre este material, pero podemos afirmar que la más difundida expresa que se trata de un hormigón de muy alta fluidez que puede ser colocado por su propio peso y es capaz de rellenar todos los rincones del encofrado sin vibración y lograr una buena consolidación sin que se produzcan ni exudación, ni segregación, ni indicios de bloqueo.

Atendiendo a esta definición, las características fundamentales que deben definir un hormigón autocompactante son las que se muestran a continuación:

- **Elevada fluidez:** El hormigón autocompactante se caracteriza por una elevada fluidez hasta el punto de que los métodos tradicionales de ensayo, como por ejemplo el cono de Abrams, resultan obsoletos.
- **Resistencia a la segregación:** La elevada fluidez no debe implicar nunca segregación o exudación. La masa debe mantener la homogeneidad tanto de forma intrínseca como al someterse a la puesta en obra.
- **Adecuada viscosidad plástica:** El HAC debe fluir por la acción de su propio peso. Esto requiere unas características de formulación para que el hormigón no se bloquee en su paso a través de las armaduras, con un perfecto relleno.
- **Deformabilidad en estado fresco:** Para obtener unos buenos acabados y un perfecto recubrimiento de las armaduras, el hormigón autocompactante en estado fresco debe caracterizarse por su adaptación total a la forma del encofrado.

Todas estas características básicas deben mantener un equilibrio entre ellas a pesar de que algunas como fluidez y cohesión (resistencia a la segregación) presenten cierto antagonismo. Podemos decir que una adecuada formulación del HAC implica que todas las propiedades citadas se mantengan en un equilibrio estable y óptimo durante todo el tiempo que implique el transporte y su colocación en obra.

En relación a esta ponderación encontramos el significativo gráfico que presenta Luis Garrido. Se trata de una balanza que representa la armonía entre estas cualidades (GARRIDO, 2004: p. 7).



Entendemos que el conjunto de estas enunciaciones esclarece el término que define al material pero al objeto de unificar criterios y en relación a la presente tesis aplicamos las siguientes expresiones recogidas de la norma italiana UNI 11040 sobre "Ensayos sobre hormigón autocompacto. Especificaciones, características y control". Esta normativa del país vecino, de reciente redacción, responde adecuadamente a las exigencias que debe observar la Unión Europea en la aplicación comercial del HAC (UNI 11040, 2003).

- Hormigón autocompactante: Hormigón homogéneo que es puesto en obra y compactado sin intervención de medios exteriores (vibración) por el solo efecto de la fuerza gravitatoria. El hormigón autocompacto, además de satisfacer los requisitos de clase de resistencia y exposición definidos en la UNI EN 206-1, tiene

la propiedad específica, en estado fresco, de presentar una elevada fluidez con ausencia de segregación.

- **Capacidad de relleno:** Capacidad del hormigón autocompacto fresco de fluir sin segregar bajo la acción de su propio peso.

- **Capacidad de atravesar obstáculos, fluidez por confinamiento o deformabilidad:** Capacidad del hormigón autocompacto fresco de cambiar de forma y pasar a través de las armaduras o los obstáculos y llenar los espacios disponibles sin segregación y sin bloqueo.

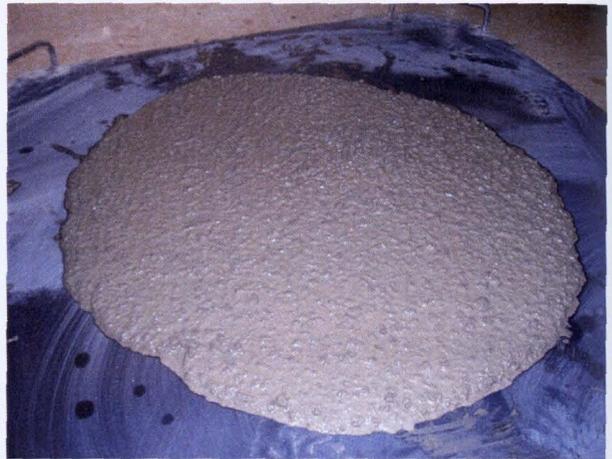
- **Resistencia a la segregación:** Capacidad del hormigón autocompacto fresco de mantener su composición homogénea e invariable tanto en movimiento como en reposo durante el transporte y la puesta en obra.

- **Fluidez:** Característica del hormigón autocompacto fresco para deformarse libremente, valorable indirectamente en términos de esparcimiento, mediante el ensayo de esparcimiento en cono.

- **Viscosidad:** Característica atribuible a la velocidad con que el hormigón autocompacto fresco se deforma, valorable indirectamente en términos de trabajabilidad a través del tiempo de flujo en embudo o del tiempo de esparcimiento.

- **Tiempo de esparcimiento:** Valor determinado mediante un ensayo de esparcimiento (hendidamiento del cono) midiendo el tiempo necesario para alcanzar un diámetro de 500 mm. Es un parámetro relacionado con la viscosidad de la masa.

- **Tiempo de trabajabilidad:** Tiempo necesario para que la consistencia del hormigón autocompacto fresco se reduzca del valor inicial hasta el valor de 600 mm, límite inferior de fluidez para el hormigón autocompacto, valorable con el ensayo de esparcimiento en cono.



Flujo de esparcimiento de HAC en nuestro Laboratorio - Octubre de 2004

2.3.4.4 Propiedades del hormigón autocompactante

En un principio, el hormigón autocompactante se diseñó para mejorar algunas propiedades relacionadas con la ejecución de estructuras. Hemos comprobado que una intención sería promover la construcción más durable y fiable de estructuras (GETTU; BARRAGÁN y AGULLÓ, 2004: p. 87) y (GETTU y AGULLÓ, 2004: p. 52). También sabemos que fue ideado por Okamura por vez primera en Japón en el año 1986 como consecuencia de la necesidad de incrementar la productividad mediante la reducción de los tiempos de puesta en obra, la mejora de las condiciones ambientales en la construcción, la necesidad de superar nuevos retos estructurales como formas y estructuras donde la densidad de armaduras hace difícil el empleo de métodos tradicionales de compactación y la búsqueda de la mejora del producto final en términos de resistencia y durabilidad (PÉREZ; ORDOÑEZ; MENÉNDEZ y RUBIO, 2004: p. 59). El autor especialista en la materia, Garrido Romero, refleja que fue desarrollado con la finalidad de mejorar la durabilidad de los hormigones para no depender de la escasez de personal especializado y para facilitar el hormigonado con fuertes cuantías de armadura (GARRIDO, 2004: p. 5).

En otras jornadas técnicas sobre el HAC, Revuelta Crespo indica que surge como consecuencia de la necesidad de incrementar la productividad mediante la reducción de los tiempos de puesta en obra, la mejora de las condiciones medioambientales en la construcción, la necesidad de superar nuevos retos estructurales y la búsqueda de la mejora del producto final en términos de resistencia y durabilidad (REVUELTA, 2003: p. 1) y (REVUELTA y FERNÁNDEZ LUCO, 2003: p. 133).

Todas estas acepciones nos ayudan a entender la justificación inicial en el desarrollo de este hormigón. Con el tiempo está demostrando ser beneficioso debido a estos factores y muchos otros. Algunos ejemplos serían la facilidad en la colocación en el encofrado, obtener altas resistencias a corto y largo plazo o alta impermeabilidad y durabilidad (PÉREZ; ORDOÑEZ; MENÉNDEZ y RUBIO, 2004: p. 5), (GETTU y AGULLÓ, 2004: p. 60) o (GARRIDO, 2005).

En general, y a la vista de las referencias trabajadas podemos decir que las propiedades que mejoran en la ejecución de hormigones a nivel general son las siguientes:

- Una construcción más rápida, puesto que el hormigón fluido llega con mucha más rapidez a todos los rincones del hueco a hormigonar.
- Un ahorro en la mano de obra. En relación a los cuatro o seis trabajadores necesarios para la colocación de un hormigón seco, con este nuevo hormigón y un buen encofrado estanco, lo podría colocar una sola persona.
- Un mejor acabado superficial, ya que con la composición de esta mezcla rica en finos, el contacto con el encofrado estará correctamente colmatado, lo que evitará las superficies ásperas, coqueras y otras marcas ocasionadas por la vibración.

- Una mayor facilidad de colocación, al conseguir rellenar el hueco vertiendo el hormigón desde una esquina.

- Una mejora de la durabilidad del material puesto que los componentes finos evitan la abundancia de porosidad y huecos, lo que redundaría en la estanqueidad e impermeabilización.

- Una mayor libertad y posibilidades en el diseño por la capacidad de deformabilidad del fluido.

- Unas secciones de hormigón más reducidas permitidas por la capacidad de paso del hormigón en huecos más estrechos donde cabe la armadura, además de por mejores resistencias del hormigón a corto y a largo plazo.

- Una reducción de los niveles de ruido en las obras debido a la ausencia de vibraciones.

- Un entorno de trabajo más seguro, por la facilidad de colocación, frente a la necesidad de un mayor número de trabajadores y más tiempo para la colocación y vibrado de otros hormigones.

- Un trabajo más saludable, por evitar la vibración en los brazos de los trabajadores que ocasionan enfermedad por desgaste.

- Reducción en el desgaste de los moldes y encofrados, que previamente eran expuestos a demasiada presión por el vibrado.

- Ahorro en equipos y maquinarias, como vibradores y alargadores de vertido innecesarios.

A continuación se analizan las propiedades que afectan al hormigón en estado fresco y en estado endurecido y se comentan las mejoras constructivas y económicas que se consiguen con este tipo de hormigón.

2.3.4.4 A Propiedades del HAC en estado fresco

Es evidente como demuestra su definición que su principal característica en estado fresco es que debe fluir y compactarse con su propio peso de manera homogénea. No hace mucho tiempo se asociaba hormigón de calidad a hormigón de consistencia seca o conos bajos (20-40 mm máx.), difíciles de colocar en obra y peligrosos si no se compactaban bien. Actualmente se pueden



Vertido de HAC en planta de prefabricados
Canarias - Enero de 2005

conseguir hormigones de muy alta calidad compatibles con consistencia muy fluida y, por lo tanto, muy trabajables, que permiten una fácil puesta en obra sin incrementar la relación agua/cemento, sino todo lo contrario. Para conseguir una masa fluida, compacta y de alta homogeneidad es necesario un exhaustivo estudio reológico además del empleo de los aditivos y adiciones específicas.

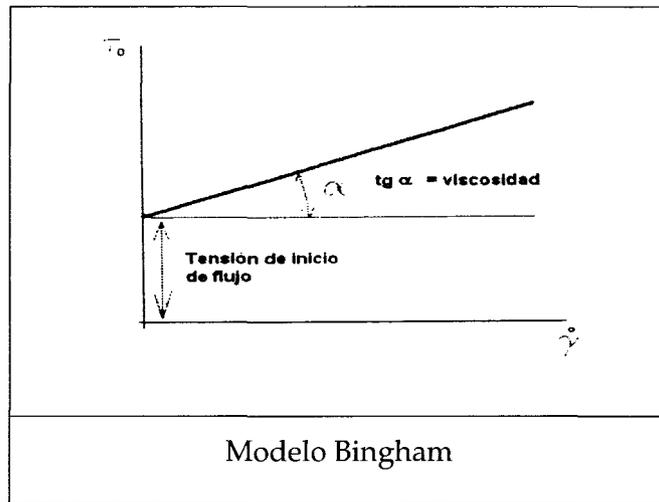
El aditivo superfluidificante empleado se distingue claramente del resto de los aditivos por poseer una elevada capacidad de reducción de agua incluso a bajas dosificaciones. Esto permite producir hormigones con muy bajas relaciones a/c (incluso 0,30), pero a su vez con elevadas consistencias, pues por las características de este tipo de hormigones se obtienen masas de los mismos que resultan homogéneas, compactas y sin segregación.

Su propiedad fundamental en estado fresco, evidentemente, es su capacidad autocompactante que permite la puesta en obra sin la necesidad de vibradores, todo ello sin exudación, segregación e indicios de bloqueo del árido grueso. Un hormigón vibrado, muchas veces, no deja el hormigón completamente

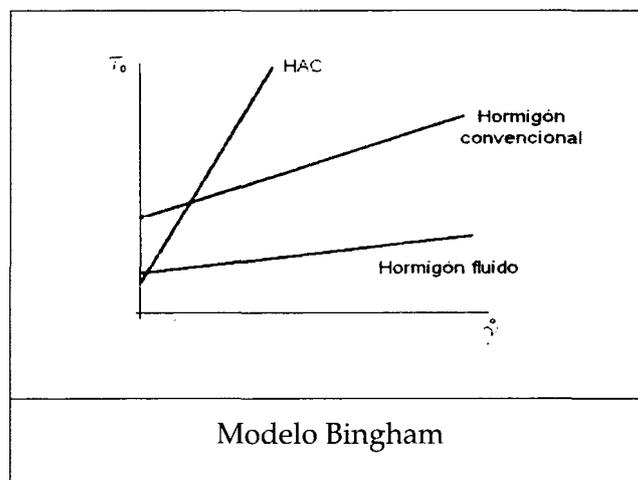
consolidado, especialmente en elementos esbeltos, con gran cantidad de armadura o de formas complicadas. Por otro lado, una vibración mal hecha produce segregación en el hormigón.

Revuelta Crespo y Fernández Luco, así como también Garrido Romero describen las propiedades del hormigón autocompacto en estado fresco como una suspensión de partículas complejas. La razón de este particular es la diversidad de tamaños que incluye y porque la fase líquida está en continuo cambio debido al desarrollo de la hidratación del cemento. La posibilidad de fluir y resistirse a la segregación se debe evaluar a través de las propiedades reológicas -tensión de inicio de flujo y viscosidad- del hormigón fluido. Se debe analizar a partir de las propiedades físicas que regula el movimiento de los fluidos según el modelo Bingham (REVUELTA y FERNÁNDEZ LUCO, 2003: p. 134), (REVUELTA, 2003: pp. 2-3) y (GARRIDO, 2004: p.25).

Exponemos un gráfico que da una buena idea del comportamiento básico del material. La representación es sencilla; al intentar poner en movimiento al hormigón - proporcionar al fluido una velocidad $\dot{\gamma}$ -es necesario vencer una resistencia τ_0 debido al rozamiento entre las partículas. Una vez iniciado el movimiento, se requiere seguir aumentando la fuerza aplicada al fluido para conseguir acelerarlo, debido a la cohesión entre partículas. Esta resistencia una vez comenzado el movimiento se mide a través de la viscosidad α (REVUELTA y FERNÁNDEZ LUCO, 2003: p. 134), (REVUELTA, 2003: pp. 2-3) y (GARRIDO, 2004: p.25).



Comparando el hormigón autocompactante con un hormigón tradicional, el primero debe presentar una tensión de inicio de flujo inferior, similar a la que presentan los hormigones fluidos; pero a diferencia de éstos, en los que la viscosidad es menor que la de un hormigón convencional, la viscosidad de un autocompacto debe ser incluso mayor que la de los hormigones normales para asegurar la cohesión. No obstante, esta viscosidad puede variar considerablemente en función de la técnica de producción y de la aplicación. El siguiente gráfico muestra una comparativa entre distintos tipos de hormigón según sus propiedades reológicas características. Se comprueba para el autocompacto una tensión de inicio de flujo siempre baja y una variable viscosidad.



Una vez reflejado que la consistencia del hormigón autocompacto en estado fresco debe ser totalmente líquida, comprenderemos que los métodos tradicionales de evaluación de consistencia del hormigón resultan pretéritos. Debido a estas características de autocompacidad nuevos métodos especiales de evaluación de fluidez, consistencia o segregación se han creado. El flujo de asentamiento, el embudo en V, la caja en L y otros, son métodos que determinan con más precisión el mayor o menor comportamiento líquido. Además permiten comprobar el grado de cohesión del hormigón en una situación similar a las condiciones reales de una obra.

Otra propiedad importante del H.A.C. en estado fresco es el mantenimiento en el tiempo de esta fluidez permitiendo obtener un hormigón muy dócil por más tiempo y sin retrasar el inicio ni el final de fraguado, a diferencia de cuando se emplean los superfluidificantes convencionales que limitan el tiempo de trabajabilidad en consistencias deseables.

2.3.4.4 B Propiedades del HAC en estado endurecido

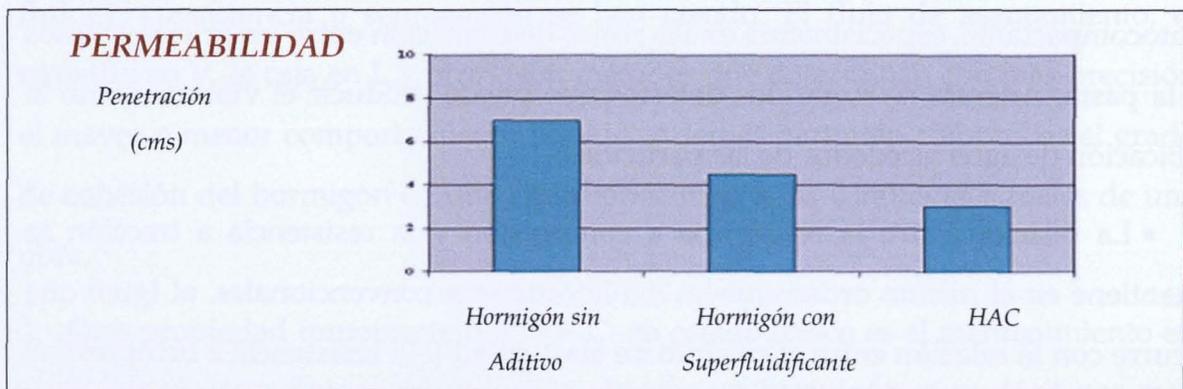
Ya el autor Revuelta nos indica que es difícil comparar objetivamente las cualidades de este hormigón en estado endurecido (REVUELTA, 2003). Esto es real puesto que se trata de un tipo de hormigón relativamente reciente. Aunque por otra parte, es necesario asegurarnos de que el producto endurecido garantice, al menos, con las prescripciones en términos de durabilidad y resistencia que nos marca la normativa. Gracias a investigaciones que intentan adelantar lo que puede ocurrir en el futuro, podemos hablar de características en estado endurecido que prometen cierta mejoría del autocompactante con respecto al hormigón tradicional también en estado endurecido.

El proyecto *Brite/AURam* dedicado a investigar las propiedades características del producto final autocompactante y del que Garrido nos describe sus

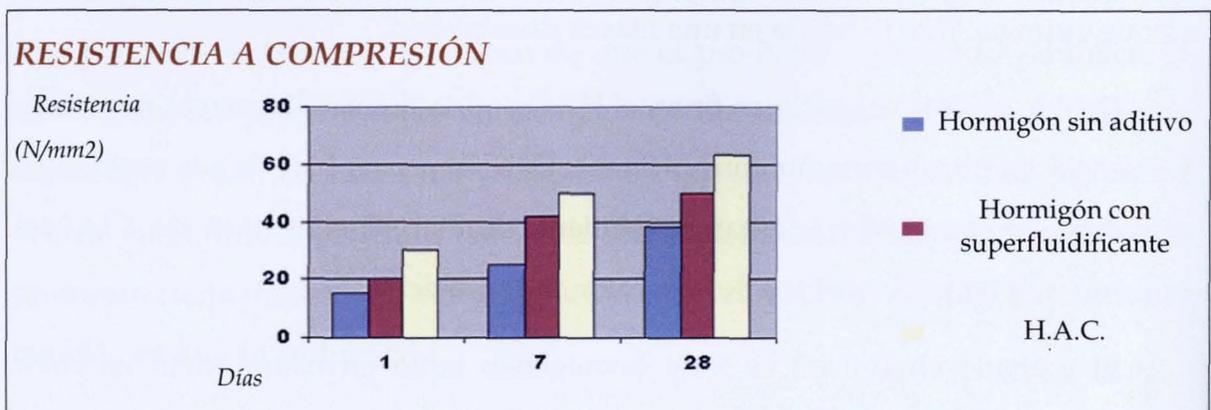
conclusiones principales nos expone que con respecto a un hormigón convencional (GARRIDO, 2003):

- Se mejoran las resistencias mecánicas así como la permeabilidad con la misma relación agua/cemento. Esto es debido a la microestructura más densa del autocompactante, especialmente en las zonas de transición entre los áridos gruesos y la pasta. Además se evitan los defectos que puede producir el vibrado como la ubicación de agua alrededor de las partículas.
- La relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción se mantiene en el mismo orden que en los hormigones convencionales, al igual que ocurre con la relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión. Esto significa que también mejora la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad.
- La adherencia hormigón-acero es superior en los HAC con relación a hormigones normales de igual resistencia.
- La menor porosidad atribuida a la baja relación agua/cemento se traduce en mayor impermeabilidad, principalmente en las zonas cercanas a la superficie del hormigón, ralentizando los procesos de deterioro como el avance de la carbonatación, la corrosión de las armaduras por los iones cloruro y otros tipos de ataque químico. Esto redundará en una mayor durabilidad.
- Debido al alto contenido en finos, el HAC podría desarrollar mayor retracción y fluencia que un hormigón convencional. Estos aspectos han de ser tenidos en consideración pudiendo resultar conveniente limitar el contenido de C₃A del cemento u optar por cementos de bajo calor de hidratación.
- El acabado superficial es muy homogéneo tanto en lisura como en color debido a que no se producen los reflejos del vibrado. Además debido al alto contenido en finos también presenta menor porosidad.

En definitiva, sus bajas relaciones agua-cemento y el alto contenido en finos permiten una importante reducción de la porosidad, lo que implica una mayor impermeabilidad, como parámetro fundamental de la durabilidad. Podemos comparar en los siguientes gráficos (www.bettor-mbt.es).



Como consecuencia también de las bajas cantidades de agua y del contenido en finos utilizado para preparar este tipo de hormigones, se favorecen muy positivamente las propiedades del hormigón endurecido en las resistencias mecánicas tanto a corto como a largo plazo. Debido además a sus características de formulación, donde se busca una linealidad en el tamaño de los granos y la colmatación de todos los posibles huecos con elementos sólidos, la resistencia mecánica siempre se ve mejorada.



Esta misma referencia, también asegura excelentes acabados superficiales que colaboran del mismo modo en su durabilidad. Además destaca que el color es más uniforme, sin eflorescencias de vibrado y que estos excelentes acabados son debidos principalmente al diseño del hormigón y a su bajo porcentaje de aire ocluido que disminuye la porosidad superficial. También considera la misma empresa que la retracción a pesar de su elevado contenido en finos, no resulta problemática. La razón fundamental es la disminución de agua y la adecuada disposición de las partículas que componen el conglomerado.

2.3.4.4 C Propiedades constructivas del HAC

Una característica fundamental del HAC es que las propiedades constructivas deben diseñarse en el proyecto. La calidad del hormigón puede establecerse con la elección de la formulación. El diseñador puede proyectar cualquier forma constructiva, estructural o espacial solamente definiendo los encofrados y parámetros como relación agua/cemento o resistencias mecánicas.

El hormigón autocompactante permite un uso eficiente de los recursos humanos con importantes ahorros de mano de obra, gracias a la disminución de los tiempos de ejecución y a la ausencia de vibración.

Desde el aspecto constructivo, en este tipo de hormigón se cuidan cinco parámetros fundamentales:

- Relación agua-cemento.
- Tiempos de fraguado.
- Consistencia.
- Tiempo de trabajo o permanencia de fluidez
- Reología.

2.3.4.4 D Propiedades económicas del HAC

No resulta sorprendente que el precio de los hormigones autocompactantes supere al de uso común en la actualidad. Aunque algunos componentes en la dosificación puedan ser hasta un 300% más caro, su repercusión en el metro cúbico no es decisiva. Además debe considerarse la posibilidad de reducir de sección permitida por las altas resistencias del hormigón. Esto implica un menor gasto de material. También se debe destacar la resistencia ante las agresiones atmosféricas que permite emplearlo sin tratamientos especiales (www.hormigonelaborado.com).

Indirectamente, el HAC permite notables ahorros en la obra, producto de la facilidad y velocidad del hormigonado, de la menor necesidad de personal y maquinaria, de la calidad de terminación sin necesidad de correcciones y del menor desgaste de equipos o encofrados. Además, la facilidad de colocación y la reducción de ruidos derivados del vibrado repercutirán en la seguridad y salud de los trabajadores.

Por otro lado, abre notables perspectivas para el diseño de formas más complejas que hasta ahora hacían difícil su materialización. Los principales factores de reducción de costos con el HAC son los siguientes (DE LA PEÑA, 2001):

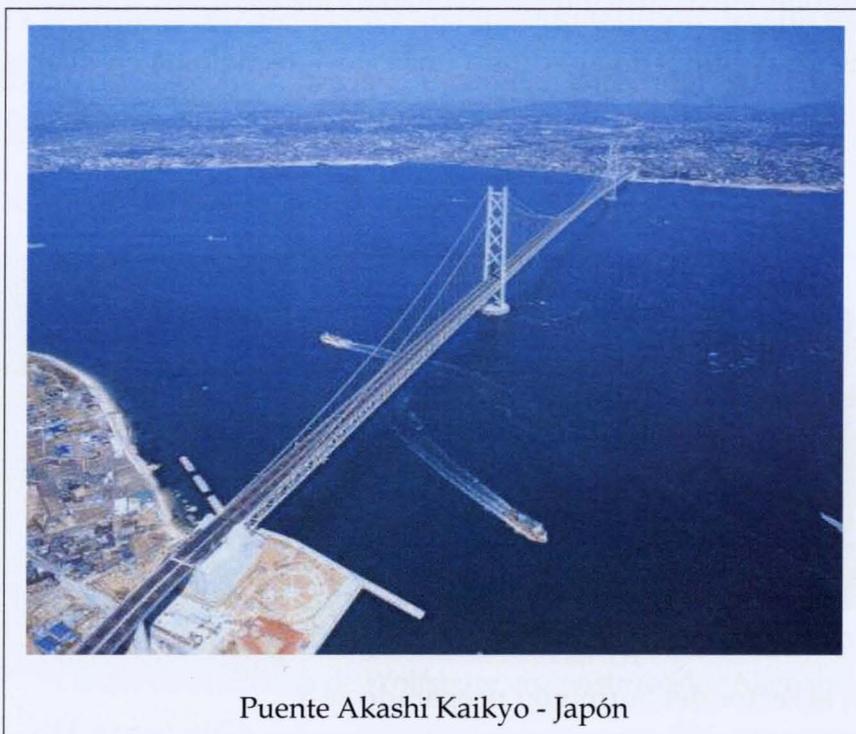
- Alta velocidad de colocación del hormigón lo que se traduce en notable reducción de los plazos de construcción.
- Ahorro en mano de obra.
- Ahorro en equipos y maquinaria.
- Alta calidad y durabilidad.
- Superficies sin defectos.

- Mayor flexibilidad en el diseño (elementos esbeltos).
- Reducción de ruido (trabajo continuo).

2.3.4.5 Realizaciones con hormigón autocompactante

El HAC se ha empleado en aplicaciones de prefabricación, edificación y obra civil. Así, desde los primeros estudios y experiencias llevadas a cabo en 1988, el uso del HAC se ha incrementado gradualmente, siendo las principales razones de su empleo la alta productividad que se consigue con el acortamiento del plazo y la reducción de la mano de obra, el asegurar la correcta compactación del hormigón en zonas confinadas de difícil acceso y la eliminación del ruido derivado de la vibración.

2.3.4.5 A Primeras realizaciones



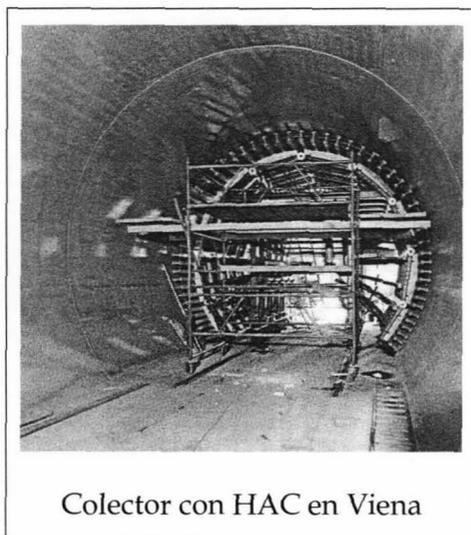
La primera realización de entidad a escala real es la construcción en Japón de

los bloques de anclaje del puente colgante Akashi Kaikyo, iniciado en 1992 e inaugurado a mediados de 1998, donde se empleó un volumen de 290.000 m³ de HAC y se alcanzaron rendimientos de 1.900 m³/día, logrando una reducción del plazo de hormigonado de los 30 meses previstos a 24 ejecutados (-20%) (GETTU y AGULLÓ, 2004: p. 53).

Tan sólo unos meses más tarde y también en Japón, se empleó HAC en la construcción de un depósito de gas natural líquido en Osaka, donde, además de reducir el plazo de construcción de 22 a 18 meses (-18%), se disminuyó tremendamente la mano de obra necesaria, precisando únicamente 50 obreros en un trabajo que con hormigón convencional hubiera requerido de unos 150 trabajadores (GETTU y AGULLÓ, 2004). A raíz de aquí, se impulsó la construcción de otros depósitos, unos de ellos subterráneo. También se utilizó HAC en la construcción de un viaducto pretensado y de un tunel, ambos en Yokohama. Estos autores prosiguen en su artículo desarrollando los ejemplos iniciales también en edificación. Se ha continuado aplicando una nueva tecnología en pilares o bóvedas de edificios con acero y HAC que disminuían los plazos de ejecución, todo en Japón.

2.3.4.5 B Realizaciones en Europa

Refiriéndonos ya a Europa, las primeras experiencias del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de París datan de 1995. En el año 2000, gracias a un proyecto nacional francés para el desarrollo del HAC, la producción de este hormigón en el sector del hormigón preparado se cifraba en 50.000 m³ en unos 40 proyectos de edificación y obra civil (GETTU y AGULLÓ, 2004). En este país una aplicación la

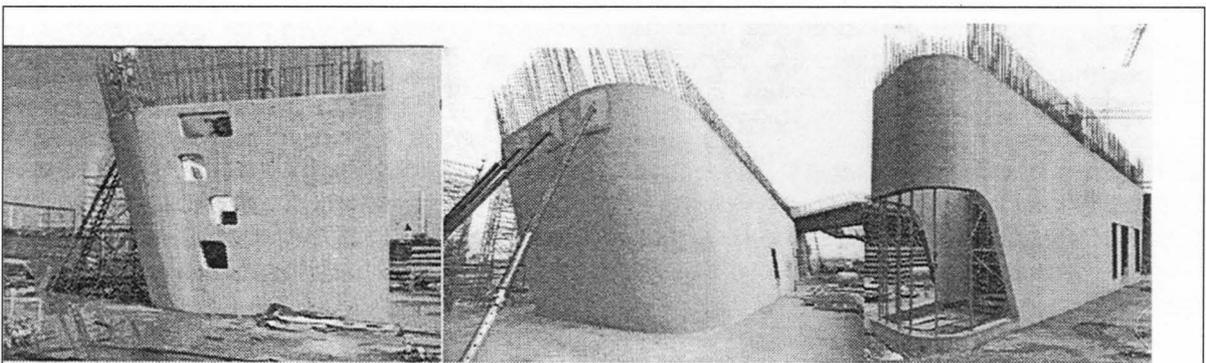


Colector con HAC en Viena

encontramos en el centro de arte Meudon, donde se construyeron muros verticales de cara vista, zapatas y pavimentos empleando hormigón autocompacto (BORRALLERAS, 2003-a: p. 67) y (BORRALLERAS, 2003-b: pp. 149-159).

Sin embargo, una verdadera vanguardia tecnológica del hormigón autocompactante tanto a escala europea como mundial la representan hoy por hoy los países nórdicos, fundamentalmente Suecia, donde son de destacar los trabajos de investigación emprendidos por el Instituto Sueco de Investigación sobre el Hormigón y el Cemento. En este país nórdico ya se habían construido por ejemplo, hasta el año 1999, varios puentes, recubrimiento de túneles y estructuras de edificaciones de viviendas, así como rehabilitaciones en edificios.

También en Dinamarca, Alemania o Suiza, el empleo de HAC experimenta fuertes niveles de crecimiento. Singularmente, en Alemania, se ha construido con esta técnica el Centro de la Ciencia de Wolfsburg o la central BMW en Leipzig, Alemania de la arquitecta Zaha Hadid que ha sido todo un desafío arquitectónico (HADID, 2005: pp. 54-63) y (revista *Casabella*, 2005: pp. 90-103). También es destacable el memorial judío en Berlín del arquitecto Peter Eisenman con una malla de 2.700 bloques de hormigón autocompactante (Anónimo, 2005: p. 5).



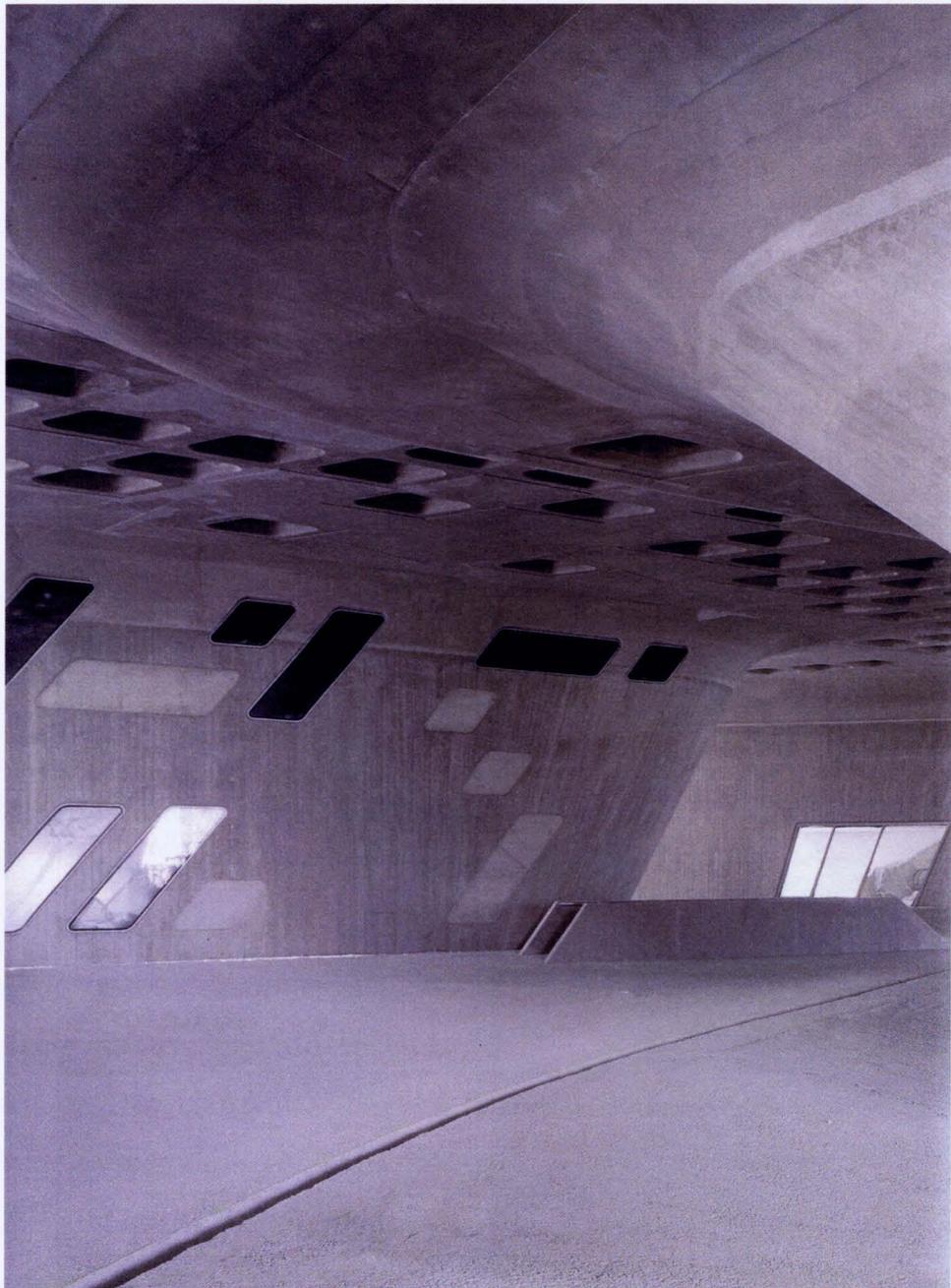
Centro de la Ciencia de Wolfsburg en construcción- Alemania



Centro de la Ciencia Phaeno de Wolfsburg - Alemania



Memorial judío en Berlín - Alemania



Centro de la Ciencia Phaeno de Wolfsburg - Detalle

2.3.4.5 C Realizaciones en España

La experiencia en España comienza a destacar. La realización pionera se remonta tan sólo a 2001 con la construcción del puente del barrio de Las Fuentes en la Ronda de la Hispanidad sobre el río Ebro en Zaragoza, cuyo arco mixto de sección triangular fue ejecutado con HAC para asegurar un eficiente relleno de la estructura metálica (GETTU y AGULLÓ, 2004). A principios de 2002 se construye la primera aplicación de HAC postensado y con requisitos de hormigón visto: es el nuevo edificio del Ayuntamiento de Mollet del Vallés en Barcelona. Borralleras describe las primeras realidades de diferentes obras y aplicaciones en nuestro país (BORRALLERAS, 2003-a: pp. 55-60) y (BORRALLERAS, 2003-b: pp. 149-159). Estos artículos nos ofrecen descripciones atentas acerca de diversas obras. Nosotros destacamos las fórmulas de trabajo elegidas:

Dosificación del HAC del Puente del barrio de Las Fuentes en Zaragoza (BORRALLERAS, 2003-b):

CEM I-52,5R (Valenciana de cementos)	450 Kg/m ³
Cenizas volantes	100 Kg/m ³
Arena rodada 0/6	895 Kg/m ³
Gravilla rodada 6/12	881 Kg/m ³
Glenium 52	2,3 % spc
Relación agua/cemento	0,36

Dosificación del HAC del nuevo edificio del Ayto de Mollet del Vallés (BORRALLERAS, 2003-b):

CEM I-42,5R (Molins)	400 Kg/m ³
Arena machaqueo 0/2	191 Kg/m ³
Arena machaqueo 0/5	678 Kg/m ³
Gravilla 5/12	869 Kg/m ³
Glenium C303 SCC	1,5 % spc
Agua	176 lts/m ³

Posteriormente han sido diversas las obras de pavimentación, rehabilitación de viviendas y revestimiento de túneles en las que se ha empleado con éxito esta tecnología. También se han construido otras obras de carácter general en las que se ha elegido esta opción del HAC por las propiedades de este material. Algunos de estos ejemplos son: el aparcamiento subterráneo de la Plaza del Arenal en Dos Hermanas (Sevilla), edificios de viviendas en Hacienda Guadalupe - Manilva (Sevilla), oficinas de Cementos Goliat (Málaga), viviendas sociales (Cádiz), depósito de agua en la central de hormigón de Malaka



Panel de HAC

(Málaga), pista de atletismo del Colegio Añoreta-Rincón de la Victoria (Málaga) (HURTADO, 2004: pp. 99-118).

Y en lo que se refiere al uso de HAC en la industria de la prefabricación española, puede decirse que los primeros pasos para la adaptación de los procesos productivos y las experiencias iniciales se remontan a los años 2000 y 2001. Se está empleando tanto para la producción de paneles como de piezas estructurales, armadas y pretensadas. Los resultados son sorprendentes en resistencias iniciales y acabados, así como aspectos de producción, economía y de seguridad y ambiente de trabajo. Paradójicamente, es el auge que se registra actualmente en el sector de la construcción lo que, en cierto modo, ralentiza la implantación del HAC en la industria prefabricadora española, puesto que las plantas de fabricación trabajan a un fuerte ritmo encaminado a satisfacer la elevada demanda y ello origina que la mayor parte de los empresarios se planteen el cambio hacia el HAC no a corto, sino a medio plazo (BORRALLERAS, 2003-b).

Además el hormigón autocompactante se ha empleado para el diseño y fabricación de mobiliario urbano prefabricado en serie. Un elemento de diseño ha sido un banco modular fabricado por la empresa Escofet con el nombre Silla-U. Dicho elemento fue diseñado por A. Viaplana y H. Piñón (GETTU; BARRAGÁN y AGULLÓ, 2004:p. 93).

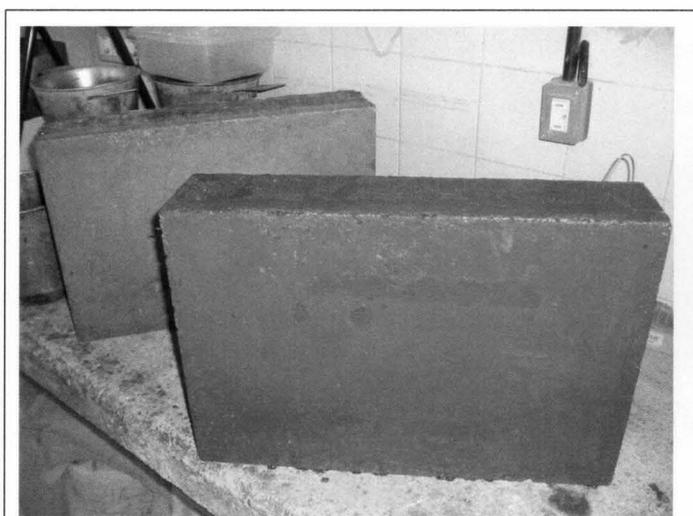


Foto 12: Mobiliario urbano con HAC

2.3.4.5 D Realizaciones de pequeña escala

Los campos generales en los que se está empleado el hormigón autocompactante son:

- Elementos Prefabricados de diseño industrial para mobiliario urbano.
- Hormigonado en estructuras fuertemente armadas o de difícil acceso para la puesta en obra del hormigón.
- Prefabricación en general, permitiendo la fabricación de elementos de pequeño espesor y elevada densidad de armadura, así como piezas de formas complejas (curvas, superficies inclinadas, superficies con huecos o recortes, etc.).
- Elementos voluminosos de hormigón, gracias a la reducción de plazos y de coste que supone esta técnica.
- Rehabilitación de viviendas antiguas, a fin de eliminar posibles problemas originados por el efecto del vibrado en estructuras antiguas.
- Hormigones con altas prestaciones en calidad de acabado.



Experiencias en Laboratorio

- Revestimiento de túneles de carretera y ferrocarril, con mejores acabados superficiales, resistencias mecánicas y reducidos plazos de ejecución.
- Estaciones de tratamiento de aguas, por razones de productividad, impermeabilización y durabilidad de los hormigones.
- Aplicaciones horizontales (forjados, soleras y losas de cimentación) por la facilidad y rapidez de colocación y la eliminación de la necesidad de una compactación mecánica. Se precisa menos mano de obra y se reducen las labores de acabado.
- Aplicaciones verticales (muros, pilares) por la reducción del tiempo de colocación, mayor regularidad y calidad de las superficies en contacto con los encofrados con ausencia de coqueras, nidos de grava y eflorescencias derivadas de la vibración.
- En general, todo tipo de hormigonados en entornos sensibles al ruido (hospitales, centros de enseñanza, residencias de tercera edad, etc.).

2.3.4.5 E Otras aplicaciones

Exponemos algunos ejemplos de otras posibles aplicaciones para el HAC (www.hormigonelaborado.com):

- Hormigonado bajo agua: Uno de los desarrollos iniciales del hormigón autocompactante fue para utilizarlo en construcciones bajo el agua, una técnica muy cara cuando se utiliza el hormigón convencional. Existe un mercado sumamente especializado, aunque pequeño para esta aplicación, pero puede ser exclusivo de este tipo de hormigón.

- Reparaciones o construcciones en áreas con acceso limitado: Debido a su fluidez, alta estabilidad y bajo riesgo de obturación, es más fácil colocar el hormigón autocompactante. El HAC sería una solución cuando es necesario hacer

reparaciones de elementos estructurales en áreas restringidas o cuando el número de operarios y los medios de acceso se encuentran limitados.

- **Colocación en obra:** El hormigón autocompactante permite una colocación en obra más industrializada, el trabajo de compactación manual puede ser eliminado y al mismo tiempo se puede alcanzar una mejor calidad, que eliminaría las incómodas reparaciones. Cerca del 40% de los costos totales de la construcción se encuentran en la mano de obra, permitiendo importantes reducciones en este aspecto.

- **Aplicaciones en prefabricados:** En el campo del hormigón prefabricado, los productos de hormigón tienden a ser más grandes y complejos, necesitando mayor técnica para la compactación del hormigón. El hormigón autocompactante ofrece la posibilidad de reducir los costos de transporte y colocación. Se puede ahorrar en mantenimiento, mano de obra y se puede eliminar el ruido de la vibración (hormigón silencioso).



2.3.4.6 Normativas de referencias del hormigón autocompactante

En la actualidad no existen unas normativas específicas para la consecución del hormigón autocompactante, no obstante se están preparando unos procedimientos regulados para la Unión Europea. Reseñamos en este subapartado un listado con las normas de consulta para la ejecución de HAC (www.efnarc.org) y (UNI 11040, 2003). También destacamos que esta normativa citada del país vecino -Italia-, responde adecuadamente a las exigencias que debe observar la Unión Europea en la aplicación comercial del HAC: *Organismo Nacional italiano de Normalización – UNI 11040*. Asimismo, el grupo europeo creado para el hormigón autocompactante continúa en igual línea: *Self-Compacting Concrete European Project Group –BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC-* (2005: p. 3). Las normativas que deben observarse son las siguientes:

- EN 197-1: Cemento - Composición, especificaciones y criterios de conformidad para cementos comunes.
- EN 206-1: Hormigón - Especificación, comportamiento, fabricación y conformidad.
- EN 450-1: Cenizas volantes para hormigón - Definiciones, requisitos y control de calidad.
- EN 450-2: Cenizas volantes para hormigón - Criterio de conformidad.
- EN 934-2: Aditivos para hormigón, morteros y pastas - Definiciones, requisitos, conformidad, marcaje y etiquetado.
- EN 1008: Agua de amasado para hormigón.
- EN 1992-1: Eurocódigo 2: Diseño de estructuras de hormigón. Reglas generales y reglas sobre edificios.
- EN 12350-1: Ensayos sobre hormigón fresco. Toma de muestras.

- EN 12350-2: Ensayos sobre hormigón fresco. Ensayo de asentamiento.
- EN 12350-6: Ensayos sobre hormigón fresco. Masa volumétrica.
- EN 12350-7: Ensayos sobre hormigón fresco. Contenido de aire ocluido – Método de presión.
- EN 12390-1: Ensayo sobre hormigón endurecido - Forma, dimensiones y otros requisitos para probetas y moldes.
- EN 12390-2: Ensayo sobre el hormigón endurecido – Fabricación y curado de las probetas para ensayos de resistencia.
- EN 12390-3: Ensayo sobre el hormigón endurecido - Resistencia a compresión de probetas de ensayo.
- EN 12620: Áridos para hormigón.
- EN 12878: Pigmentos para la coloración de materiales de construcción elaborados a base de cemento y/o cal - Especificaciones y métodos de ensayo.
- EN 13055-1: Agregados ligeros para hormigón, mortero y pasta.
- EN 13263-1: Humo de sílice para hormigones - Definiciones, requisitos y criterios de conformidad.
- EN 13369: Reglamentos comunes para productos de hormigón prefabricado.
- EN 13670: Ejecución de estructuras de hormigón.
- EN ISO 5725: Exactitud de métodos de medida y resultados.
- EN ISO 9001: Sistemas de gestión de calidad – Requisitos.

Se debe tener en cuenta que algunas de estas normas EN pueden estar todavía en preparación, por tanto, éstas siempre deben corroborarse. Además remitimos a otras normas para consulta referentes principalmente a ensayos del hormigón en

estado fresco por lo trascendentes que podrían ser en este momento (UNI 11040, 2003):

- UNI 6393: Control de la composición del hormigón fresco.
- UNI 7123: Hormigón - Determinación de los tiempos de principio y fin de utilización determinados a partir de la medida de la resistencia a la penetración.
- UNI 11041: Ensayo sobre el hormigón autocompacto fresco - Determinación de la trabajabilidad y del tiempo de esparcimiento.
- UNI 11042: Ensayo sobre el hormigón autocompacto fresco - Determinación del tiempo de flujo en embudo.
- UNI 11043: Ensayo sobre el hormigón autocompacto fresco - Determinación del escurrimiento por confinamiento en un recipiente en L.
- UNI 11044: Ensayo sobre el hormigón autocompacto fresco - Determinación del escurrimiento por confinamiento en un recipiente en U.
- UNI 11045: Ensayo sobre el hormigón autocompacto fresco - Determinación del escurrimiento por confinamiento en un de anillo en J.

La versión para hormigones ordinarios tiene que ser aplicada con la variante de que la fabricación de probetas moldeadas o el llenado de recipientes debe realizarse vertiendo de modo continuo el hormigón autocompacto y enrasando la superficie superior sin aplicar ningún sistema de compactación o vibración.

2.3.4.7 Requisitos del hormigón autocompactante

2.3.4.7 A Requisitos para los componentes del HAC

Los componentes utilizados para la producción de hormigón autocompactable (HAC) en general deben de cumplir los requisitos especificados en la EN 206-1.

Los materiales deben ser los adecuados para el uso previsto en el hormigón y no pueden contener ingredientes dañinos que puedan suponer un detrimento de la calidad o durabilidad del hormigón o que puedan causar la corrosión de la armadura (www.efnarc.org). En la mayor parte de los casos los requisitos para los constituyentes son individualmente cubiertos por específicos estándares europeos. Sin embargo, con el fin de estar seguros de las prestaciones homogéneas y constantes del HAC, debemos prestar cuidados adicionales en la selección y almacenamiento de las partidas de material recibida (www.efca.info).

- **Cemento:** Los requisitos generales para el cemento deben estar conformes con EN 197-1. Éstos además están regulados por las correspondientes normas UNE y por la “Instrucción para la recepción de cementos, RC-03”. A nivel general, sabemos que los cementos se clasifican en tipos, según sus componentes y en clases, según su resistencia. Presentamos una clasificación de cementos comunes, utilizados para la realización de HAC, según tipos y clases (JIMENEZ MONTOYA, GARCÍA MESEGUER y MORÁN, 2000: pp. 10-11):

TABLA 4.1.1. Cementos comunes

Tipos	Denominación	Designación	Composición (proporción en masa ¹⁾)										Componentes minoritarios					
			Componentes principales															
			Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de sílice D ²⁾	Puzolana Natural I P	Puzolana Natural calcínada Q	Cenizas volantes silíceas V	Cenizas volantes calcareas W	Esquistos calcínados T	Caliza ³⁾ L LL							
CEM I	Cemento portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5			
CEM II	Cemento portland con escoria	CEM IIA-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5		
		CEM IIB-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IIA-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento portland con humo de sílice	CEM IIA-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IIB-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IIA-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento portland con puzolana	CEM IIB-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IIA-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IIB-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento portland con ceniza volante	CEM IIA-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IIB-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IIA-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento portland con esquistos calcínados	CEM IIB-T	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IIA-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
	Cemento portland con caliza	CEM IIB-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
		CEM IIA-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
		CEM IIB-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
	Cemento portland compuesto ⁴⁾	CEM IIA-M	80-94	← 6-20 →										-	-	0-5		
CEM IIB-M		65-79	← 21-35 →										-	-	0-5			
CEM III	Cemento con escorias de horno alto	CEM IIA	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IIB	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IIB-C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento puzolánico ³⁾	CEM IIA	65-89	-	← 11-35 →										-	-	0-5	
		CEM IIB	45-64	-	← 36-55 →										-	-	0-5	
CEM V	Cemento compuesto ³⁾	CEM IIA	40-64	18-30	-	← 18-30 →										-	-	0-5
		CEM IIB	20-38	31-50	-	← 31-50 →										-	-	0-5

1) Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios (núcleo de cemento).
 2) El porcentaje de humo de sílice está limitado al 10%.
 3) En cementos portland compuestos CEM IIA-M y CEM IIB-M, en cementos puzolánicos CEM IIA y CEM IIB y en cementos compuestos CEM IIA y CEM IIB los componentes principales diferentes del clinker deben ser declarados en la designación del cemento (véase artículo 5).
 4) El contenido de carbono orgánico total (TOC), determinado conforme al EN 13639 1999, será inferior al 0,20% en masa para calizas LL, o inferior al 0,50% en masa para calizas L.

Las prescripciones químicas que deben cumplir los cementos utilizados se incluyen en la siguiente tabla (JIMENEZ MONTOYA et al., 2000: p. 12):

TABLA 4.1.2
Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes

Clase de resistencia ⁽¹⁾	Resistencia a compresión (N/mm ²) según UNE-EN 196-1:1996 (2)				Tiempo de fraguado según UNE-EN 196-2:1996		Estabilidad de volumen según UNE-EN 196-3:1996
	Resistencia inicial		Resistencia nominal		Inicio — Minutos	Final — Horas	
	2 días	7 días	28 días				
32,5N	—	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 12	≤ 10
32,5R	≥ 10,0	—					
42,5N	≥ 10,0	—	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60		
42,5R	≥ 20,0	—					
52,5N	≥ 20,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45		
52,5R	≥ 30,0	—					

(1) R = Alta resistencia inicial.
N = Resistencia inicial normal.
(2) 1 N/mm² = 1 MPa.

Además las características físicas y mecánicas más importantes de los cementos son el fraguado, la expansión, la finura de molido y la resistencia a compresión (JIMENEZ MONTOYA et al., 2000).

En este sentido, el fraguado de un cemento viene limitado por norma estableciendo un periodo de tiempo, a partir del amasado, dentro del que debe producirse el principio y el final del fraguado (según ensayo EN 196-3). Según la instrucción española RC-03 el fraguado del cemento debe cumplir las siguientes prescripciones:

Resistencia del cemento	Principio del fraguado en minutos	Final del fraguado en horas
Muy alta	> 45	< 12
Alta, media, baja	> 60	< 12

Además, el riesgo de expansión tardía que puede tener un cemento fraguado debido a la hidratación del óxido de calcio y del óxido magnésico debe estar ajustado según el ensayo de las agujas de Le Chatelier (EN 196-3). También la finura de molido influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante su fraguado y primer endurecimiento. Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos -lo que resulta perjudicial-, el conglomerante resulta ser más susceptible a la meteorización tras un almacenamiento prolongado y disminuye su resistencia a las aguas agresivas. Sin embargo, las resistencias mecánicas aumentan con la finura, con lo que el cemento Pórtland debe estar finamente molido, pero no en exceso. La normativa no prescribe en sus pliegos la finura de molido, pero podemos expresar que lo deseable es que un cemento alcance sus debidas resistencias por razón de la calidad del clínker más bien que por razón de finura de molido.

El tipo de cemento ha de ser elegido en función de los requerimientos de resistencia y durabilidad exigidos al hormigón, además de otras condiciones generales previstas para la puesta en obra. En este sentido, se debe tener en cuenta que la resistencia mecánica de un hormigón será tanto mayor cuanto mayor sea la del cemento empleado. No obstante, ésta no es la única característica que debe buscarse para un hormigón, porque también influyen otras muy importantes en la resistencia de un hormigón como por ejemplo la relación agua/cemento, así como que no garantiza otras características fundamentales como podría ser la durabilidad.

En definitiva, para un HAC no es obligado un único tipo de cemento, pero Garrido nos recomienda un contenido de cemento entre 250 y 450 Kg/m³. Por debajo de 350 Kg/m³ se precisará incluir adiciones para aumentar el contenido en finos y por encima de 500 Kg/m³ la retracción podría alcanzar valores peligrosos (GARRIDO, 2004: p. 12).

- Áridos: Como áridos para la confección de autocompactante deberían emplearse arenas y gravas naturales o procedentes de machaqueo, que reúnan en igual o superior grado las características de resistencia y durabilidad que se le exigen al hormigón. Este punto se puede convertir en complicado en la actualidad dada la ultra-resistencia que puede conseguirse con los hormigones de altas prestaciones.

En particular, los áridos deben cumplir la norma EN 12620. Se debe tener en cuenta que los áridos rodados proporcionan hormigones más dóciles y trabajables, requiriendo además menos cantidad de agua que los de machaqueo. En este mismo sentido, los machacados confieren al hormigón fresco una cierta acritud que dificulta su puesta en obra. Los áridos machacados, que son los que generalmente encontramos en Canarias, deben además estar desprovistos del polvo de machaqueo, que supone un incremento de finos en el hormigón y mayor cantidad

de agua de amasado. La derivación final es menor resistencia mecánica, un mayor riesgo de fisuras en las primeras edades y una menor durabilidad. A este respecto, en la siguiente tabla se recoge el contenido máximo en finos prescrito por la Instrucción española EHE (JIMENEZ MONTOYA et al., 2000: p. 32):

CONTENIDO MÁXIMO DE FINOS EN EL ÁRIDO

<i>Tamaño del árido</i>	<i>Porcentaje máximo que pasa por el tamiz 0,063 mm</i>	<i>Tipo de árido y ambiente</i>
<i>Árido grueso</i>	1 %	Tipo 1: <ul style="list-style-type: none"> • Áridos redondeados • Áridos de machaqueo no calizos
	2 %	Tipo 2: <ul style="list-style-type: none"> • Áridos de machaqueo calizos
<i>Árido fino</i>	6 %	Tipo 3: <ul style="list-style-type: none"> • Áridos redondeados • Áridos de machaqueo no calizos para estructuras marinas o en contacto con agua de elevado contenido en cloruros
	10 %	Tipo 4: <ul style="list-style-type: none"> • Áridos de machaqueo calizos para estructuras marinas o en contacto con agua de elevado contenido en cloruros • Áridos de machaqueo no calizos para estructuras en ambiente normal
	15 %	Tipo 5: <ul style="list-style-type: none"> • Áridos de machaqueo calizos para estructuras en ambiente normal

Además los áridos deben cumplir unas condiciones físico-mecánicas como una absorción de agua no superior al 5% (norma UNE 83.133:90 Y 83.134:90); una friabilidad de la arena inferior a 40 (UNE EN 1097-1:97) y una resistencia al desgaste de la grava no superior a 40 (UNE EN 1097-2:98).

El contenido de árido grueso debe ser menor con relación a los hormigones convencionales. El tamaño máximo de los áridos depende de cada aplicación particular y puede limitarse, preferiblemente, a 25 mm (según UNI 11040) o incluso

a los 20 mm, siendo más usual el empleo de tamaños máximos comprendidos entre los 12 y los 16 mm (según GARRIDO ROMERO, 2004). Para todas las fracciones de árido utilizado deben ser definidas las características geométricas -granulometría y coeficiente de forma- y la naturaleza -rodado o triturado- (UNI 11040, 2003).

La arena es el árido de mayor responsabilidad. Se puede decir que no es posible hacer un buen hormigón sin una buena arena. Las mejores arenas son las de río. Las arenas de mina suelen tener arcilla en exceso por lo que generalmente es preciso lavarlas. Las arenas de mar limpias podrían emplearse -desde el punto de vista técnico que no normativo- también para hormigón armado, siempre con un garantizado lavado previo con agua dulce (JIMENEZ MONTOYA et al., 2000: p. 31).

En concreto para Canarias, las arenas provenientes del machaqueo del basalto y rocas análogas podrían ser buenas siempre que se trate de rocas sanas y no acusen un principio de descomposición. Otras opciones que representan las arenas de procedencia caliza son de calidad muy variable. Estas últimas siempre resultan más absorbentes de agua.

En particular, las arenas y gravas no deben contener sustancias perjudiciales para el hormigón. La Instrucción española limita en su uso a los valores indicados en la siguiente tabla (JIMENEZ MONTOYA et al., 2000: p. 34):

ENSAYOS DE LA ARENA (A) Y DE LA GRAVA (G) CUYA REALIZACIÓN ES SIEMPRE OBLIGATORIA

<i>Determinación</i>	<i>Limitación impuesta por la Instrucción española</i>	<i>Riesgos que se corren si no se cumple la limitación</i>	<i>Observaciones</i>
Terrones de arcilla, según método de ensayo UNE 7133:58	MÁXIMO A: 1 por 100 G: 0,25 por 100 del peso total de la muestra	– hormigón poco resistente – coqueas interiores y oquedades en las superficies	– se entiende por terrones las partículas que se deshacen bajo la presión de los dedos – suelen existir en las arenas de mina – especialmente peligrosos en medios agresivos
Finos que pasan por el tamiz 0,063 mm (UNE EN 933-2:96)	VER TABLA 2.2	– falta de adherencia pasta-árido – hormigón fisurable por retracción – hormigón poco resistente	– los finos son más peligrosos con áridos rodados que con áridos procedentes de machaqueo – los finos incluyen limos, arcillas, sales solubles y otras impurezas
Material retenido por el tamiz 0,063 mm y que flota en un líquido de peso específico 2, según método de ensayo UNE 7244:71	MÁXIMO A: 0,5 por 100 G: 1 por 100 del peso total de la muestra	– anomalías en el fraguado – coqueas – hormigón poco resistente	– se refiere a partículas de carbón, madera, materias vegetales, etc. Deben prohibirse totalmente – no es corriente encontrar áridos que incumplan este ensayo
Compuestos totales de azufre expresados en SO ₃ y referidos al árido seco (UNE EN 1744-1:98)	MÁXIMO A: 1,0 por 100 G: 1,0 por 100 del peso total de la muestra	– alteraciones en el fraguado y endurecimiento – pérdidas de resistencia – gran disminución de la durabilidad	– suelen provenir de sulfatos (yeso, anhídrita) o de sulfuros (piritas) – atención al contenido en sulfatos del cemento y del agua, cuando se está cerca del límite
Sulfatos solubles en ácidos expresados en SO ₃ y referidos al árido seco (UNE EN 1744-1:98)	MÁXIMO A: 0,8 por 100 G: 0,8 por 100 del peso total de la muestra	– ataques al hormigón – procesos expansivos que destruyen el hormigón	– puede protegerse el hormigón utilizando un cemento resistente a los sulfatos – conviene asegurar un grado suficiente de impermeabilidad
Sustancias que reaccionan perjudicialmente con los álcalis del cemento	A y G deben estar EXENTAS de tales sustancias	Procesos fuertemente expansivos que destruyen el hormigón	– puede darse con ciertos áridos silíceos de naturaleza opalina o similar – es raro encontrar áridos que no cumplan el ensayo correspondiente
Cloruros expresados en Cl y referidos al árido seco	MÁXIMO A: 0,05 por 100 G: 0,05 por 100	Corrosión de las armaduras	En hormigón pretensado el límite se rebaja a 0,03 por 100
Partículas blandas, determinadas según UNE 7134:58	MÁXIMO G: 5 por 100 del peso total de la muestra	Hormigón poco resistente	– el ensayo mide la resistencia de los granos de la grava al rayado con latón – se detectan también las partículas duras aglomeradas débilmente (ciertas areniscas)
Coefficiente de forma de la grava, determinado según UNE 7238:71	MÍNIMO G: 0,20	– hormigón poco trabajable y de difícil compactación – escasa resistencia y compacidad	Se admiten valores inferiores, previos ensayos de comprobación del hormigón en laboratorio
Índice de lajas de la grava, determinado según UNE EN 933-3:97	MÁXIMO G: 35	– hormigón poco trabajable y de difícil compactación – escasa resistencia y compacidad	Se admiten valores superiores, previos ensayos de comprobación del hormigón en laboratorio

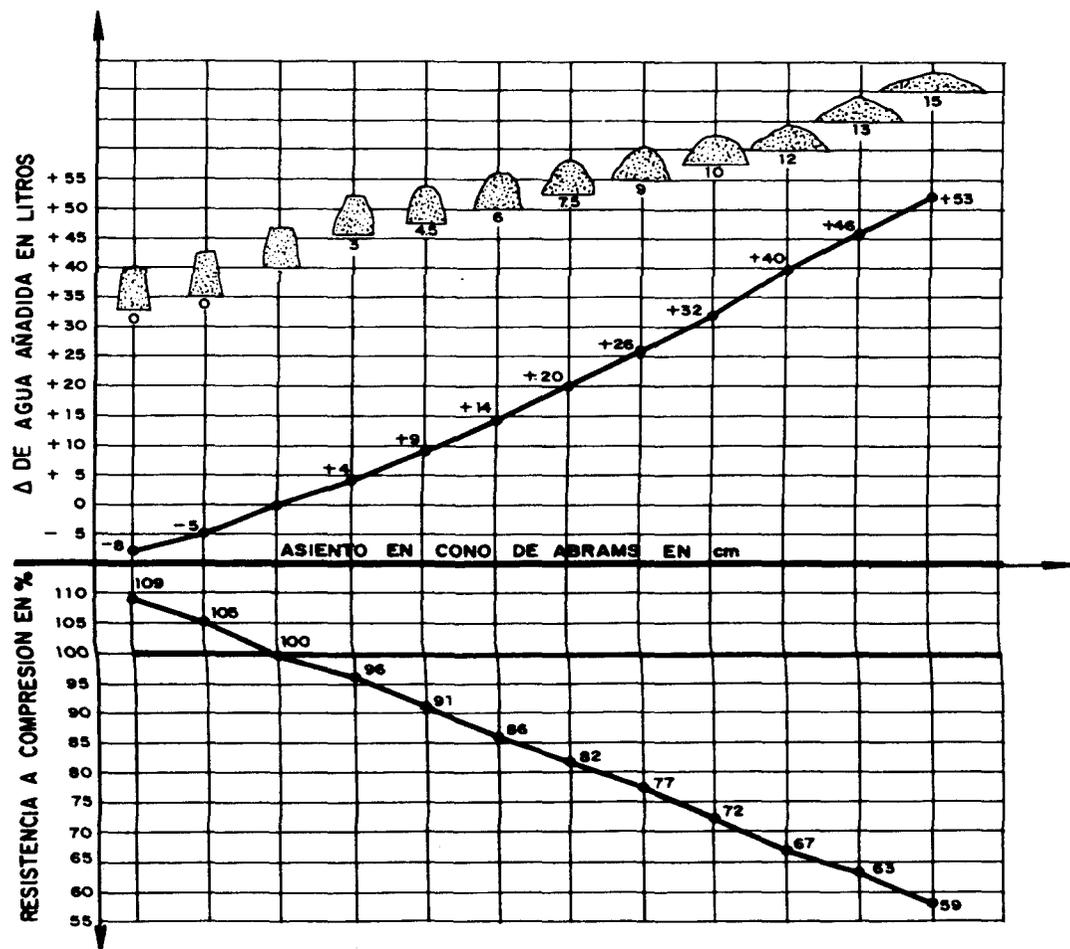
La distribución de los distintos tamaños de los granos que componen un árido tiene una importancia decisiva en las características del hormigón. El estudio de dicha distribución lo efectuamos mediante la curva granulométrica, que se determina cribando el árido a través de la serie normalizada de tamices. Actualmente el tamaño límite entre el árido grueso y el árido fino se encuentra en 4 mm. De esta manera, la serie estándar de tamaños del árido fino es 4-2-1-0,5-0,25-0,125-0,063 mm. De igual manera, la serie de tamaños de árido grueso es la 4-8-16-31,5-63-125 mm; teniendo en cuenta que la Instrucción española EHE añade los tamaños de 10-20-40 mm.

Los áridos empleados en la preparación de un hormigón se obtienen, normalmente mezclando arenas y gravas en proporciones adecuadas. No es posible establecer una curva granulométrica óptima única debido a los diversos factores de prestaciones del hormigón; de transporte y puesta en obra; de las propiedades y forma de los granos; el tipo y dimensiones del elemento estructural; etc... (JIMENEZ MONTOYA et al., 2000: p. 33). Conocemos que existen diferentes métodos de curvas adecuadas a cada caso. Ejemplos de curvas como la parábola de Fuller, la parábola de Bolomey, el módulo granulométrico o el dominio granulométrico tienen cada uno su propio campo de aplicación. Para Canarias y referentes a hormigones convencionales se ha demostrado el adecuado modelo de la parábola de Bolomey para seleccionar nuestra dosificación (GUIGOU, 1999). Para confeccionar hormigones que presenten la autocompacidad como característica fundamental incluso estos métodos resultan inadecuados, debiendo aplicar dosificaciones con una base esencialmente empírica (GARRIDO, 2004: p. 25).

A la hora de confeccionar una dosificación de HAC, las partículas con un tamaño inferior a 0,125 mm contribuyen al contenido de finos. Es imprescindible considerar la humedad de la arena de manera meticulosa a la hora de la

dosificación de los hormigones. El contenido de humedad debe monitorizarse con atención y tenerse en cuenta para producir un HAC de calidad constante (www.efnarc.org).

- Agua de amasado: Como sabemos, el agua de amasado participa en las reacciones de hidratación del cemento, además de conferir al hormigón de la trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra. Sin embargo, la cantidad de agua debe limitarse al mínimo estrictamente necesario, ya que todo exceso se evapora y crea unos capilares que disminuirán su resistencia y durabilidad. Sin tener en cuenta la añadidura de aditivo, la siguiente figura muestra la docilidad de la masa frente a la pérdida de resistencia (JIMENEZ MONTOYA et al., 2000: p. 28):



Por otra parte, el agua para el curado durante el proceso de fraguado y primer endurecimiento del hormigón, tiene por objeto evitar la desecación, mejorar la hidratación del cemento e impedir una retracción prematura.

En la norma EN 1008 se establece la idoneidad para el agua de amasado y el agua reciclada para la producción de hormigón. Además la EHE impone unas limitaciones incluidas en el siguiente gráfico (JIMENEZ MONTOYA et al., 2000: p. 30):

ANÁLISIS DEL AGUA DE AMASADO Y CURADO

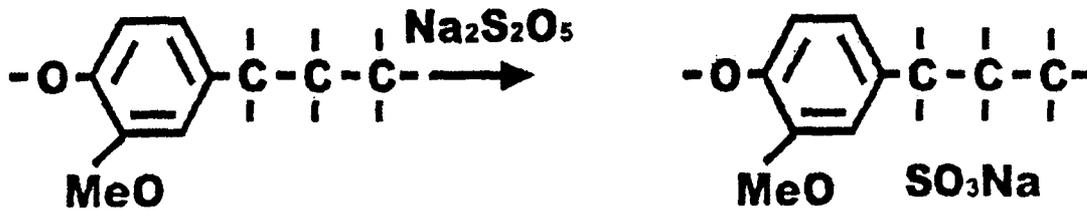
<i>Determinación</i>	<i>Limitación impuesta por la Instrucción española</i>	<i>Riesgos que se corren si no se cumple la limitación</i>	<i>Observaciones</i>
pH	MÍNIMO 5	<ul style="list-style-type: none"> - alteraciones en el fraguado y endurecimiento. - disminución de resistencias y de durabilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - la Norma soviética admite hasta un pH igual a 4. - con cemento aluminoso no deben usarse aguas de pH superior a 8.
Sustancias disueltas totales	MÁXIMO 15 gramos por litro	<ul style="list-style-type: none"> - aparición de eflorescencias u otro tipo de manchas. - pérdida de resistencias mecánicas. - fenómenos expansivos a largo plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> - por sustancias disueltas se entiende el residuo salino seco que se obtiene por evaporación del agua. - en zonas sujetas a fluctuaciones de nivel de agua, conviene rebajar el límite a 5 gramos por litro.
Contenido en sulfatos, expresados en ión SO ₄	MÁXIMO 1 gramo por litro	<ul style="list-style-type: none"> - alteraciones en el fraguado y endurecimiento; pérdidas de resistencia. - puede resultar gravemente afectada la durabilidad del hormigón. 	<ul style="list-style-type: none"> - con cemento SR puede llegarse a 5 g/l. - la Norma soviética admite hasta 2,7 g/l con portland normal y 10 g/l con SR. - atención al contenido en sulfatos del cemento y los áridos, cuando se está cerca del límite. - se debe ser más estricto con el agua de curado.
Contenido en ión cloro	MÁXIMO 3 gramos por litro	<ul style="list-style-type: none"> - corrosión de armaduras u otros elementos metálicos. - otras alteraciones del hormigón. 	<ul style="list-style-type: none"> - para hormigón en masa puede elevarse el límite de tres a cuatro veces. - para hormigón pretensado debe rebajarse el límite a 1 gramo por litro.
Hidratos de carbono	No deben apreciarse	<ul style="list-style-type: none"> - el hormigón no fragua. - otras alteraciones en el fraguado y endurecimiento. 	La sacarosa, glucosa y sustancias análogas alteran profundamente el mecanismo de fraguado de los cementos.
Sustancias orgánicas solubles en éter	MÁXIMO 15 gramos por litro	<ul style="list-style-type: none"> - graves alteraciones en el fraguado y/o endurecimiento. - fuertes caídas de resistencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - el ensayo pone de manifiesto la presencia de aceites y grasas de cualquier origen, humus y otras sustancias orgánicas vegetales, que muestran una interacción con la cal liberada del cemento. - atención a la materia orgánica de la arena, cuando se está cerca del límite.

- Aditivos: Se llaman aditivos a aquellos productos que se incorporan al hormigón fresco con objeto de mejorar alguna de sus características (facilitar su puesta en obra, regular su proceso de fraguado y endurecimiento, aumentar su durabilidad...). Por su importancia creciente han sido denominados el cuarto componente del hormigón (JIMENEZ MONTOYA et al., 2000).

Existen multitud de aditivos como los aceleradores, retardadores, plastificantes, aireantes, impermeabilizantes, etc., que con una dosificación inferior al 5% del peso del cemento, requieren un cuidado estricto, pues podría influir en el hormigón de forma indeseable. La designación de los aditivos y su definición figura en la Norma UNE EN 934-2:98. A continuación trataremos en esta tesis principalmente los aditivos superfluidificantes, también explicaremos los aspectos fundamentales de plastificantes y fluidificantes por ser antecedentes directos. Por otra parte, reseñaremos los aditivos modificadores de la viscosidad -VEA- en cuanto que pueden ser un elemento muy útil para conseguir homogeneidad.

Los Aditivos plastificantes y fluidificantes son aditivos que aumentan la docilidad y trabajabilidad del hormigón. Esto permite emplear masas que de otra manera sería casi imposible colocar en obra, o bien reducir el agua de amasado en beneficio de resistencia y durabilidad del hormigón convencional. Los plastificantes, como por ejemplo la bentonita, cales grasas o cenizas volantes, se presentan a base de polvos muy finos que completan la granulometría de la pasta y facilitan el deslizamiento de los granos en el mortero, haciendo las mezclas más trabajables. Los lignosulfatos, que se obtienen en el proceso de la extracción de la celulosa de la madera para la industria del papel, permiten reducir el agua en el hormigón como máximo un 10% o conseguir, a igual relación agua/cemento, un aumento de la fluidez (DOMÍNGUEZ, 2003-a: pp.9-10), (DOMÍNGUEZ, 2003-b: pp.68-70) y (DOMÍNGUEZ, 2003-c: pp.139-142). Su uso para los hormigones autocompactos no es necesario puesto que existen los superfluidificantes.

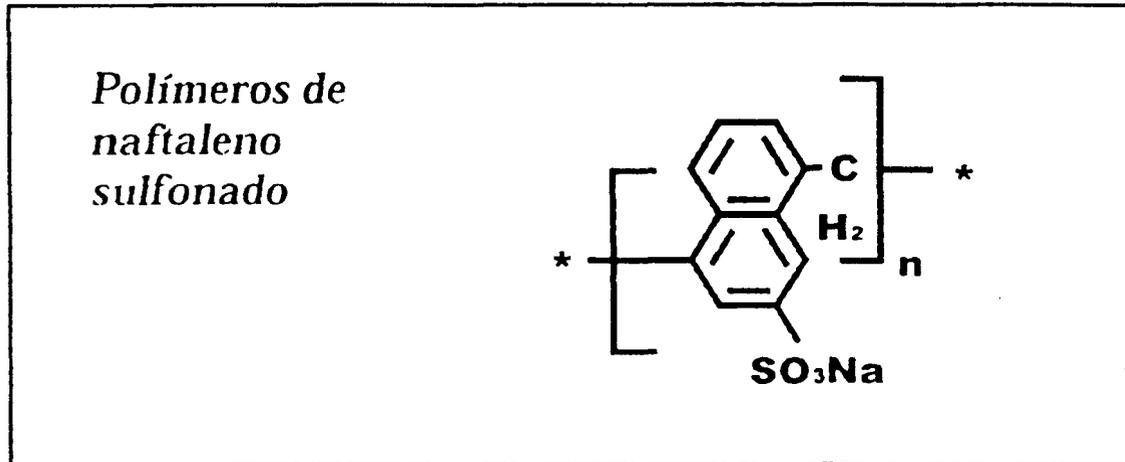
Lignosulfonatos



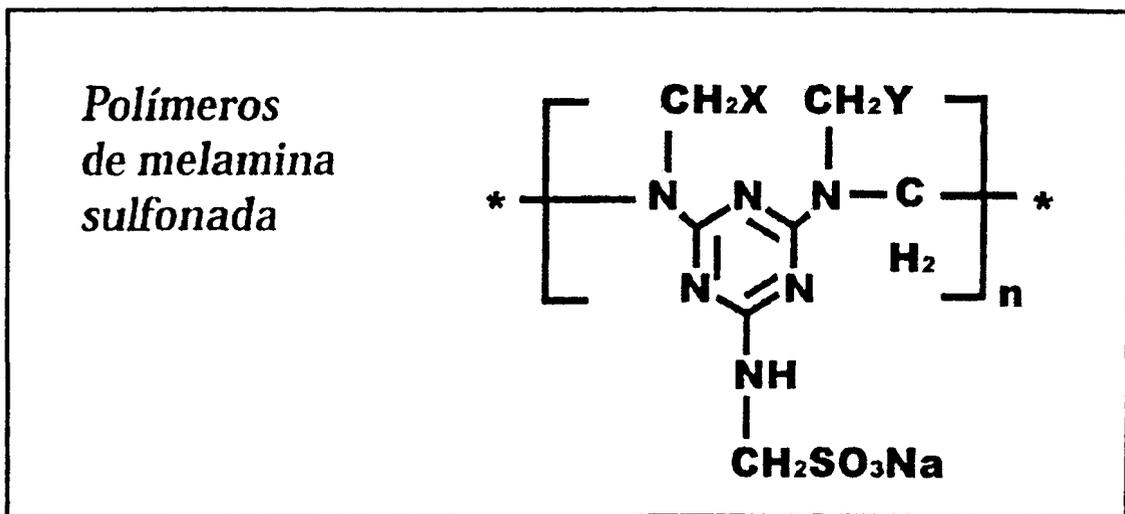
Lignosulfonatos

Los aditivos superplastificantes son un componente esencial del HAC para obtener la suficiente fluidez. Inicialmente, en los años sesenta, se desarrollaron los Naftalenos-Sulfonatos y los condensados de Melamina-Sulfonato con la misma idea de mejorar la fluidez del hormigón sin variar la relación agua/cemento. Domínguez reconoce la revolución de los superfluidificantes en el hormigón, los cuales permiten confeccionar altas resistencias y altas prestaciones impensables sin su presencia (DOMÍNGUEZ, 2003-a), (DOMÍNGUEZ, 2003-b) y (DOMÍNGUEZ, 2003-c). Los Naftalenos son productos resultantes del proceso del refinado del carbón, mientras que los condensados de Melaminas están basados en polímeros sintéticos. Ambos tienen una reducción similar de agua del 20% en el amasado del hormigón, le confieren una buena manejabilidad al mismo y las resistencias mejoran en general con respecto al HC. Sin embargo, estos superfluidificantes han tenido un efecto negativo principal como que la pérdida de trabajabilidad del hormigón es demasiado rápida. Hasta ahora para resolver esta problemática se ha venido asociando un superfluidificante (Naftaleno o Melamina) con un retardador de fraguado (DIEGUEZ, 1999: pp. 48-49). Este método de aditivación raramente

satisfacía las exigencias de largo mantenimiento de trabajabilidad y altas resistencias en edades tempranas. Todo ello ha llevado a los investigadores al empleo de nuevas moléculas superfluidificantes (DOMÍNGUEZ, 2003-a: pp. 10-11):



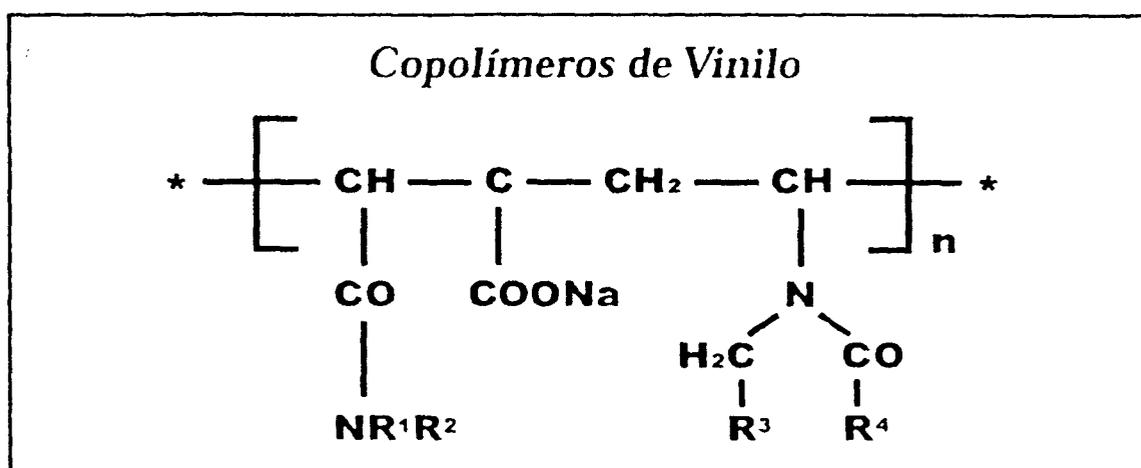
Polimeros de naftaleno sulfonado



Polímeros de melamina sulfonada

Los copolímeros de vinilo son polímeros sintéticos que poseen moléculas de mayor tamaño que los anteriores, proporcionando un efecto plastificante superior. Proporcionan una mayor reducción de agua –aproximadamente del 30%- y

confieren al hormigón un mayor tiempo de manejabilidad que la de melaminas o naftalenos. Estos copolímeros de vinilo han sido utilizados en diversos ensayos de laboratorio para confeccionar HAC, bien solos o con aditivos viscosantes o espesantes, con buenos resultados (DOMÍNGUEZ, 2003-a), (DOMÍNGUEZ, 2003-b) y (DOMÍNGUEZ, 2003-c). Esta idea se contrasta con la que expone García San Martín y Borralleras cuando escriben que los únicos aditivos superfluidificantes imprescindibles para la confección de HAC son los basados en éter policarboxílico modificado, capaces de reducir agua en valores superiores al 35% (GARCÍA SAN MARTÍN y BORRALLERAS, 2001: p.58). Independientemente de estas opiniones, no cabe duda en la actualidad que los policarboxilatos son esenciales en la ejecución de HAC. Gettu y Agulló lo dejan claro cuando exponen que los copolímeros en general y los policarboxilatos en particular parecen ser los más adecuados para el autocompactante por su mayor efectividad (GETTU y AGULLÓ, 2004: p. 55). El siguiente gráfico nos expone la disposición de estas moléculas (DOMÍNGUEZ, 2003-a: p. 11):



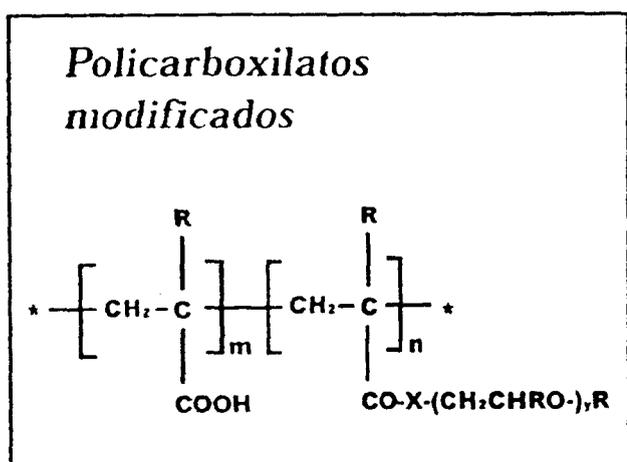
Copolímeros de Vinilo

Los policarboxilatos modificados en base acuosa se basan químicamente en copolímeros y grupos éter de ácido acrílico. Mientras que los fluidificantes a base de melaminas y naftalenos se basan en un efecto de dispersión de las partículas del

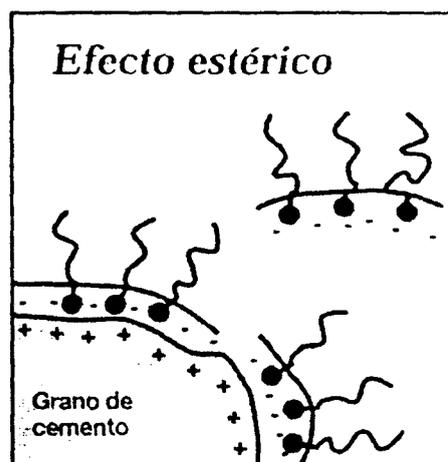
cemento, conseguida porque la molécula del aditivo tiene una estructura de dipolo con grupos cargados negativamente. Esas moléculas se absorben por los gránulos del cemento y los dota de carga negativa, haciendo que los mismos se repelan entre sí. El efecto de repulsión electrostática disminuye progresivamente al depositarse sucesivas capas de productos de hidratación en la superficie del grano de cemento, lo que conlleva a una pérdida de fluidez y trabajabilidad.

Los nuevos aditivos, basados en éteres policarboxílicos, basan su efecto dispersante en importantes cadenas laterales y, mucho menos, en la pura repulsión electrostática. Estas largas cadenas laterales crecen más allá de los productos de hidratación del cemento formados, proporcionando una mayor dispersión física real. Estas cadenas laterales son responsables del efecto estérico donde, posteriormente, una segunda molécula se activa y así se logra una actividad más duradera en el tiempo (DOMÍNGUEZ, 2003-a), (DOMÍNGUEZ, 2003-b) y (DOMÍNGUEZ, 2003-c).

Esta última generación de aditivos superfluidificantes de policarboxilatos es la que está permitiendo confeccionar HAC. El efecto reductor de agua puede alcanzar hasta el 40% -hasta un 35% según Garrido Romero (2004: p. 25). Podemos afirmar que estos aditivos superfluidificantes son casi imprescindibles para la preparación de un hormigón autocompactante, para aumentar la fluidez y reducir el agua de amasado (DOMÍNGUEZ, 2003-a: p. 12):



Policarboxilatos modificados



Efecto estérico

Según sea preciso, pueden incorporarse otros tipos, como Agentes Modificadores de la Viscosidad -VEA- para la estabilidad, aditivos inclusores de aire para mejorar la resistencia a los ciclos hielo-deshielo, retardadores de fraguado, etc. Los aditivos viscosantes o espesantes pueden dotar al hormigón fluido de cohesión interna sin pérdida de fluidez y evitan la segregación. Se trata de productos que ya existían como la celulosa modificada, almidón modificado, sílices o arcillas o polímeros sintéticos de alto peso molecular... y que aquí han encontrado una nueva aplicación y desarrollo. En estos momentos se continúa con el desarrollo de las diferentes industrias e investigaciones en el sentido de buscar otras alternativas (DOMÍNGUEZ, 2003-a), (DOMÍNGUEZ, 2003-b) y (DOMÍNGUEZ, 2003-c).

- Adiciones (incluyendo pigmentos y fillers minerales): Para obtener la adecuada viscosidad y cohesión del hormigón fresco que evite la segregación y disminuya el rozamiento entre los áridos gruesos, son necesarias altas dosis de finos, esto es, de partículas de diámetro inferior a 125µm. Estas dosis serán tanto mayor cuanto mayor sea el tamaño del árido empleado en la mezcla. Además del cemento y la propia aportación de la arena, los finos estarán constituidos por adiciones, ya sean puzolánicas o de hidraulicidad latente -escoria de alto horno,

cenizas volantes y humo de sílice- y/o finos inertes -filler calizo o pigmentos minerales- (GARRIDO, 2004).

Tanto las adiciones inertes como las activas se emplean para mejorar la trabajabilidad y reducir el contenido de cemento, con lo que se disminuye también el calor de hidratación. En general, el contenido total de finos se sitúa entre 450 y 600 Kg/m³ (o lo que es lo mismo de 180 a 240 lts/m³), precisándose humo de sílice sólo para resistencias características superiores a los 70 MPa. Por debajo de este valor las cenizas volantes ofrecen buenos resultados aunque son susceptibles de provocar manchas negras en la superficie del hormigón.

Las más recomendables para prefabricación y para cualquier uso que demande altas resistencias iniciales son las de filler calizo o las arenas correctoras con un cernido por el tamiz 0,063 superior a un 10%. Por otra parte, el filler de dolomita puede afectar a la durabilidad debido a las reacciones alcalinas.

En cualquier caso, no hay que olvidar que la instrucción EHE limita el uso de adiciones directas al hormigón, permitiendo como tales tan sólo las cenizas volantes y el humo de sílice, y siempre empleando CEM I. Esta circunstancia hace que para poder emplear adiciones calizas deba recurrirse necesariamente a cementos tipo CEM II y supeditarse a los porcentajes que dichos cementos incorporan (máximo un 35% de adición) -según *Instrucción de Hormigón Estructural*. EHE-. En este sentido y para futuras normativas, es recomendable una revisión de una posibilidad mayor de adicionar para adaptarnos en el uso de hormigones de altas prestaciones.

En general, se establece la idoneidad general como la adición de Tipo I (inerte) para:

- Filler mineral conforme con EN 12620.
- Pigmentos minerales conformes con EN 12878.

Se establece la idoneidad general como la adición de Tipo II (hidráulica latente o puzolánica) para:

- Cenizas volantes conformes con EN 12620.
- Humo de sílice (microsílice) conforme con EN 13263.
- Escoria granulada (pulverizada) de alto horno conforme con BS 6699.

Las adiciones más frecuentes con hormigones autocompactos son las siguientes:

I. Filler de machaqueo: Piedra caliza, dolomita o granítica triturada fina que puede utilizarse para aumentar la cantidad de finos (polvo): la fracción menor de 0,125 mm es la más provechosa.

II. Cenizas volantes: Las cenizas volantes son un material inorgánico fino con propiedades puzolánicas, que pueden añadirse al HAC para mejorar sus propiedades.

III. Microsílice: La microsílice (o humo de sílice) ofrece una mejora importante de las propiedades reológicas así como también de las propiedades químicas y mecánicas.

IV. Escoria pulverizada (granulada) de alto horno: Esta escoria es un material aglomerante hidráulico básicamente latente y granulado fino, que también puede añadirse al HAC para mejorar las propiedades reológicas.

V. Relleno de vidrio pulverizado: Este relleno suele obtenerse pulverizando vidrio reciclado. El tamaño de partícula debe ser inferior a 0,1 mm y el área de superficies específica debe ser de ~2500 cm²/g.

VI. Pigmentos: La idoneidad de los pigmentos utilizados en HAC se establece en EN 12878.

2.3.4.7 B Requisitos para el hormigón autocompactante

- Área de aplicación: Ya hemos descrito algunos ejemplos de sus realizaciones más notorias y los posibles campos de aplicación. Por otra parte debemos precisar los modos de ejecución y en este sentido detallamos los siguientes puntos para el HAC:

- Puede utilizarse en prefabricación, en obra civil y en edificación.
- Puede fabricarse en planta dosificadora en obra o en planta amasadora y ser transportado a obra en camiones.
- Puede aplicarse por bombeo o bien por vertido en estructuras horizontales o verticales.

Al diseñar la mezcla es preciso tener en cuenta el tamaño el volumen y la forma de la estructura, la dimensión y densidad del armado. Todos estos aspectos influyen en los requisitos específicos del HAC. Debido a las características de fluidez del HAC puede ser difícil su puesta en obra a no ser que se delimite mediante un encofrado totalmente estanco. El HAC ha permitido ejecutar estructuras de hormigón de una calidad imposible con la tecnología del hormigón preexistente. Para esto, debe primar una exactitud y control de todos los componentes y procedimientos.

- Requisitos: El HAC podría diseñarse como mínimo para cumplir los requisitos de EN 206 relativos a la densidad, desarrollo de resistencia, resistencia final y durabilidad. No obstante, la consistencia del HAC es superior a la consistencia más elevada descrita en EN 206. Debido al alto contenido en finos, el HAC podría presentar una retracción superior a la de las mezclas ordinarias de hormigón, lo que se debe tener en cuenta durante el diseño y la especificación del HAC.

Los hormigones autocompactos se distinguen de los hormigones ordinarios porque deben cumplir los siguientes requisitos (UNI 11040, 2003):

- Fluidez en ausencia de impedimentos.
- Capacidad de atravesar los obstáculos.
- Resistencia a la segregación.

Una mezcla de hormigón sólo puede clasificarse como autocompactante si se cumplen los requisitos para estas tres características.

La siguiente tabla recoge los valores límites de aceptación para las principales características de los hormigones autocompactos en estado fresco según esta normativa italiana, que nos sirve de referencia.

Característica	Intervalo de aceptación	Método de ensayo	Ensayo de laboratorio	Ensayo de obra
Fluidez	>600 mm	<u>UNI 11041</u>	Sí	sí
Tiempo de esparcimiento, para alcanzar el diámetro de 500 mm	≤12 s	<u>UNI 11041</u>	Sí	sí
Deformabilidad (tiempo de salida del embudo en V)	(4 ÷ 12) s	<u>UNI 11042</u>	Sí	sí
Escurrecimiento por confinamiento (a través del anillo en J)	$\Delta\Phi \leq 50$ mm con respecto a la fluidez sin anillo	UNI 11045	Sí	sí
Escurrecimiento por confinamiento (caja L)	$H2/h 1 > 0,80$	<u>UNI 11043</u>	Sí	no
Escurrecimiento por confinamiento (caja U)	$\Delta h \leq 30$ mm	<u>UNI 11044</u>	Sí	no
Estabilidad a la sedimentación (embudo en V después de 5 min.)	Valor inicial +3s	<u>UNI 11042</u>	Sí	sí

- **Fluidez:** se expresa en términos de esparcimiento realizado mediante el ensayo UNI 11041.

- **Escurecimiento confinado:** es experimentalmente valorable a través del ensayo con la caja en L, UNI 11043, con la caja en U, UNI 11044, o con el anillo en J, UNI 11045.

- **Resistencia a la segregación:** es valorada visualmente en el curso del ensayo de esparcimiento analizando que:

- Las partículas de árido grueso no se concentran en el centro sino que se distribuyan uniformemente dentro del área de expansión del hormigón.

- No se observa presencia de agua o exceso de pasta en el borde del hormigón.

- **Estabilidad a la sedimentación:** es determinada midiendo la variación del tiempo de flujo del embudo después de 5 min. de reposo con el procedimiento le descrito en la UNI 11042.

- **Tiempo de utilización, resistencia inicial:** el tiempo de utilización del hormigón autocompacto debe ser establecido siguiendo las indicaciones de la UNI 7123. Una valoración experimental del tiempo de utilización a partir de la curva de endurecimiento del hormigón en las condiciones de puesta en obra puede ser necesaria para programar la velocidad de descarga y los tiempos de vertido. La resistencia inicial del hormigón autocompacto puede ser valorada en términos de resistencia a la compresión determinada previo mantenimiento durante 24 h en las condiciones de puesta en obra del hormigón.

- **Resistencia a la compresión:** la resistencia a compresión a 28 días debe ser determinada según la UNI EN 12390-3 sobre probetas fabricadas según la UNI EN 12390-2. Las probetas deberán tener las características dimensionales definidas en la UNI EN 12390-1 y tienen que ser curadas en condiciones normalizadas.

• **Métodos de ensayo:** Se han desarrollado muchos métodos de ensayo distintos para intentar caracterizar las propiedades del HAC y cumplir con los requisitos citados. Hasta el momento no hay un único método o combinación de métodos que haya obtenido una aprobación universal y cada uno de ellos tiene sus partidarios. De igual manera, no se ha hallado un método único para caracterizar todos los aspectos de trabajabilidad relevantes, de modo que cada diseño de mezcla deberá contrastarse con más de un método de ensayo para los distintos parámetros de docilidad.

En la siguiente tabla se presenta la lista de métodos de ensayo de referencia (www.efnarc.org):

<u>Método</u>	<u>Propiedad</u>
1 Ensayo de flujo de asentamiento con cono Abrams	Capacidad de relleno
2 Flujo de asentamiento T 50 cm	Capacidad de relleno
3 Anillo J	Capacidad de paso
4 Embudo V	Capacidad de relleno
5 Embudo V a T 5 minutos	Resistencia a segregación
6 Caja en L	Capacidad de paso
7 Caja en U	Capacidad de paso
8 Caja de relleno	Capacidad de paso
9 Ensayo de estabilidad GTM	Resistencia a segregación
10 Orimet	Capacidad de relleno

Lista de métodos de ensayo para las propiedades de trabajabilidad del HAC

Es preciso evaluar los tres parámetros de trabajabilidad en el diseño inicial de la mezcla de HAC para garantizar que se satisfacen todos los aspectos. Debe

emplearse un ensayo a escala completa para verificar las características autocompactantes del diseño elegido para una aplicación concreta.

En cuanto al control de calidad en la obra, dos métodos de ensayo suelen bastar para monitorizar la calidad de producción. Las combinaciones más frecuentes son las de flujo de asentamiento con cono de Abrams y embudo V o flujo de asentamiento y anillo J.

Con una calidad constante de las materias primas, puede bastar un único método de ensayo aplicado por un técnico especializado y experimentado. A continuación se presenta la evaluación de los distintos parámetros (www.efnarc.org):

<u>Propiedad</u>	Métodos de Laboratorio (diseño de mezcla)	Métodos de obra (Control de Calidad)
<u>Capacidad de relleno o fluidez</u>	- flujo de asentamiento - flujo asentamiento T50cm - Embudo V - Orimet	- flujo de asentamiento - flujo asentamiento T50cm - Embudo V - Orimet
<u>Capacidad de paso</u>	- Caja en L - Caja en U - Caja de relleno	- Anillo J
<u>Resistencia a la segregación</u>	- Ensayo GTM - Embudo V a T5 minutos	- Ensayo GTM - Embudo V a T5 minutos
Propiedades de trabajabilidad del HAC y métodos de ensayo alternativos		

• Criterios de trabajabilidad para el HAC en estado fresco: Estos tres requisitos imprescindibles de autocompactación deben cumplirse hasta el momento de la

ejecución. En la producción hay que tomar en consideración los cambios probables en la trabajabilidad durante el tiempo de transporte. Los criterios de aceptación habituales para el hormigón autocompactante con un tamaño máximo de áridos de hasta 20 mm se presentan en la Tabla 3 según la EFNARC (www.efnarc.org):

Método	Unidad	Margen habitual de valores	
		Mínimo	Máximo
1 Flujo asentamiento por cono	mm	650	800
2 Flujo de asentamiento T50 mm	segundos	2	5
3 Anillo J	mm	0	10
4 Embudo V	segundos	6	12
5 Embudo V a T5 min	segundos	0	3
6 Caja en L	(h2/h1)	0,8	1,0
7 Caja en U	(h2-h1)	0	30
8 Caja de relleno	%	90	100
9 Ensayo de estabilidad GTM	%	0	15
10 Orimet	segundos	0	5

Criterios de aceptación para el hormigón autocompactante

Estos requisitos habituales contrastados respecto a cada modelo de ensayo se basan en el conocimiento y la práctica actuales. No obstante, el futuro desarrollo

puede conducir a la adopción de requisitos distintos aunque con esta base general. De momento nuestro equipo de investigación ha decidido acometer como criterio el que marca la normativa italiana UNI 11040 - MARZO 2003 y con referencia directa al reseñado por la EFNARC.

No obstante, se destaca en la segunda referencia que los valores que se encuentran fuera de estos márgenes pueden ser aceptables si el productor puede demostrar un rendimiento satisfactorio en sus condiciones específicas, por ejemplo, grandes espacios entre la armadura, espesor de capa inferior a 500 mm, distancia breve de flujo desde el punto de descarga, muy pocas obstrucciones en el encofrado, diseño de encofrado muy simple, etc. Siempre deben tomarse precauciones especiales para garantizar que no se produzca una segregación de la mezcla puesto que en la actualidad no existe un ensayo sencillo y fiable que ofrezca esta información respecto a la resistencia a la segregación del HAC en todas las situaciones prácticas.

Posteriormente analizaremos en profundidad cada uno de los ensayos que nuestro equipo de investigación ha considerado realizar para comprobar la idoneidad de nuestro hormigón autocompactante con áridos canarios.

2.3.4.8 Composición de la mezcla

Las dosificaciones de los distintos componentes que entran a formar parte de un H.A.C. deben ser cuidadosamente estudiadas para poder realizar un hormigón de elevada consistencia y una cohesividad que atraviese un denso armado sin bloqueo del árido grueso y que sea compatible con la ausencia de segregación. Estas determinaciones apuntadas también por la Federación Europea de Asociaciones Comerciales de Fabricantes y Distribuidores de Productos de Hormigón específicos para la Construcción -EFNARC- son generales en tanto que lo que explican es que la dosificación debe llevarnos a cumplir los requisitos.

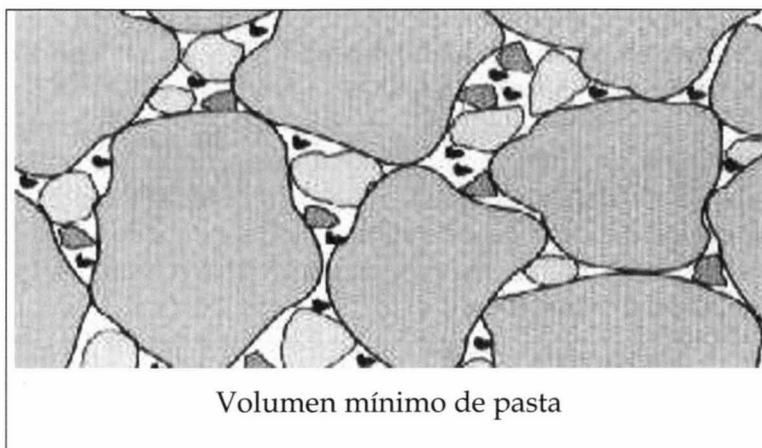
Se puede partir de unos criterios de construcción por la demanda especial que existe para cada proyecto, pero como pauta se debe tomar en consideración las solicitudes generales de posibilidad de trabajabilidad, la relación agua-cemento, la resistencia a la compresión, la separación entre armaduras, la impermeabilidad, etc. que son los requerimientos específicos que nos encontramos en todos los proyectos.

Este apartado en el estado del arte pretende ser básico y punto de partida del experimento. Haremos acopio de todas las reflexiones propuestas para el método de diseño de la mezcla. Las características de cada uno de los ejemplos muestran la necesidad de cumplir con los requisitos para la autocompacidad, pero la variedad de elección en el procedimiento de diseño continúa siendo compleja. En este momento consideramos también la necesidad de normalizar el método de diseño de la mezcla.

- Métodos de diseño de la mezcla: Los diseños para la dosificación de mezclas autocompactas difieren de los métodos tradicionales empleados en el hormigón, estando fundamentados en una base esencialmente empírica. En la bibliografía específica son varios los procedimientos presentados para la obtención de HAC.

El procedimiento inicial propuesto por Okamura (OKAMURA, 1997: pp. 50-54) y también por su equipo de trabajo (OUCHI; HIBINO y OKAMURA, 1997: pp. 37-40) es el primer método formulado específicamente para la dosificación de hormigón autocompactable. Se considera que el hormigón está constituido por dos espacios: árido grueso y mortero. En primer lugar se fija el contenido de aire entre un 2 y un 7% dependiendo de la resistencia necesaria frente a los efectos del hielo-deshielo. El volumen de árido grueso se fija en el 50% del volumen sólido del hormigón. Se calcula el correspondiente peso del árido grueso por metro cúbico del hormigón utilizando la densidad aparente del mismo. Esto significa que la cantidad de árido grueso viene determinada principalmente por sus características físicas. Restando

el otro 50 % para el resto, se determina el volumen correspondiente al árido fino - partículas con tamaño superior a 90 micras- que se fija en el 40% del mortero.



La relación agua/cemento y la dosificación del superfluidificante se obtienen mediante ensayos de fluidez del mortero. Se determina esta fluidez del mortero mediante la determinación del tiempo de flujo en un embudo. La viscosidad se establece con el escurrimiento del mortero en un tronco de cono con dimensiones de 100, 70, 60 milímetros -diámetro inferior, diámetro superior, altura-. Se recomiendan valores de 24 a 26 centímetros. Según este método, un mortero que satisface estas dos condiciones conduce a un hormigón autocompactable. A partir de estas premisas se realizan pruebas sobre el hormigón para determinar la dosificación final (CALAVERA; ALAEJOS; GONZÁLEZ; FERNÁNDEZ y RODRÍGUEZ, 2004: pp. 839-850):

ESQUEMA DE MÉTODO DE DOSIFICACIÓN PROPUESTO POR OKAMURA

1. Fijar el contenido de aire ocluido deseado (debería ser del orden del 2% más incremento en función de exigencias de resistencia a heladas).

2. Fijar el volumen de árido grueso (mayor de 4 mm), en función de su densidad aparente: el volumen de árido grueso debe situarse entre el 50% y el 60% del árido total. Los límites superiores se adoptan cuando el tamaño es pequeño y los límites inferiores cuando el tamaño es grande. Los áridos rodados permiten volúmenes mayores de áridos grueso que los áridos de machaqueo.

3. Fijar el volumen de arena (árido entre 0,125 y 4 mm), en función de su densidad aparente: se fija entre el 40% y el 50% del total de áridos.

4. Estudiar la composición de la pasta mediante ensayos realizados con el Cono de Extensión de Flujo. Se determina en primer lugar la relación $\beta_p = \text{Agua}/(\text{cemento} + \text{adición} = \text{polvo})$ para que el flujo relativo Γ_p sea igual a cero, partiendo de unos contenidos de cemento y adiciones seleccionados previamente. Se realizan ensayos variando la relación $A/(C+Ad)$ con valores 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4 (según diagrama y figura pag. 844) hasta obtener la relación $\beta_p = A/(C+Ad)$ que conduce a $\Gamma_p = 0$.

5. Estudiar la dosificación de superplastificante y la relación $\beta_p = A/(C+Ad)$ en el mortero. Se realizan ensayos en el Cono de Extensión de Flujo o con el Cono en V, con el mortero variando la relación $\beta_p = A/(C+Ad)$ en el rango (0.8-0.9) β_p y con las dosificaciones de superplastificante. Los tiempos registrados en el ensayo del Cono en V deben situarse entre 7 y 11 segundos y los valores para el ensayo de Cono de Extensión de Flujo entre 24 y 26 centímetros.

6. Por último se realizan los ensayos sobre el hormigón para determinar la dosificación final de superplastificante.

Esta metodología ha sido ajustada posteriormente por diferentes equipos de investigación. Por ejemplo, el método propuesto por la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles -JSCE- presenta una guía de dosificación para la realización de HAC (SKARENDAHL y PETERSSON, 2000). Esta guía hace una distinción entre los autocompactantes fabricados con finos, con agentes de viscosidad y con ambos. Además clasifica los HAC en tres grupos según el grado de autocompactabilidad.

En general, se recomienda para un grado de autocompactabilidad alto un contenido de árido grueso del 28 al 30% por volumen. Si necesitamos un menor grado de autocompactabilidad se podrá aumentar este porcentaje a un 35%. El contenido de los finos debe de estar entre un 16 y un 19% -mayor de un 13% si se utiliza agente de viscosidad-. La cantidad de agua deberá ser la mínima que asegura las cualidades de fluidez en estado fresco. El rango normal se establece en 155-175 Kgs/m³, y para la relación agua/cemento, en peso, un rango de 0,28-0,37. El contenido estándar de aire debería ser del 4,5%. El resto de las proporciones se fijan mediante ensayos de laboratorio sobre el estado fresco y el endurecido. La JSCE aconseja claramente basarse en la experiencia, las recomendaciones expertas y en los ensayos de laboratorio adecuados de manera que se consiga fluidez, resistencia a segregación y la autocompactabilidad requerida.

El laboratorio central de puentes y caminos de Paris -LCPC- en las personas de Sedran y Larrard desarrollan una metodología para dosificar autocompactables basada en un nuevo tipo de reómetro y un programa computacional para optimizar las mezclas. El reómetro *btrheom* se utiliza para caracterizar diferentes parámetros del hormigón fresco, considerándolo como un fluido Bingham. Este modelo de fluido Bingham ya ha sido comentado previamente y el programa computacional optimiza el esqueleto granular y predice la combinación con mayor densidad. Este programa fija inicialmente la relación agua/cemento y cemento/filler. Posteriormente, se determina la dosis correspondiente del superfluidificante utilizando el ensayo de cono de Marsh. El programa nos dará a continuación la combinación optimizada de los áridos seleccionados. Por último, las pruebas sobre el hormigón fresco ajustarán nuevamente la relación agua/cemento y la dosis de superfluidificante (SEDRAN y DE LARRARD, 1999).

El procedimiento CBI, descrito por Van Khanh y Montgomery, para la dosificación de hormigones tiene diferentes fases (VAN KHANH y

MONTGOMERY, 1999). En una primera fase se determina el volumen mínimo de pasta teniendo en cuenta las propiedades de los áridos, los criterios de durabilidad y las características de la aplicación. Se utiliza un modelo empírico que define la relación entre el riesgo de bloqueo para cada fracción de árido y el rango de tamaños del mismo teniendo en cuenta el espacio a través del cual el hormigón debe fluir. Según estos autores, corroborado mediante ensayos, el volumen mínimo de pasta es mayor para áridos de machaqueo que para áridos rodados. En una segunda fase se obtiene la composición de la pasta basándose en la caracterización reológica del mortero. Se fijan la máxima relación agua/cemento, el tipo de cemento y el contenido de aire ocluido. Se determina la dosis de superfluidificante mediante la obtención del punto de saturación definido como la dosis a partir de la cual la tensión de cortante del mortero es igual a cero aplicando el modelo de Bingham a los datos obtenidos utilizando un viscosímetro. Finalmente, se verifican las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido mediante los ensayos de extensión de flujo y caja-L.

El procedimiento de la Universidad Politécnica de Cataluña descrito por Gettu y Agulló se fundamenta en la optimización por separado de la composición de la pasta y del esqueleto granular (GETTU y AGULLÓ, 2004: pp. 63-66). La pasta está constituida por el cemento, la microsílíce, el filler, el agua y el superfluidificante, mientras que el esqueleto granular es la relación óptima entre arena y árido grueso que proporciona la máxima compacidad en seco y sin compactar.

Para un hormigón de alta resistencia, se fija inicialmente una dosificación de microsílíce del 10% del peso del cemento, una relación agua/cemento de 0,4 y un tamaño máximo de árido de 12 milímetros. Se recomienda un cemento tipo CEM I 52.5R, microsílíce con baja demanda de agua, un superfluidificante copolímero de última generación, un filler con tamaño máximo de partícula de 80 mm y baja demanda de agua y áridos con bajo coeficiente de absorción.

Fijada la relación a/c, la determinación del superfluidificante se busca en el ensayo de cono de Marsh, con apertura de salida de 8 mm. El procedimiento consiste en introducir un litro de pasta en el cono y medir el tiempo que tarda en fluir una cantidad de 500 ml. Este ensayo define el punto de saturación del fluidificante, que constituye el porcentaje óptimo de aditivo para la pasta considerada. La dosificación óptima de filler se establece mediante el ensayo de *mini-slump* o extensión de flujo de la pasta, es decir, el estudio de fluidez de la pasta y la compatibilidad cemento superfluidificante. La utilización del cono de Marsh y del *mini-slump* permite obtener, respectivamente, las relaciones superfluidificante/cemento y filler/cemento que dan lugar a mezclas con una fluidez máxima sin segregación y con un alto nivel de cohesión interna.

La composición del esqueleto granular en términos de la relación arena/grava se determina según el criterio de máxima compacidad en seco y sin compactar, a efectos de propiciar el mínimo contenido de huecos en el mismo, según el método experimental de la norma ASTM C29/C29M pero sin realizar la compactación del material. Este ensayo se realiza para distintas relaciones arena/grava obteniéndose la relación que da el esqueleto granular de máxima compacidad o mínimo volumen de huecos. Este tipo de procedimiento atiende al tipo de árido, a las características físicas como forma y textura además de a la granulometría.

Una vez determinada la composición de pasta y la relación arena/grava del hormigón, se establece el contenido óptimo de pasta por volumen de hormigón. Se realizan hormigones con diferentes contenidos de pasta proporcionando el mínimo contenido de pasta que logra la autocompactabilidad en estado fresco y resistencias mecánicas en estado endurecido. La fluidez del hormigón se comprueba mediante la extensión de flujo y el embudo-V. La capacidad de paso se valora a través del ensayo de la caja-L y la resistencia a la segregación se evalúa

mediante el ensayo de flujo en un tubo en forma de U (GETTU y AGULLÓ, 2004) (GETTU; BARRAGÁN y AGULLÓ, 2004: pp. 88-91).

Existen otras propuestas con métodos para diseño de dosificaciones que han tenido menor trascendencia. Estas han quedado reflejadas en las actas del simposio internacional de RILEM en Estocolmo (SKARENDAHL y PETERSSON, 1999). No nos parece necesario reflejar cada una de ellas, puesto que dejarían menor trascendencia a las ya citadas. Éstas han tenido mayor reflejo en los artículos y aplicaciones posteriores.

Por otra parte, la primera fase en el diseño es averiguar el "volumen mínimo de pasta" de la mezcla para rellenar todos los huecos entre las diferentes granulometrías de los agregados -arenas y áridos-. Debemos tener en cuenta que dos volúmenes iguales tienen una superficie específica diferente en función de las proporciones de áridos gruesos, intermedios y arenas debido a que el árido grueso es el que presenta menor superficie específica que el intermedio o que las arenas para un mismo volumen. Otro requerimiento inicial sería deducir los criterios de bloqueo, los cuales se basan en calcular la relación entre el árido grueso, el árido total y el espacio entre armaduras que define un punto de inflexión por encima del cual la posibilidad de bloqueo se incrementa.

Según estos criterios de la *EFNARC*, al diseñar la mezcla es preciso tener en cuenta las proporciones relativas de los componentes clave en cuanto al volumen y no a la masa. Los márgenes indicativos generales de las proporciones y las cantidades para alcanzar la autocompactación que nos indica estas especificaciones pueden ser éstos (www.efnarc.org):

- Relación agua / finos en volumen de 0,80 a 1,10.
- Contenido total de finos de 400 a 600 kilogramos por metro cúbico.

- El contenido de árido grueso suele ser del 28 al 35 por ciento por volumen de la mezcla.
- La relación agua/cemento se selecciona sobre la base de los requisitos de EN 206. Normalmente el contenido de agua no supera los 200 litros/m³.
- El contenido de arena equilibra el volumen de los demás componentes.

En general, se recomienda una táctica conservadora de diseño para garantizar que el hormigón pueda mantener sus propiedades especificadas en fresco a pesar de las variaciones en la calidad de las materias primas. También deben esperarse y permitirse algunas variaciones en el contenido de humedad de los áridos en la fase de diseño de la mezcla.

En otra referencia se nos indica que el HAC debe ser formulado a partir de los requisitos y exigencias del cliente (UNI 11040, 2003). Esta predisposición denota cierta libertad de criterios de diseño para la ejecución de este hormigón. Es necesario ajustarse a los requisitos indispensables para que la mezcla se considere autocompacta –fluidez, capacidad de paso y resistencia a la segregación- pero el camino para conseguirlo, así como la dosificación precisa dependerá de muchas variables ofrecidas por el cliente, equipo técnico y el lugar. Esta normativa del país vecino presenta además unas pautas para la composición del hormigón autocompacto.

Otros autores como Revuelta y Fernández insisten en que el principal mecanismo para conseguir un aumento de fluidez del hormigón consiste en la fricción entre las partículas. Los medios para obtener este aumento son la reducción de la tensión superficial mediante el empleo de superfluidificantes y una estructura granular óptima con gran cantidad de finos que aporten la viscosidad necesaria. Se reflejan las características principales a la hora de diseñar un HAC como empleo de superfluidificantes, elevado aporte de finos y eventual uso de

aditivos modificadores de la viscosidad. Estos autores reflejan los modelos de diseños de mezclas ya citados y destacan el requerimiento de diseños por pasos, donde es necesario optimizar la pasta y el mortero antes de dar una fórmula específica del hormigón (REVUELTA y FERNÁNDEZ LUCO, 2003: p. 135) (REVUELTA, 2003).

Navarro Ferrer y Esteban García exponen una metodología experimental de diseño de la mezcla específica para prefabricados (NAVARRO y ESTEBAN, 2003: pp. 161-166). Estos autores destacan los modelos propuestos por Okamura y por el CBI sueco. Sin embargo, ellos para prefabricados se han basado en una optimización por separado de la pasta y del esqueleto granular del árido. La pasta está constituida por el cemento, filler calizo -hasta 0,08 mm-, agua y superfluidificante. Han fijado primeramente una cantidad de cemento de 350 Kg/m³, además como se precisa una cantidad de finos <0,1mm de 500 o 550 Kg/m³, necesitamos 300 Kg/m³ de filler 0/1 con un aporte de finos <0,1mm de 121 Kg/m³ más el aporte correspondiente de las arenas que debería estar entre 29 y 79 Kg/m³. La dosificación de superfluidificante y el valor sp/c se determina con el cono de Marsh ya explicado previamente. El esqueleto granular se estipula mediante la relación arena lavada/arena triturada que propicie la máxima compacidad en seco. Posteriormente, con esta relación de arena, se busca la equivalencia que posibilite también la máxima compacidad o mínimo contenido en huecos con la arena/gravilla.

Según el equipo de *INTEMAC*, la dosificación debe ser realizada mejor en volúmenes que en peso. Las proporciones de los diferentes componentes se ajustan a los rangos siguientes;

- Relación agua/cemento+adiciones en volumen = 0.80-1.10.
- Contenido total del cemento más adiciones (polvo) = 160-240 litros (400-600Kgs) por metro cúbico.

- Contenido del árido grueso entre el 28 % y el 35 % del volumen de la mezcla.
- Contenido del agua que no exceda de 200 litros por metro cúbico.
- Contenido de arena para completar la masa en función de la cantidad que resta.

Otro autor español de máxima especialidad en autocompactante es Garrido Romero, para el que también nos parece interesante reseñar su aportación (GARRIDO, 2004: pp. 11-24). El comienza acentuando lo esencial, es decir, que debe cumplir los requisitos y las especificaciones recogidas en la Instrucción para Hormigón Estructural -EHE-. A partir de aquí indica los requisitos esenciales de la siguiente manera:

- Alto volumen de pasta -finos, aire y agua-, de entre el 35 y 40%.
- Bajo volumen de áridos gruesos -del 28 al 35%-.
- Reducido tamaño máximo del árido.
- Baja relación agua/finos.
- Uso de aditivos de última generación.

Posteriormente, se debe comprobar las características de fluidez, capacidad de paso y resistencia a segregar con los métodos de caracterización establecidos como ensayos de autocompactabilidad. Luego ahondaremos en estos ensayos.

El autor Hurtado Hurtado reconoce que el HAC no se puede utilizar sin previa particularización del diseño para los materiales locales y las prestaciones demandadas en cada una de sus aplicaciones. Se muestra de acuerdo con todos los autores con que es un modelo de dosificación muy distinto al del hormigón tradicional, además de requerir experimentación práctica. Se hace preciso el empleo de superfluidificantes y aumentar la proporción de finos. Este autor se ha

permitido agrupar ciertos criterios que pueden servir de orientación (HURTADO, 2004: pp. 102-105):

- Contenido de finos ($\varnothing < 1\text{mm}$) entre 450 y 550 Kg/m^3 .
- Volumen de árido grueso ($\varnothing < 15\text{mm}$) sobre árido total, del 50 al 55%.
- Volumen de arena ($\varnothing < 5\text{mm}$) sobre mortero ($\varnothing < 2\text{mm}$) del 40 al 50%.
- Mínimo de 350 Kg/m^3 de cemento.
- Relación entre agua y ligante (=cemento + adiciones) menor de 0,4.
- Volumen de agua sobre finos, del 90 al 105%.

En este subcapítulo hemos dejado una muestra de lo más completa de los diferentes métodos de diseño de hormigón autocompactante, según la actual literatura al respecto. Estos últimos párrafos nos serán de vital importancia en nuestro desarrollo experimental.

- Ajuste de la dosificación: Todos los autores reflejados en las citas refuerzan que los ensayos de laboratorio tipificados para hormigón autocompactante sirven para verificar las propiedades de la composición inicial de la mezcla. Si es preciso, en este momento deberán aplicarse los ajustes en dicha composición. Una vez satisfechos todos los requisitos, la mezcla debe contrastarse a escala completa en la planta de hormigón o en la obra.

En caso de que no pueda obtenerse un rendimiento satisfactorio, será preciso tener en cuenta un rediseño de la mezcla.

2.3.4.9 Producción, ejecución, curado y control de calidad

2.3.4.9 A Producción del hormigón autocompactante

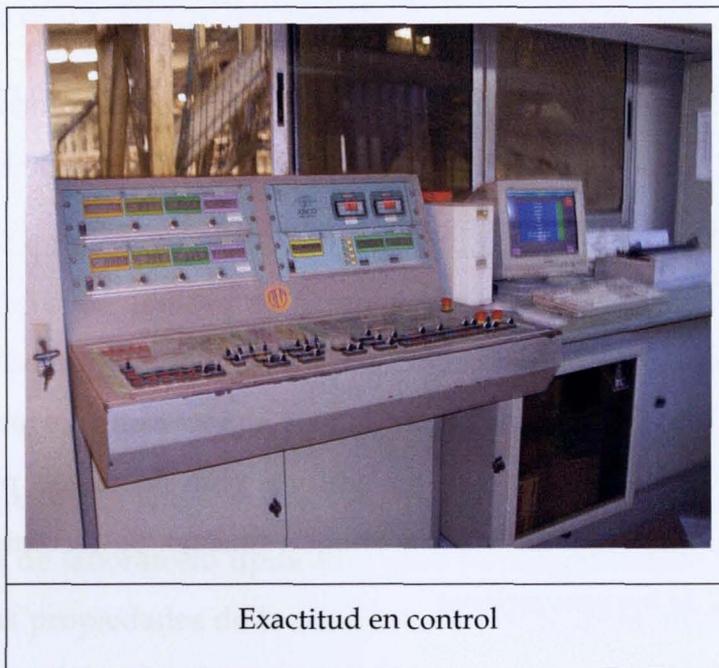
La producción del hormigón autocompactable debe ejecutarse en plantas donde el equipamiento, el funcionamiento y los materiales se controlen de manera adecuada. En consecuencia, la producción debe realizarse en plantas con sistemas de calidad que cumplan la ISO 9000 o norma similar. Se recomienda que la plantilla de producción que participe en la fabricación de hormigón autocompactable tenga una mínima experiencia o reciba una formación. Se hace necesario destacar una vez más la rigurosidad en la producción de este material, en este sentido queremos reflejar los siguientes aspectos:

- Almacenamiento de los componentes: Si es posible, los áridos deben estar cubiertos para minimizar la fluctuación en el contenido de humedad. También es necesario disponer de una buena capacidad de almacenamiento para los áridos y las adiciones. El almacenamiento de los aditivos para hormigón puede realizarse del mismo modo que en el caso del hormigón normal. Se recomienda seguir las recomendaciones de los proveedores.

- Amasado: No hemos encontrado ningún requisito al respecto para algún tipo específico de amasadora. Pueden utilizarse las mezcladoras de acción forzada, las mezcladoras de paletas, las amasadoras de caída libre, incluyendo los camiones hormigonera. El período de mezcla necesario debe determinarse mediante ensayos prácticos. En general, los períodos de mezcla deben ser más largos que en el caso de las mezclas convencionales.

El momento de la adición de aditivos es importante y es preciso acordar los procedimientos con el proveedor después de los ensayos en planta. Si es necesario ajustar la consistencia después de la mezcla inicial, en general debe hacerse con aditivos.

En relación al control de la producción y dado que la eficacia del hormigón recién fabricado puede fluctuar al principio de la producción, se recomienda que los ensayos de trabajabilidad sean realizados por el productor en cada carga, hasta obtener resultados satisfactorios y consistentes. Posteriormente, cada lote entregado debe comprobarse visualmente antes de transportarlo a la obra y los ensayos rutinarios deben aplicarse con la frecuencia especificada en EN 206.



- **Áridos:** Durante la producción del HAC, es preciso realizar ensayos sobre el contenido de humedad y la granulometría de los áridos con mayor frecuencia de lo habitual puesto que el HAC es más sensible a las variaciones que el hormigón normal.
- **Proceso de mezcla:** Al principio de la obra y en caso de carecer de experiencia previa con el diseño de mezcla concreto, es posible que se requieran recursos adicionales para supervisar todos los aspectos de la producción inicial de HAC.

2.3.4.9 B Ejecución del hormigón autocompactante

En relación a la ejecución directa del HAC debemos reseñar según se nos indica por recomendación de la EFNARC, el encofrado ha de encontrarse en buenas condiciones pero no son necesarias medidas especiales para prevenir la pérdida de lechada. En el caso de moldes con una altura superior a los 3 metros, es necesario tomar en consideración la presión hidrostática completa.

Aunque es más fácil colocar el HAC que el hormigón ordinario, se aconseja limitar la distancia de caída libre vertical a 5 m y limitar la distancia permisible de flujo horizontal desde el punto de descarga a 10 m. La probabilidad de daños resultantes de una junta fría no puede mitigarse mediante vibración, como sucede con el hormigón normal. Las superficies han de nivelarse aproximadamente según las dimensiones especificadas y luego debe aplicarse el tratamiento de acabado en el momento adecuado antes de que se endurezca el hormigón. Pueden producirse dificultades durante el proceso convencional de endurecimiento final de la superficie en áreas horizontales que deben ser fratasadas.



Superficie especular de HAC

En este sentido, el HAC tiende a endurecerse más rápido que el hormigón convencional porque hay muy poca o ninguna agua de sangrado en la superficie. Por consiguiente, el endurecimiento inicial debe iniciarse en cuanto sea posible

después de la colocación con objeto de minimizar el riesgo de fisuras por retracción.

2.3.4.9 C Curado del hormigón autocompactante

Como ya hemos descrito, el HAC se ejecuta con una reducida relación agua/cemento y con una gran cantidad de superfluidificante. Además contiene, por lo general, más áridos finos que el hormigón convencional. El doble efecto producido por este valor de A/C y por esta cantidad de finos puede potenciar una retracción capilar descontrolada cuando el hormigón está fraguado.

Con el fin de aclarar en que proporción el autocompacto, en comparación con el hormigón convencional, tiende a formar fisuras de retracción, la Universidad de Stuttgart está realizando estudios en hormigones con resistencia de diferentes clases y en las condiciones menos favorables. Los resultados dan cuenta de la necesidad de atención al curado de un HAC, especialmente en los hormigones con las clases resistentes más altas. Para prefabricados, el curado a vapor se presenta como una alternativa muy favorable (REINHARDT y WÜSTHOLZ, 2005).

2.3.4.9 D Control de calidad del hormigón autocompactante

Todo HAC debe estar sujeto a un control de producción bajo la responsabilidad del productor y dicho control debe seguir los requisitos de EN 206. En el caso del HAC es particularmente importante que se estandarice el control de recepción. El productor y el controlador deben acordar un procedimiento para la aceptación y cumplimiento al principio de la obra.

Ya hemos comentado artículos fundamentales del control de calidad que debe tener un hormigón de altas resistencias por los autores Calavera, Fernández o González-Isabel (CALAVERA et al, 2004) (FERNÁNDEZ, 2003) y (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993). Entiéndase este HAR también como hormigón de altas prestaciones según queda reflejado en el compendio de artículos de aquella serie.

Según estos autores, no se precisan medios especiales de fabricación para la elaboración del HAC. Añadiendo a las guías dictadas por la EFNARC precisan mantener un control continuo del contenido en humedad de los áridos y de la proporción de finos en los áridos. Los tiempos de amasado para el HAC son algo mayores que para el hormigón normal. Los encofrados deben ser no absorbentes, como el metálico usado en prefabricación. Se debe prestar atención al curado porque produce menor cantidad de agua en superficie. Debe iniciarse una vez que el hormigón esté superficialmente endurecido.

Según el laboratorio de control de calidad de *INTEMAC*, ya sabemos las características exigibles del HAC -fluidez, resistencia al bloqueo y resistencia a la segregación-, todas condicionadas por el comportamiento reológico del hormigón en fresco. Independiente de los ensayos que se hacen al hormigón endurecido comprobando aspectos de resistencias y durabilidad establecidos en la normativa vigente, en los HAC existen ensayos que se realizan habitualmente para caracterizar los materiales, la pasta y el hormigón. Se debe comprobar la granulometría de los áridos, estudiar la composición de la pasta y comprobar las características de compacidad del hormigón. Existen en la actualidad toda la serie de métodos de ensayos desplegada que, aunque no se trate de métodos totalmente regulados por normas específicas, son indicativos del comportamiento del hormigón fresco frente a las características que condicionan las exigencias que se establecen para ellos.

El hormigón autocompactable debe enumerar de igual manera cada uno de los aspectos de aquellos hormigones y añadirles los métodos de caracterización específicos que definen la fluidez, paso y segregación. En siguientes apartados reflejaremos cada uno de estos métodos de ensayos. En general y añadiendo a lo que nos muestra este autor, debe efectuarse una comprobación visual del hormigón. El controlador ha de asegurarse de que un personal competente y

preparado realiza los ensayos de aceptación en la obra, en un entorno adecuado; eso incluye un área protegida de las condiciones climatológicas, un equipamiento bien calibrado y en buen estado y un suelo equilibrado y estable para realizar los ensayos pertinentes.

BIBLIOGRAFÍA PARTICULAR DEL CAPÍTULO 2

• PREFABRICADOS

AGUILA GARCÍA, A. (1974): *La prefabricación aplicada en España*. Madrid, Sindicato Nacional de la Construcción.

AGUILA GARCÍA, A. (1988): *La tecnología de la industrialización de los edificios de vivienda*. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.

AGUILÓ ALONSO, M. (1974): *Prefabricación: teoría y práctica*. Barcelona.

ARQUITECTURA VIVA, número 51. Año 1996. Madrid.

BASSO BIRULES, F; AGUIRRE DE IRAOLA, F; ANABITARTE PRIETO, C; RICART BECHE, J; KRISTENSEN, S; LEWICKI, B; BLACHÈRE, G. y FERNÁNDEZ CASADO, C. (1968): *Prefabricación e industrialización en la construcción de edificios*. Barcelona. Editores técnicos asociados.

BERNDT, K. (1969): *Prefabricación de viviendas en hormigón*. Madrid. Editorial Blume.

BRUCE, A. y SANDBANK, H. (1972): *A history of prefabrication*. Editado por Arno Press Inc.

BURÓN, Manuel; PELÁEZ, Miguel; GÓMEZ, Luis y VALENTÍN, Javier (2002): "Proyecto y cálculo: Edificios industriales prefabricados", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural). pp. 361-371.

CALAVERA RUIZ, J; ALAEJOS GUTIERREZ, P; GONZÁLEZ VALLE, E; FERNÁNDEZ GÓMEZ, J y RODRÍGUEZ GARCÍA, F. (2004): *Ejecución y control de estructuras de hormigón*. INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales de Construcción).

CALAVERA RUIZ, J; LÓPEZ SÁNCHEZ, P; FERNÁNDEZ GÓMEZ, J; GONZÁLEZ ISABEL, G. y PÉREZ LUZARDO, J. M. (1999): *Aspectos Visuales de Hormigón*. Madrid. Monografía nº 3. INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales de Construcción).

CALAVERA RUIZ, José y FERNÁNDEZ GÓMEZ, Jaime (2001): *Una introducción a la prefabricación de edificios y naves industriales*. Madrid. Monografías INTEMAC nº 4. (Instituto Técnico de Materiales de Construcción).

DE LLORENS DURÁN, José Ignacio (2002): "Prefabricar la casa del príncipe", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural) pp. 301-310.

ELLIOTT, K. (2002): "European building construction in precast concrete", Conferencia de apertura en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de*

Prefabricación. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural), pp. I-X.

Eurocódigo 2: “*Proyecto de Estructuras de Hormigón*”. AENOR.

FERNÁNDEZ ORDOÑEZ, J. A; AGUILÓ ALONSO, M; ARANDES RENÚ, R; ECHEVARRÍA SÁINZ, F; ESPINOSA OCHOA, J. M; LÓPEZ BAILLO, J. F y SALAS SERRANO, J (1974): *Prefabricación; teoría y práctica*. Barcelona. Editores técnicos asociados.

FIP (eds.) (1985): *Design recommendations for multistorey precast concrete*. Recomendaciones de la FIP.

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (2002): “El hormigón como material de estructura y acabado”, en *Temas de Construcción*. Las Palmas de Gran Canaria. (Inédito).

HUE GARCÍA, Fernando (2002): “Normalización europea de productos prefabricados estructurales”, en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural) pp. 48-57.

KONCZ, TIHAMÉR (1968): *Manual de la construcción prefabricada* (tomo I). Editorial Blume.

KONCZ, TIHAMÉR (1977): *Construcción industrializada*. Madrid. Hemann Blume Ediciones.

LEWICKI, BOHDAN (1968): *Edificios de viviendas prefabricadas con elementos de grandes dimensiones*. Madrid. Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento.

MARIO OLIVERI, G. (1972): *Prefabbricazione o metaprogetto edilizio*. Barcelona. Editorial Gustavo Gili.

MARTÍN HERNÁNDEZ, Manuel (1997): *La Invención de la Arquitectura*. Madrid. Celeste Ediciones.

MEYER-BOHE, WALTER (1969): *Prefabricación II, análisis de los sistemas*. Barcelona. Editorial Blume.

Ministerio de Fomento (eds.) (1998): *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)*. Madrid. Edita Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.

NAVARRO LÓPEZ, José Manuel y ESCAÑO RODRÍGUEZ, M^a Teresa (2002): “Sistema de construcción de viviendas a base de paneles prefabricados de hormigón de grandes dimensiones”, en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural) pp. 513-523.

ORMAZABAL, G; ARMENGOU, J; AGUADO DE CEA, A. y RAMOS, G. (2002): "Sistema integrado de toma de decisiones en proyectos de estructuras prefabricadas", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural), pp. 5-15.

ORTIZ BONET, Angel (2002): "Temas claves para el futuro de la prefabricación", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural) pp. 337-347.

PIERANTONI SILVA, Fabiola y PENADÉS MARTÍ, José (2002): "La prefabricación en edificación: prefabricación de estructura y elementos de obras singulares", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural), pp. 385-388.

REVEL, MAURICE (1966): *La prefabricación en la construcción*. Bilbao. Ediciones Urmo.

SALAS SERRANO, Julián (1987): *Construcción industrializada: Prefabricación*. Madrid. Edita Fundación Escuela de la Edificación (UNED).

SCHWEIZER, Hermann y PHILIPPS, Dominique (2002): "Racionalización de la producción en la fábrica de paneles", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural) pp. 233-241.

SIGNORILE BIANCHI, G. (1965): "Note sugli aspetti economici della posizione edilizia", en *Industrializzazione dell'edilizia*. Dédalo. Bari.

VAN ACKER, A. (1994): *Planning and design handbook on precast building structures*. FIP. Londres. (Traducción española editada por la ATEP, 1996)

VAN ACKER, A. (2002): "State and developments of precast concrete building construction in Europe", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural), pp. 679-684.

VAQUERO, J; CASTRO, T; CONCEJO, F; GONZÁLEZ, J. C; LLEYDA, J. L y VALLE, J. (1996): *Edificación con prefabricados de hormigón: para usos industriales, comerciales, aparcamientos y servicios*. Madrid. IECA y ANDECE.

• HORMIGÓN DE ALTAS RESISTENCIAS Y ALTAS PRESTACIONES

AGUADO, A. y OLIVIER, M. (1992): "Hormigones de alta resistencia. Definición y ejemplo de aplicación. *Congreso Intercontinental de Hormigón Preparado*. Madrid.

BERGER-BÖCKER, Thomas (2002): "Hormigón autocompactante en camión hormigonera: informe de un año de experiencia", en *PHI-Planta de Hormigón Internacional* n° 5. Colonia, Alemania. Octubre de 2002. pp. 56-58.

BRAMESHUBER, Wolfgang (2004): "Hormigones de alto rendimiento" en *Detail* n° 1. 2004, pp. 72-79.

CALAVERA RUIZ, J; ALAEJOS GUTIERREZ, P; GONZÁLEZ VALLE, E; FERNÁNDEZ GÓMEZ, J y RODRÍGUEZ GARCÍA, F. (2004): *Ejecución y control de estructuras de hormigón*. Editado por INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones).

CALAVERA RUIZ, José (1991): "Aspectos humanos y psicológicos en la implantación del control de calidad de Construcción". *European Symposium on Management, Quality and Economics in Housing*. Lisboa.

CALLANDER, I. A; CLARK, H. A. y LEES, T. P. (1992): "Consideraciones internacionales del hormigón de alta resistencia". *Congreso Intercontinental de Hormigón Preparado*. Madrid.

CEB-FIP (eds.), (1990): "High Strength Concrete. State-of-The-Art-Report", en *BULLETIN D'INFORMATION* n° 197. Agosto de 1990.

CIMMA, W. (1991): "Composition du Béton à hautes performances et choix de ciment". *Conferencia sobre hormigón y otras prestaciones*. Lausanne.

DOMÍNGUEZ GARCÍA-CUEVAS, Juan (2003): "Utilización de los aditivos en el hormigón autocompactable" en revista *Hormigón* n° 59. Febrero de 2003.

FAVRE, R. (1991): "Les bétons à hautes performances (BHP): Une chance à saisir", en *Conferencias de las jornadas de estudios de 21 de marzo de 1991*. Lausanne, Francia.

FERNÁNDEZ GÓMEZ, Jaime (2003): "El control de calidad en hormigones de alta resistencia" en *Hormigón y Acero*, n° 228-229. Madrid. pp. 67-73.

GARCÍA BALLESTER, L.; AYASTS, C. y CAPUZ, R. (1992): "Los áridos calizos en los hormigones de alta resistencia". *Congreso Intercontinental de Hormigón Preparado*. Madrid.

GONZÁLEZ-ISABEL, Germán (1993): *Hormigón de Alta Resistencia*. Madrid. Editado por INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones).

HANNA, E.; LUKE, K.; PERRATON, D. y AITCIN, P. C. (1989): "Rheological Behavior of Portland Cement Pastes in the Presence of a Superplasticier", en *ACI SP 119*. pp. 171-188.

- HUE GARCÍA, Fernando (2003): "Los hormigones de alta resistencia y la prefabricación" en *Hormigón y Acero* n° 228-229. Madrid. pp. 45-55.
- HUE GARCÍA, Fernando (2003): "Los hormigones de alta resistencia y la prefabricación" en *Hormigón y Acero*, n° 228-229. Madrid. pp. 45-55.
- JAMBOR, J. (1976): "Hydraulic cement pastes: Their structure and properties". *Asociación del Cemento y Hormigón*. Wexham Spring, EE.UU.
- JIMÉNEZ MONTOYA, Pedro; GARCÍA MESEGUER, Álvaro y MORÁN CABRÉ, Francisco (2000): *Hormigón Armado. 14ª Edición basada en la EHE*. Barcelona.
- MELLAART, James (1981): *The Neolithic of the Near East*. Londres. *Thames and Hudson*.
- Ministerio de Fomento (eds.) (1998): *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)*. Madrid. Edita Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.
- PALACIOS NAVARRETE, Pilar y NAVARRETE DE CÁRCER, Ernesto (2003): "Los hormigones especiales como producto industrial", en *Hormigón y Acero* n° 228-229. Madrid. pp. 39-44.
- PARTHENAY, C. (1992): "Los fabricantes de hormigón preparado encaran el futuro con hormigones de alta resistencia". *Congreso Intercontinental de Hormigón Preparado*. Madrid.
- VITRUBIO POLIÓN, Marco (1987): *Los diez libros de Arquitectura*. Barcelona. Alta Fulla.
- www.bettor-mbt.es (Página Internet). Fecha entre mayo de 2004 y febrero de 2006.
- ZAITSEV, Y. (1980): "7th Internacional Congreso on the chemistry of cement". Paris. *Vol III*, pp. 1-176.

• HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

BERNARDO DE LA PEÑA, R. (2001): "Hormigón autocompactante" en *revista BIT*. Junio de 2001.

BORRALLERAS MAS, P. (2003-a): "Obras y realizaciones con hormigón autocompactable (HAC)" en *Hormigón autocompactable, un hormigón para el siglo XXI*. Valencia. Jornada técnica IECA. Febrero de 2003.

BORRALLERAS MAS, P. (2003-b): "Obras y realizaciones con hormigón autocompactable (HAC)" en *Hormigón y Acero* nº 228-229. Madrid. 2º y 3º trimestre de 2003.

C. C. GOMES, Paulo; GETTU, Ravindra y AGULLÓ, Luis (2001): "El hormigón autocompactable. Propiedades y métodos de caracterización" en *Hormigón y Acero* nº 221-222. Madrid. 3º y 4º trimestre de 2001.

CALAVERA RUIZ, J; ALAEJOS GUTIERREZ, P; GONZÁLEZ VALLE, E; FERNÁNDEZ GÓMEZ, J y RODRÍGUEZ GARCÍA, F. (2004): *Ejecución y control de estructuras de hormigón*. Editado por INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones).

Desconocido (2005): "Memorial judío en Berlín", en *Arquitectura Viva* nº 101.

DIEGUEZ, D (1999): "Aditivos a la carta" en *Hormigón* nº 41. Madrid. Junio de 1999.

DOMÍNGUEZ GARCÍA-CUEVAS, Juan (2003-a): "Utilización de los aditivos en el hormigón autocompactable" en *Hormigón autocompactable, un hormigón para el siglo XXI*. IECA Valencia. Jornada técnica IECA. Febrero de 2003. pp. 9-14.

DOMÍNGUEZ GARCÍA-CUEVAS, Juan (2003-b): "Utilización de los aditivos en el hormigón autocompactable" en *Hormigón* nº 59. Madrid. Febrero de 2003. pp. 68-70.

DOMÍNGUEZ GARCÍA-CUEVAS, Juan (2003-c): "Utilización de los aditivos en el hormigón autocompactable" en *Hormigón y Acero* nº 228-229. Madrid. 2º y 3º trimestre de 2003. pp. 139-142.

FERNÁNDEZ GÓMEZ, Jaime (2003): "El control de calidad en los hormigones de alta resistencia" en *Hormigón y Acero* nº 228-229. Madrid.

GARCÍA SAN MARTÍN, J. M y BORRALLERAS MAS, P (2001): "Hormigón autocompacto y Glenium: un compromiso perfecto" en *Hormigón* nº 52. Madrid. Septiembre de 2001.

GARRIDO ROMERO, Luis (2004): "Tecnología, propiedades generales y realizaciones con hormigón autocompactante" en *Hormigones autocompactantes*. Sevilla. XI Jornadas técnicas sobre Otros Hormigones.

GARRIDO ROMERO, Luis (2005): "Comportamiento estructural del HAC. Caracterización de propiedades mecánicas y análisis de durabilidad" en *II Jornadas del hormigón en la construcción y en la obra civil*. La Laguna.

GETTU, Ravindra y AGULLÓ, Luis (2004): "Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización (Parte I y II)" en *Cemento-Hormigón* nº 861. Madrid. Abril y mayo de 2004.

GETTU, Ravindra; BARRAGÁN, B y AGULLÓ, Luis (2004): "Desarrollo y aplicación de hormigones autocompactables de altas resistencias" en *Hormigones autocompactantes*. Sevilla. XI Jornadas técnicas sobre Otros Hormigones.

GETTU, Ravindra; C. C. GOMES, Paulo; AGULLÓ, Luis y BERNARD, C (2003): "Desarrollo de los hormigones autocompactables de alta resistencia" en *Hormigón autocompactable, un hormigón para el siglo XXI*. Valencia. Jornada técnica IECA. Febrero de 2003.

GONZÁLEZ-ISABEL, Germán (1993): *Hormigón de alta resistencia*. Madrid. Editado por INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones).

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (1999): "Dosificación del hormigón", en *Materiales y técnicas de Construcción*. Las Palmas de Gran Canaria. (Inédito).

HADID, Zaha (2005): "Fenómeno físico. Centro de la Ciencia Phaeno, Wolfsburg" en *Arquitectura Viva* nº 101.

HURTADO HURTADO, Jose Antonio (2004): "Experiencias en la fabricación y puesta en obra de los hormigones autocompactantes" en *Hormigones autocompactantes*. Sevilla. XI Jornadas técnicas sobre Otros Hormigones.

ISASI, Justo (2005): "Piedra líquida", en *Arquitectura Viva* nº 101. Madrid. Pp. 30-33.

JIMÉNEZ MONTOYA, Pedro; GARCÍA MESEGUER, Álvaro y MORÁN CABRÉ, Francisco (2000): *Hormigón Armado*. 14ª Edición basada en la EHE. Barcelona.

Ministerio de Fomento (eds.) (1998): *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)*. Madrid. Edita Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.

Ministerio de Fomento (eds.) (2003): *Instrucción para la Recepción del Cementos (RC-03)*. Madrid. Comisión permanente del cemento. Edita Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.

NAVARRO FERRER, F. y ESTEBAN GARCÍA, M. (2003): "Empleo del hormigón autocompactable en la prefabricación" en *Hormigón y Acero* nº 228-229, 2º y 3er trimestre de 2003. Madrid. pp. 161-166.

OKAMURA, Hajime (1997): "Self-Compacting High-Performance Concrete", en *Concrete Internacional*, vol. 19, nº 7.

OKAMURA, Hajime y OUCHI, Masahiro (1999): "Self-compacting concrete. Development, present use and future", en *Self Compacting Concrete. Proceedings of the First Internacional RILEM Symposium*. Estocolmo. pp. 3-14.

OKAMURA, Hajime; OZAWA, K; OUCHI, Masahiro (2000): "Self-Compacting Concrete" en *Structural Concrete*, vol. 1, nº 1.

OUCHI, Masahiro; HIBINO, M y OKAMURA, Hajime (1997): "Effect of superplasticier on Self-Compactability of fresh concrete" en *Transportation Research Record* nº 1574. pp. 37-40.

PACIOS ÁLVAREZ, A. (2003): "El hormigón autocompactable: tecnología sostenible para el sector de la construcción" en *Hormigón y Acero* nº 228-229. Madrid. 2º y 3º trimestre de 2003.

PALACIOS, A; PACIOS, A y GETTU R. (2004): "Control de calidad y procedimientos de ensayo de los hormigones autocompactables" en *Hormigones autocompactantes*. Sevilla. XI Jornadas técnicas sobre Otros Hormigones.

PALACIOS, Pilar y NAVARRETE, Ernesto (2003): "Los hormigones especiales como producto industrial", en *Hormigón y Acero* nº 228-229. Madrid. p. 39.

PÉREZ, J. L; ORDOÑEZ, J; MENÉNDEZ, A y RUBIO, M. C (2004): "Diseño de encofrados para el hormigón autocompactante" en *Hormigones autocompactantes*. Sevilla. XI Jornadas técnicas sobre Otros Hormigones.

REINHARDT, Hans-Wolf y WÜSTHOLZ, Timo (2005): "Tendencia a formar fisuras del HAC con un curado precoz con corriente de aire" en *Planta de Hormigón Internacional*, nº 4. Colonia, Alemania. Agosto de 2005.

REVUELTA CRESPO, David (2003): "Hormigón autocompactable; Visión general" en *Hormigón autocompactable, un hormigón para el siglo XXI*. Valencia, Jornada técnica IECA. Febrero de 2003.

REVUELTA CRESPO, David y FERNÁNDEZ LUCO, L. (2003): "Hormigón autocompactable: Visión general" en *Hormigón y Acero* nº 228-229. Madrid. 2º y 3º trimestre de 2003.

SEDRAN, T. y DE LARRARD, F. -*Laboratoire Central de Ponts et Chaussées, Nantes, France-* (1999): "Optimization of self-compacting concrete thanks to parking model", en *Self-Compacting Concrete. Proceedings of the First Internacional RILEM Symposium* Proceedings PRO 7. Estocolmo, Suecia. pp. 321-332. RILEM Publications S.A.R.L.

Self-Compacting Concrete European Project Group -BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC-, (2005): "The european guidelines for selfcompacting concrete. Specification, production and use." Mayo de 2005.

SKARENDAHL, Å y PETERSSON Ö. (2000): *Self-Compacting Concrete. State-of-the-Art Report*. en *RILEM technical committee 174-SCC, Report n° 23*. Cachan, Francia. RILEM Publications S.A.R.L.

SKARENDAHL, Å. y PETERSSON, Ö. (eds.) (1999): *Self-Compacting Concrete – Proceedings of the First Internacional RILEM Symposium*. Estocolmo. Editado por Å. Skarendahl y Ö. Petersson. *Swedish Cement and Concrete Research Institute*. Septiembre de 1999.

UNI 11040, (eds.) (2003): “Ensayos sobre hormigón autocompacto. Especificaciones, características y control”. *Organismo Nacional Italiano de Normalización – UNI 11040*. Italia. Marzo de 2003.

VAN KHANH BUI y MONTGOMERY, D (1999): “Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume” en *Self-Compacting Concrete. Proceedings of the First Internacional RILEM Symposium Proceedings PRO 7*. Estocolmo, Suecia. pp. 373-384. RILEM Publications S.A.R.L.

www.mtas.es (Página Internet) Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales

www.mtas.es (Página Internet): “Accidentes de trabajo. Evolución 1999-2002” Página del Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales – Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Fecha entre mayo de 2004 y febrero de 2006.

www.efca.info (Página Internet): “The european guidelines for self-compacting concrete”. Fecha entre mayo de 2005 y febrero de 2006.

www.efnarc.org (Página Internet): “Especificaciones y directrices para el hormigón autocompactable – HAC”. EFNARC (eds.). Fecha entre febrero de 2002 y febrero de 2006.

www.hormigonelaborado.com (Página Internet): “Presente y futuro del hormigón”. Fecha entre mayo de 2004 y febrero de 2006.

www.hormigonelaborado.com (Página Internet): “Hormigones de última generación”. Fecha entre mayo de 2004 y febrero de 2006.

CAPÍTULO 3:

**3. CARACTERIZACIÓN DEL
HORMIGÓN EN CANARIAS**

3.1. INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

Presentados en el apartado anterior los conceptos actualizados referentes al tema de prefabricación con hormigón, además de la cuestión del hormigón en sí mismo como material que evoluciona; se exponen en el presente capítulo las características del material utilizado. El elemento concreto de trabajo es el hormigón fabricado de manera común en Canarias. Este apartado servirá como base o plataforma de partida para realizar la investigación experimental. Mostraremos cada uno de sus componentes así como la especificidad de la mezcla. Incidiremos puntualmente en los áridos que lo componen y en sus propiedades. El motivo de presentar dos apartados, dedicados al hormigón y sus componentes así como a los áridos que lo componen, responde a que entendemos que estos últimos elementos son claves en la caracterización de la mezcla en las Islas.

Una vez realizado el estudio y la caracterización del hormigón canario, se habrá obtenido la información necesaria para poder analizar el fundamento y establecer los criterios que permitirán evolucionar a nuestra argamasa. Uno de los propósitos principales de nuestra experimentación es aplicar en Canarias los avances que han conducido al hormigón hacia su fluidez actual (véase *Arquitectura Viva*, nº 101, 2005)¹. De esta forma será más factible resolver algunas dudas que siempre aparecen cuando se refiere al hormigón canario, tales como:

- La influencia de los cementos puzolánicos utilizados.
- La aptitud de los áridos volcánicos para la fabricación de hormigón.
- La atribución de los superfluidificantes en la relación agua/cemento.

Ayudar a solucionar estas incertidumbres garantizará un conveniente comportamiento del hormigón resultante, tanto en estado fresco como endurecido.

¹ Esta revista es ejemplo del interés que suscita en los últimos años el hormigón y sus cualidades.

Por otra parte, la información que resulte del presente capítulo también facilitará la alternativa de las técnicas de ensayo adecuadas para su aplicación en dichos hormigones. Éstas serán presentadas en el siguiente capítulo, en la sección dedicada al método de diseño y procedimiento de ensayos.

3.2. HORMIGÓN EN CANARIAS

Por muchos es reconocido lo singular del hormigón en Canarias. Se conoce lo complicado que resulta extraer áridos para hormigón con un consecuente módulo de forma de deficiente calidad. También es conocida la irregular demanda de agua de nuestras arenas de machaqueo. Por otra parte se sabe del exceso de demanda de agua de nuestros característicos cementos puzolánicos. En definitiva, reconocemos que tenemos un hormigón difícil, pero que conseguimos manejar según hemos ido necesitando. Sin embargo, nuestro equipo de investigación de hormigones del Departamento de Construcciones Arquitectónicas cree que no se le ha sabido sacar el máximo provecho.

El hormigón en Canarias está compuesto por los genéricos materiales como el cemento, el agua, los áridos y ocasionalmente adiciones y/o aditivos. En los últimos años se comienza a utilizar en planta de prefabricados o de hormigones elaborados algunos tipos de aditivos que mejoran en algún grado las cualidades del hormigón resultante. Excepcionalmente, también se utilizaba algún aditivo retardador como remedio último para evitar un fraguado indeseado o aditivos aceleradores para reducir el tiempo de desmoldeo, lo que adquiere gran importancia en los prefabricados. Las adiciones tampoco han sido muy comunes en nuestro hormigón, únicamente tenemos modelos ejemplares con pigmentos integrados en la obra de algunos edificios (PÉREZ LUZARDO, 1991). El agua es la de abasto común en nuestra región que cumple con toda las limitaciones impuestas por la Instrucción española. Además es necesario matizar la relación

agua/cemento, la docilidad y el curado por la influencia que tiene en las características de nuestro hormigón y singularmente en sus aspectos estéticos vistos. Especialmente, sí debemos destacar los cementos puzolánicos de uso común en las Islas y también los áridos utilizados de procedencia insular. Con respecto a este último tema destacable, debemos tratarlo en sección aparte por la importancia que tiene para nuestros hormigones.

- El cemento en Canarias:

Sabemos que las adiciones activas empleadas en los productos cementicios de Canarias son las puzolanas naturales (GUIGOU, 1990). Podemos comprobar incluso que hasta hace poco, la práctica totalidad de los cementos utilizados en las Islas para hormigón eran los *PUZ* o los *PA* con puzolanas naturales (PÉREZ LUZARDO, 1991). La tendencia a la uniformidad europea ha llevado a una evolución en la reglamentación española. Así, la vigente Instrucción tiene nuevas designaciones y tipificaciones. Estos cementos puzolánicos o cementos de clínker de Pórtland con adición activa de puzolana natural quedan distribuidos en los cementos Pórtland con adiciones (tipo II) de puzolana denominados desde hace algunos años *CEM II / A-P* y *CEM II / B-P*, así como los cementos puzolánicos (tipo IV). En la actualidad, es más factible encontrar otros cementos de importación en el mercado canario, pero podemos continuar afirmando que los hormigones que contienen cementos de puzolanas predominan entre los utilizados en Canarias. En concreto, nosotros hemos utilizado el tipo *CEM II / A-P 42,5 N*; el tipo *CEM II / B-P 32,5 R* y ocasionalmente el *CEM II / A-P 52,5 N*. Esta elección de cemento viene dada por ser la más extendida entre las empresas de prefabricados de hormigón en nuestra tierra. Exponemos a continuación la información preliminar destacable de estos cementos utilizados²:

² Datos esquematizados a partir de las reseñas comerciales de cada uno de los cementos utilizados.

- CEM II / A-P 42,5 N: Se trata de un cemento de clinker de Pórtland con adición puzolánica. Está compuesto por entre un 6% y un 20% de puzolana y por entre un 80% y un 94% de clinker. Está específicamente recomendado para:

- Hormigones en contacto con agua o ambientes marinos.
- Hormigón en masa y armado, de resistencias medias y altas.
- Hormigones en medios con nivel de agresividad débil por aguas o suelos con sulfatos.

Su uso no es recomendable con hormigones pretensados y se debe tener precaución con el almacenamiento que nunca debe ser superior a dos meses.

- CEM II / B-P 32,5 R: Este cemento está constituido por un 21 - 35% de puzolana natural y el 65 - 79% de clinker de Pórtland. Está indicado para:

- Obras de hormigón en masa y armado.
- Prefabricación con tratamiento higrotérmico o hidrotérmico.

Este tipo de hormigón presenta una alta resistencia inicial y está contraindicado para hormigón pretensado. Se debe cuidar su almacenamiento, nunca superior a tres meses. Asimismo, se debe evitar las desecaciones bruscas y prolongar el curado en lo posible en ambiente cálido y húmedo.

- CEM II / A-P 52,5 N: Este cemento contiene entre un 6% y un 20% de puzolana natural y entre un 80% y un 94% de clinker de Pórtland. Sus recomendaciones en ejecución son:

- Hormigones en contacto con agua o ambientes marinos.
- Hormigón en masa o armado, de resistencias medias y altas.

- Hormigones en medios con nivel de agresividad débil por aguas o suelos con sulfatos.
- No son recomendables para hormigón pretensado.

La puzolana canaria está considerada como una de las mejores adiciones naturales (www.ceisa.es). Entre las cualidades que ofrece la adición de puzolana en los cementos podemos destacar:

- Mayor durabilidad química por resistencia a ataques por aguas puras, carbónicas, agresivas o con débil acidez.
- Mayor compacidad e impermeabilidad, ofreciendo mayor resistencia al agua, especialmente a la de mar.
- Menor calor de hidratación.
- Mayor resistencia a tensiones mecánicas, a la abrasión y a la rotura, especialmente después de 90 días.
- Mejora de las características superficiales del hormigón como uniformidad en el color y reducción de la rugosidad en la superficie.
- Inhibe o contrarresta las expansiones producidas por la presencia de cal libre, magnesia libre, reacción álcalis-áridos.

En relación a la puzolana natural podemos explicar que es un material capaz de combinarse con el hidróxido cálcico (Ca OH_2) y con el óxido de cal (Ca O) originados durante la hidratación del cemento. Al reaccionar con este hidróxido se origina la formación de silicatos cálcicos, que producen cementos con mayor durabilidad frente a las agresiones químicas. De esta manera se crean componentes insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos. Así, una cal puede ser dotada de características hidráulicas al combinarse con una puzolana (GUIGOU, 1990).

Para conocer detalladamente las peculiaridades de los cementos puzolánicos utilizados en Canarias debemos acudir a la tesis doctoral de Carlos Guigou Fernández del año 1990³. Nosotros destacamos algunas de sus consideraciones para los cementos canarios a las que prestaremos atención en nuestros ensayos posteriores:

- Nuestros cementos - tipo II A-P o B-P con adición puzolánica y cementos tipo IV puzolánicos - requieren incrementar el tiempo de amasado entre un 20 y un 30% y aumentar el tiempo de desencofrado de la pieza.
- Las resistencias iniciales vienen dadas por el clinker de Pórtland, manifestándose transcurridos los primeros días y continuando incluso tras los 28 días. Es necesario un curado más estricto, manteniendo la pieza completamente húmeda al menos 15 días.
- La puzolana origina una alta velocidad de desecación, por lo que se incrementa el riesgo de fisuración por ahogamiento o incluso antes del fraguado, recién vertido el hormigón. La baja consistencia de la masa, el exceso de los finos en las arenas y el tardío comienzo del curado propician estas situaciones. La práctica de espolvorear con cemento la superficie (tras una hora de vertido), fratar y comenzar un riego muy suave consigue resultados sorprendentes en cuanto a la estanqueidad.
- Los finos de las arenas tienden a sustituir el grano de cemento impidiendo la correcta hidratación del mismo.
- En los cementos A-P, es conveniente además incrementar la dosificación en cemento en un 15%.

³ El doctor Guigou Fernández es profesor titular del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y por toda su trayectoria investigadora podemos afirmar que experto en el hormigón que se utiliza en las Islas Canarias.

- En los tipos *CEM IV* puzolánicos es conveniente conocer el contenido en puzolanas. Éstas deberán contar en el contenido en cemento/m³, pero en la relación A/C (agua/cemento) sólo debe intervenir la parte de Pórtland y no la puzolana.

Por otra parte, nuestro equipo de trabajo atendiendo a la alta velocidad de desecación y el riesgo de fisuración por ahogado, reconoce de igual manera que la alta dosificación de cemento – por encima de los 400Kg/m³ – tiende a originar microfisuras en el hormigón canario debido a la retracción, haciéndolo también poco resistente y poco durable (MELIÁN y FLORES, 2004). Este error se considera peligroso en nuestra región, ya que como afirman los mismos autores “para aumentar la resistencia del hormigón no se realizan mejoras granulométricas, sino que se aumenta la cantidad de cemento [...]”. Estamos completamente de acuerdo con este parecer que nos lleva a realizar hormigones que cumplen con norma pero que son menos duraderos frente a un posible ataque químico y en lo que a su permeabilidad se refiere.

Para la prefabricación de elementos sin tratamientos térmicos, son adecuados los cementos *PA* de adición puzolánica, en las categorías 450 y 550 N/mm², junto con los *P-ARI*. Mientras que para la prefabricación con tratamientos térmicos los aptos son los cementos *PA*; Pórtland con puzolanas y los cementos puzolánicos – en nuestro caso tipo II / A - P con una clase resistente 42,5 y 52,5 MPa - (GUIGOU, 1990).

- El agua para cementos en Canarias:

Como sabemos el agua juega un papel doble en el hormigón. Por un lado, participa en las reacciones de hidratación del cemento y por otro, confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para la correcta puesta en obra. La cantidad de agua debe limitarse al mínimo estrictamente necesario, ya que el exceso degenera en evaporación y creación de huecos en el hormigón que disminuyen su

resistencia y durabilidad. El agua empleada en la ejecución de hormigones canarios es la común de abasto. Ésta, en general, procede de la desalación y depuración del mar hasta un nivel óptimo que llega a convertirla en potable excepto por el contenido habitual de cloro para la depuración. Para nuestro caso, sabemos que el agua depurada con cloro puede emplearse perfectamente en la confección de nuestros hormigones (JIMÉNEZ MONTOYA, GARCÍA y MORÁN, 2000, p. 28).

Para el cemento que contiene adiciones activas, como ocurre en nuestras islas, el problema del agua en el hormigón adquiere mayor complejidad por el incremento de incertidumbre debido a la naturaleza petrográfica de nuestros áridos. Es imprescindible conocer bien la naturaleza de los áridos empleados en la confección de hormigón. En este sentir, desplegaremos un apartado independiente del hormigón canario, pero asociado a la vez, para los gránulos canarios empleados en la ejecución del hormigón. Aparte de esta consideración de la absorción por parte de los áridos, otro aspecto del agua para el hormigón en Canarias está vinculado al riguroso curado. Algunos investigadores canarios nos advierten que no debemos confundir la relación agua/cemento con la necesariamente abundante agua de curado (MELIÁN y NELSON, 2004).

- La relación agua/cemento en los hormigones hechos en Canarias:

Durante la hidratación del cemento se producen fundamentalmente silicatos cálcicos e hidróxido cálcico, experimentando un fenómeno expansivo que hace pasar del estado sólido previo del cemento a la mezcla inicial, durante el proceso de fraguado y endurecimiento. En este momento del fraguado se constata que un avance paulatino de la hidratación conlleva una disminución de la porosidad de la pasta, experimentando así un incremento de la resistencia (GUIGOU, 1990, p. 89).

Por una parte, las características inherentes al cemento como su finura, la riqueza en silicato tricálcico (SC₃) y aluminato tricálcico (AC₃) y la adición

puzolánica inducen una velocidad inicial de hidratación indeseada. Por otra parte, también una temperatura ambiente alta combinada a los vientos secos existentes en Canarias provoca una rápida evaporación del agua de amasado. Estos aspectos serán determinantes para la consiguiente insuficiencia en la hidratación del cemento.

Además y por otra parte, una pasta disminuye su capacidad de adherencia a los áridos a medida que aumenta su porosidad, por lo que se deduce la existencia de una estrecha relación entre el factor A/C y la resistencia a compresión del hormigón.

Podremos confirmar una vez más la dificultad de alcanzar una determinada trabajabilidad de las masas de hormigón fresco confeccionado con materiales canarios, cuya medida de consistencia sea proporcionada con las relaciones máximas prescritas por la normativa (GUIGOU, 1990, p. 92). También en otras investigaciones se nos da muestra de que “la relación agua/cemento es de difícil solución” (PÉREZ LUZARDO, 1991, p. 252). También queda constancia de que en otras experimentaciones realizadas en Canarias se denota la necesidad de traspasar el límite de 0,60 para la relación A/C. En concreto, se refiere para los áridos de naturaleza fonolítica y si se quiere trabajar con consistencias blandas, de descenso en el Cono de Abrams de entre 6 y 7 centímetros (GUIGOU, 1993).

Más recientemente, el profesor Guigou nos afirma que es cierto el conocimiento que tenemos de que la adición puzolánica aumenta la resistencia mecánica y química, pero que esta adición para ser efectiva debe ser sobre un hormigón compacto. Sabemos de la puzolana inherente al cemento común canario pero, sin embargo, este hormigón no presenta compacidad debido a la relación agua/cemento = 0,7 habitual en nuestras Islas, frente a una teórica relación A/C = 0,28 (GUIGOU, 2002). El profesor nos expone un término medio entre ambos valores que anotamos (GUIGOU, 2004):

- Para un hormigón de entre 30 y 50 MPa sano y durable, debemos trabajar con una relación A/C por debajo de 0,5 valiéndonos para la trabajabilidad del uso de un superfluidificante.
- Para un hormigón de más de 50 MPa sano y durable, debemos trabajar con relaciones A/C próximas a 0,4, añadir superfluidificante y la puzolana más energética, que es la microsílíce.

Otras referencias nos confirman la posibilidad de usar relaciones agua/cemento de 0,28 con áridos de la Isla de La Palma. Se trata de una obra singular – El puente de Los Tilos – que requería un HAR. Tras desestimar la opción de un hormigón de 100 MPa, se opta por uno de 75 MPa más acorde a las posibilidades que prestan nuestros áridos. En concreto, nos expone una fórmula de trabajo como la siguiente (PÉREZ-FADÓN y HERRERO, 2002) (HERRERO, 2005):

- Cemento 500 Kg/m³
- Árido grueso (basalto machaqueo) 1.140 Kg/m³
- Árido fino (basalto natural lavado) 670 Kg/m³
- Relación agua/cemento 0,28
- Humo de sílice 10%
- Superfluidificante (*viscocrete 7-900*) 1,7%
- Consistencia líquida T₅₀= 4 - 8 sgs.
- Resistencia a compresión 75 MPa.

Estamos de acuerdo con el autor Guigou en su planteamiento de precisar que la puzolana canaria sea reconocida como adición activa para fabricar HAR. En tal sentido nos presenta múltiples experiencias realizadas en nuestro laboratorio con HAR. Destacamos un ejemplo de éstos (GUIGOU, 2002):

○ Cemento	350 Kg/m ³
○ Clase de cemento	II / BP 32,5 R.
○ A/C	0,42
○ Consistencia previa	2 cms.
○ Superfluidificante	1,4%
○ Humo de sílice	10%
○ Consistencia final	5 cms.
○ Resistencia a compresión	72,5 MPa.
○ Resistencia a tracción	3,5 MPa.

No cabe duda de que esta relación agua/cemento influye decisivamente en la docilidad del hormigón.

- La docilidad de los hormigones canarios:

Esta propiedad del hormigón fresco la podríamos definir como la resistencia que la masa ofrece a la deformación. Ya Jiménez Montoya lo consideraba un concepto de difícil definición, aunque lo identificaba con la trabajabilidad y con su deformabilidad y consistencia. Esta docilidad depende de:

- La cantidad de agua: a medida que ésta aumenta, habrá una mayor trabajabilidad. Esta apreciación es válida hasta cierto límite, por encima del cual, la pérdida de cohesión de la masa conlleva una gran dificultad para la compactación, disminuyendo así su trabajabilidad, entendida ésta como “la cantidad de trabajo interno útil necesario para alcanzar su total compactación” (NEVILLE, Documentación Centro INCE en JIMÉNEZ, GARCÍA y MORÁN).

- El tamaño, tipo y naturaleza de los áridos: en un tamaño máximo lo mayor posible -compatible con las dimensiones de la pieza y con una correcta composición granulométrica- alcanzaremos menor superficie específica. Por otro lado, la superficie específica a envolver sería inferior para una granulometría compuesta por áridos rodados que con los mismos tamaños procedentes de machaqueo, por las irregularidades superficiales que éstos presentan unido al mayor rozamiento entre granos.
- La cantidad y finura de molido del cemento: una mayor contenido de cemento y una mayor finura de molido en el conglomerante conllevan un efecto lubricante.
- Empleo de aditivos: la inclusión de burbujas que aireen el seno de la masa, conlleva, entre otros efectos, la lubricación de la misma, aumentando notablemente su docilidad.
- Empleo de plastificantes y fluidificantes; incrementan la trabajabilidad además de conseguir una reducción de la cantidad de agua.

Dos masas con la misma consistencia no han de ser necesariamente igual de dóciles. La trabajabilidad es una propiedad del hormigón para cuya cuantificación directa no existe un ensayo específico normalizado. Esta trabajabilidad se estima evaluable a través de los ensayos para la medida de la plasticidad de la masa fresca que es precisamente la consistencia. Por tanto, cuantificando esa consistencia, estimaremos la cohesividad y facultades de puesta en obra del hormigón.

No es suficiente con establecer un tipo de consistencia – seca o fluida -, sino que debemos fijar el índice de descenso de cono con exactitud – de 4 o de 6 cms -. Experiencias han demostrado en Canarias que pasar de un cono 8 cm a un cono de 6 cm – ambos de consistencia blanda -, conllevó a una pérdida del 24% de resistencia a compresión (GUIGOU, 2002).

- La influencia del curado en las propiedades del hormigón:

El curado es el proceso final en el tiempo dirigido a conseguir una óptima hidratación del cemento. Los métodos acelerados en los procedimientos de prefabricación reducen el tiempo de desencofrado al máximo. Para esto provocan cambios de temperatura, humedad o presión en el proceso de fraguado del hormigón. En Canarias, debido tanto a las características del tipo de cemento como a la temperatura ambiente y vientos secos es esencial prestar máxima atención al curado del hormigón (GUIGOU, tesis doctoral, 1990) y (PÉREZ LUZARDO, tesis doctoral, 1991). Es nuestra intención atender estas observancias en nuestra campaña de ensayos y pruebas en planta de prefabricados.

En este aspecto conocemos que “la retracción del secado de hormigón es producida principalmente por la contracción del gel de silicato cálcico cuando el contenido de humedad de dicho gel disminuye. Supuesta fija la composición de un hormigón, cuanto menor es el tamaño de la partícula, mayor es la retracción que cabe esperar. Por encima de media pulgada, el efecto del tamaño de partícula es despreciable. La cantidad y la actividad de la arcilla contenida en los áridos aumentan la retracción. La retracción también aumenta al sustituir el cemento Pórtland por materiales puzolánicos, tales como piedra pómez o tierras diatomeas. El árido de roca volcánica produce mayores retracciones que el árido calizo o cuárcico.” (POPOVICS, Sandor *en* GUIGOU, 1990).

Con los hormigones de alta resistencia en Canarias se debe prestar máxima atención, puesto que el calor de hidratación elevado unido a la abundancia de componentes puzolánicos presente en los HAR obliga a mantener completamente húmedas las piezas preferiblemente dos semanas (GUIGOU, 2004).

- Aspectos estéticos del hormigón en Canarias:

Los aspectos visuales del hormigón es un tema largo y con excelentes logros a lo largo de la historia y en el ámbito internacional. Así nos lo refleja Pérez Luzardo y sus referencias bibliográficas. Nosotros, en este subapartado nos centramos en la investigación afín a los aspectos estéticos del hormigón en Canarias (*véase PÉREZ LUZARDO, tesis doctoral, 1991*).

En primer lugar tenemos la posibilidad de darle una coloración integral a la masa del hormigón a base de cementos coloreados, con la utilización de arenas coloreadas o áridos con colores naturales, con adición de partículas de vidrio coloreado o con la adición a la pasta de pigmentos colorantes que trataremos más adelante. En segundo lugar, tenemos los otros aspectos fundamentales que debemos cuidar para un correcto hormigón arquitectónico y que son los siguientes (*PÉREZ LUZARDO, tesis doctoral, 1991, pp. 50-69*):

- El encofrado: Podemos afirmar que el tipo, el material constitutivo, la ejecución y cuidado del encofrado es cardinal en el resultado obtenido. Un listado los podría clasificar en absorbentes y en no absorbentes, en lisos o en rugosos. Los materiales utilizados en el encofrado pueden ser la madera y todos sus derivados, los metálicos, los de PVC y otros plásticos rígidos, el fibrocemento, el papel embreado, el yeso, los poliestirenos o los elastómeros y otros.
- El tratamiento superficial: Los procesos para un acabado superficial también pueden aparecer después de desencofrado el hormigón. En este sentido, pueden ser previamente previstos o como correctores de un resultado inesperado. Podemos citar los inhibidores superficiales de fraguado, los ácidos, el lavado, el cepillado, el abujardado manual o mecánico, la proyección de chorro de arena y el pulido.

- Los componentes del hormigón: Éstos influirán de manera primordial en su color, tonalidad, textura o respuesta a los tratamientos. Por ejemplo el cemento podría ser blanco o gris, pero además puede ser de Pórtland puro o con adición por lo que se obtendrá tonalidad diferente según su elección. Además, las tonalidades y módulos de finura de las arenas intervendrán en la textura y color final como podemos comprobar en el plan de ensayos de la tesis de Pérez Luzardo. De similar consideración es el árido en relación a su tamaño y color y en función de si quedará visto o no. El agua y la relación agua/cemento también tendrá importancia vital en la terminación superficial.
- El vibrado: No solamente en la compactación, homogeneidad y adecuada resistencia, sino también en la terminación de la capa superficial vista.
- Las juntas de hormigonado: Es básico elegir una correcta disposición de las juntas de hormigonado y de dilatación para un resultado óptimo.
- El desencofrado: Se debe respetar el tiempo de desencofrado, usar indispensablemente un desencofrante que garantice una terminación limpia y que facilite el desmoldeo de manera fácil y cuidadosa.
- El curado: No solamente para la homogeneidad y resistencias, en Canarias debido al cemento, áridos, ambiente caluroso y seco, es esencial un curado correcto prestando especial atención al agua en la superficie. De esta manera se evitará la fisuración de la cara vista por retracción, cambios de tonalidad por desecación o desprendimiento por oxidación de las armaduras.
- Los aditivos: Éstos variarán el color y la tonalidad del hormigón ejecutado, con lo que se deberá realizar modelos previos.
- La protección del elemento terminado: Cuando por lógica temporal se ejecuta el elemento de hormigón terminado se deberá atender a la protección de éste durante la ejecución del resto de la obra.

- El pigmento: Éste componente adicionado a la pasta del hormigón le puede conferir un resultado atractivo por la inclusión de color en el elemento terminado.

- El pigmento como adición:

Nuestro equipo de trabajo considera básico el desarrollo de este subapartado en tanto que las aplicaciones de nuestra investigación están primordialmente dirigidas a paneles de fachada. Por tanto consideramos que su aspecto estético debe considerarse conjuntamente. En este sentido, la coloración integral en la masa de hormigón del prefabricado aplicado conlleva el uso de pigmentos, además de los otros aspectos citados en los párrafos anteriores. Conocemos la posibilidad de colorear superficialmente el panel de fachada, pero no es éste el contenido de nuestra tesis. Debemos referenciar en este apartado el trabajo completo de investigación de José Manuel Pérez Luzardo⁴, que además es el director del presente trabajo de tesis doctoral.

Salvo los ejemplos aislados de hormigón coloreado integralmente a base de cementos con color, de los áridos y arenas coloreadas o con color natural, podemos afirmar que la utilización de pigmentos añadidos a la pasta en el momento de fabricación es el más importante de los procesos para conseguir hormigón coloreado. Tenemos una posibilidad casi infinita de conseguir colores tonos e intensidades con el ajuste deseado para cada realización (PÉREZ LUZARDO, 1991, p. 74).

Encontramos que en las anteriores reglamentaciones para hormigón no existía una definición y ubicación exacta de los pigmentos como aditivos o adiciones. Además Jiménez Montoya y su equipo nos explicaban que para no confundir

⁴ El doctor Pérez Luzardo es profesor titular del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y su especialización se centra en la coloración y textura del hormigón estructural. Además también es conocedor profundo del hormigón en Canarias.

aditivos con adiciones, debíamos tener claro que las adiciones se referían siempre a escorias siderúrgicas, humo de sílice, puzolanas naturales, cenizas volantes y filleres calizos. En base a esta referencia y otras, se deducía que los pigmentos eran considerados como aditivos (JIMÉNEZ MONTOYA, GARCÍA y MORÁN, 2000, p. 11). Sin embargo y a día de hoy, la norma europea EN 206-1 incluye los pigmentos en el grupo de las adiciones casi inertes - Tipo I -, por tanto, nos referiremos a éstos como adición (prEN 12878 en CALAVERA, ALAEJOS, GONZÁLEZ, FERNÁNDEZ Y RODRÍGUEZ, 2004, p. 540).

Los pigmentos son finas partículas de polvos, químicamente inertes, insolubles en su medio dado y que dotan de color al material sobre el que se añaden. Para pigmentar al hormigón deben ser insolubles, resistentes a la alcalina pasta de cemento y a la intemperie, estables a la luz y debe quedar completamente embebido junto con los finos en la pasta de cemento endurecida. Además deben tener gran capacidad de tinte, brillo, luminosidad y tono del color deseado. Es necesaria también una uniformidad en el tamaño de las partículas que lo componen.

Podemos clasificar los pigmentos en los naturales u orgánicos y los sintéticos o inorgánicos. Los pigmentos naturales proceden de tierra natural calcinada y tamizada hasta conseguir gránulos de tamaño aproximado a 5 milímetros. Posteriormente y por procesos mecánicos en rodillo se reduce este tamaño hasta alcanzar un rango de partícula de 10 a 50 micras, garantizada su uniformidad casi al 100%. Si además de este proceso pasan por una cámara de micronización, donde son sometidas a presión y logrando un tamaño medio de 5 micras, se los denomina pigmentos micronizados.

Los pigmentos sintéticos se obtienen a través de la precipitación química de cristales de sulfato ferroso, sulfatos férricos e hidróxidos de sodio. En general, mediante aire comprimido se añaden hierro o cobalto para formar óxidos del

mineral añadido y formar la pasta. Posteriormente se sigue similar proceso que con los pigmentos naturales hasta obtener tamaños de partículas que no superan la micra.

El tamaño y forma de las partículas de pigmento es fundamental para la ejecución de hormigones. Observadas a microscopio de 30 aumentos no se aprecian diferencias entre los diferentes tipos de pigmentos. Sin embargo, en solución acuosa y estudiándolas a 1000 aumentos se comienzan a apreciar las diferentes formas y tamaños de las partículas, según a qué pigmento se refieran. Desde formas absolutamente esféricas y correspondientes a las de menor tamaño hasta tamaños mayores y formas prismáticas o incluso punta de flecha o de aguja para otros pigmentos. Es necesario mayor aumento de microscopio para apreciar con mayor exactitud lo anterior. La tesis de Pérez ahonda profundamente en este campo y de este trabajo nos hemos guiado para los hormigones de altas prestaciones pigmentados - HAPP -.

Esta forma y tamaño de los pigmentos es fundamental a la hora de ejecutar las dosificaciones puesto que influye de manera cardinal en la relación agua/cemento, en la consistencia y en el resultado de fluidez, resistencia mecánica y otros que son derivados de aquella. También influyen cada uno de los pigmentos en las cualidades estéticas superficiales del panel de fachada prefabricado.

3.3. ÁRIDOS PARA HORMIGÓN EN CANARIAS

Dicho queda en el comienzo del apartado anterior lo imprescindible que resulta estudiar el caso de los áridos canarios para hormigón en un apartado diferente pero extendido a la vez. De esta reflexión es muestra significativa la tesis doctoral de Guigou Fernández dedicada a cómo influyen las características petrográficas de los áridos canarios en las propiedades de los hormigones. Este autor ha profundizado en este y otros aspectos del hormigón en Canarias.

Los áridos son las piedras de tamaño reducido de uso en la construcción. Para la fabricación de hormigones pueden emplearse arenas y gravas existentes en yacimientos naturales, rocas machacadas o escorias siderúrgicas apropiadas (EFHE, 2001, p. 74). No hay duda de la importancia que tienen los áridos a la hora de confeccionar un hormigón. No sólo producen un abaratamiento del coste, sino que son necesarios para contrarrestar la disminución de volumen del hormigón al evaporarse el agua contenida en los huecos capilares. Se trata de un componente trascendental pues representa, en general, más del 60% del peso del producto. No se puede nunca desestimar las características de los áridos en el resultado terminado del hormigón. Tanto la naturaleza petrográfica como su morfología incidirán de manera crucial en las características del hormigón en estado fresco como la docilidad, fluidez o bloqueo y de sus características en estado endurecido como la resistencia, permeabilidad o durabilidad.

Por otra parte, son conocidas las características extremas de nuestro paisaje, encontrando en pocos kilómetros cuadrados diferencias muy sustanciales en cuanto a climatología, naturaleza, incluso geomorfología. La conformación geológica de nuestras islas fue relativamente reciente y muy brusca. Se produjo una emanación de lavas desde mucha profundidad en el magma y estableció determinantes diferencias entre las rocas encontradas con muy poca distancia entre ellas (GUIGOU, 1990).

La naturaleza volcánica de las Islas Canarias confiere a nuestro suelo y subsuelo unas características singulares. De nuestro subsuelo extraemos las rocas para convertirlas en áridos de construcción. Con este antecedente, nuestros áridos presentan una dificultosa manejabilidad debido a la ambigüedad de sus características, obteniendo unos muy diferentes pesos específicos a los áridos utilizados en el continente. Además encontramos diferencias de peso específico entre las fonolitas, los basaltos y otros tipos de roca propios de canteras en nuestras

islas (GUIGOU y HERNÁNDEZ, 1999). También otros investigadores canarios en la actualidad, respecto de nuestro hormigón reconocen que debido a la forma del árido estamos obligados a emplear mayores cantidades de agua para un descenso de cono acorde con una trabajabilidad de la masa (MELIÁN y NELSON, 2004).

- Los áridos de uso común en Canarias:

El basalto, la fonolita o los piroclastos son los áridos que se han empleado principalmente en la confección de hormigones canarios. También estas rocas tienen unas características petrográficas muy diferentes. No sólo el peso específico citado, sino que también la variación en la composición química es muy acentuada, partiendo desde extremos básicos - basaltos -, pasando por rocas de composición intermedia - traquibasaltos -, hasta abarcar rocas sálicas - fonolitas y traquitas - (GUIGOU, 1990). Pasamos a continuación a hacer una breve descripción de algunas de estas rocas canarias (las que se emplean habitualmente como áridos de hormigón), lo que nos dará una idea de cuan extremas son sus características:

- Basaltos: Los basaltos son las rocas canarias menos evolucionadas que provienen directamente de magma básico. En los basaltos existe una gran variedad estructural debido a la temperatura de fusión y al contenido de materias volátiles, originando materiales de viscosidad muy variable. Esta viscosidad en su estado eruptivo le confiere posteriormente una variabilidad en su porosidad, encontrando piedras muy compactas o con un elevado número de poros. En relación a su mineralogía, los basaltos contienen un alto porcentaje de feldespatos plagioclasa (labradorita) y de componentes máficos (olivino y piroxeno). Los basaltos son predominantemente oscuros con un color característico gris-negro. El basalto presenta una alta densidad comprendida entre 2,9 y 3,1. La resistencia mecánica a compresión alcanza valores altos por encima de los 100 MPa. Desde el punto de vista químico, los basaltos son inertes, aunque en Canarias existen excepciones, cuya fase de

alteración los convierten en inservibles para la producción de hormigón. Presenta también una alta resistencia al desgaste.

- Fonolitas: Las fonolitas son rocas que provienen de erupciones muy efusivas. Las fonolitas presentan un peculiar sonido a timbre metálico al golpearlas. Esto se debe a su conformación laminar, que también propicia su separación en lajas. La roca fonolita es rica en feldespatos, con un bajo contenido en sílice y emparentados con los feldespatos. Poseen una densidad general de 2,65; siempre menor que el basalto. Se emplea tanto para aplacado en forma de lajas como para composición de hormigón como árido. Presenta menos dificultad que el basalto a la hora del machaqueo puesto que tiende a romper por sus lajas. Como granos para áridos presenta una deficiente forma relacionada con las lajas o con las agujas. Químicamente también es inerte.

Hasta las últimas décadas era posible extraer cantidades comerciales de arenas y áridos naturales en canteras situadas en Canarias. La necesaria perspectiva actual de conservación de la naturaleza y la delicada morfología de nuestros paisajes prohíben esta tendencia. La geomorfología de Canarias no puede ser alterada sin que genere daños paisajísticos y erosionadores del suelo. De esta manera, la práctica totalidad de los áridos grancanarios que se emplean para la confección del hormigón actual son de naturaleza basáltica o fonolítica. Incluso podemos especular acerca de una tendencia hacia el uso de áridos fonolíticos. Esta puntualización responde a la evolución desde el comienzo de la pasada década donde se utilizaban con asiduidad basaltos y fonolitas como áridos (GUIGOU, 1990).

Como resultado de lo dicho, nuestros áridos se obtienen mediante la extracción artificial con medios mecánicos de voladura y machaqueo. Estos áridos actuales son mayoritariamente de naturaleza fonolítica. Presentan deficientes coeficientes de forma y contenido alto e irregular de finos, muy distinto a los redondos, regulares y limpios áridos naturales de río que podemos encontrar en el continente europeo.

En Canarias, los coeficientes de forma de la fonolita machacada son generalmente más bajos del límite del 20% fijado por la EFHE. Por otra parte, es significativo observar como en una fracción de árido 10/20 se verifican retenciones por encima de 20 y también por debajo de 10. Con las arenas, también de machaqueo, el problema se agudiza. Éstas presentan un contenido en finos excesivo que redundan en una nefasta influencia para la resistencia y calidad de la pieza, así como en una desecación y consiguiente fisuración de la pieza. Es imprescindible para un hormigón que pretenda alcanzar altas resistencias en Canarias que la arena resulte de una mezcla que mantenga su gráfica dentro del uso prescrito por la Instrucción y que el módulo granulométrico arroje un valor un poco mayor de 3, nunca menor (GUIGOU, 2004). Además de esto, hay que prestar mucha atención a la variabilidad del módulo en las diferentes partidas de arena como consecuencia del proceso de machaqueo. Queda como reflejo un ejemplo real de una variación del 25% en el módulo granulométrico de diferentes partidas del mismo material que arrojan unas mermas en las resistencias del orden del 18%.

- La composición granulométrica del árido canario:

El autor Guigou nos presenta el problema que supone abordar la composición teórica de áridos para un hormigón en Canarias. Nos dice que es extremadamente comprometida, dado que por un lado, en la resolución del problema se emplean datos provenientes de la bibliografía especializada extranjera o nacional, abstrayéndose de la inadecuación que, en general, nuestros áridos presentan al respecto. Este autor nos expone los aspectos problemáticos que debemos plantearnos con respecto a los áridos en Canarias (GUIGOU, 1990):

- En los áridos gruesos coexisten diversos y deficientes coeficientes de forma que se presentan tras la extracción artificial.

- Ante la escasez de arenas naturales y obtenidas, por tanto, con procedimientos de machaqueo, los módulos granulométricos que presentan son insuficientemente aceptables, además de variables.
- En los áridos y arenas de barranco (cada vez menos frecuentes estas últimas), el contenido en finos y materias terrosas es relativamente alto y apenas cumplen con los límites exigidos por la norma.
- Además, esta incertidumbre se ve acrecentada con la ausencia de datos fiables, consecuencia de los escasos medios de control de calidad con que cuentan nuestras islas.

Nuestro equipo de investigación considera que entre las materias perjudiciales destacamos el contenido en finos, cuyo exceso en las arenas tantos problemas ha acarreado al hormigón resultante – bajas resistencias, notables fisuraciones por retracción hidráulica debida a la alta velocidad de desecación, continuo desprendimiento de polvo por escasa resistencia a la abrasión, ... -.

Es obvio que la forma y tamaño de los áridos influye sobre la calidad y resistencia del hormigón. Se puede augurar en general que con áridos de machaqueo como los basálticos y fonolíticos se podría propiciar la obtención de hormigones muy resistentes - a compresión y tracción -, debido al rozamiento entre los granos y a la rugosidad de su superficie, que mejora la adherencia pasta-árido. Esto incluso aunque requiera más pasta para envolver su superficie que un árido rodado, pues su superficie específica es superior. Sin embargo, para una alta resistencia influye en mayor grado una baja demanda de agua que se consigue con áridos que presenten el mínimo rozamiento entre sí. Esto quiere decir que los áridos redondos y/o lisos son más adecuados que los angulosos y/o rugosos porque requieren menos agua. En este sentido, el autor Sandor Popovics nos escribe que “por lo que respecta a la forma de las partículas, la principal objeción a una excesiva cantidad de partículas planas o alargadas en el árido es su efecto

perjudicial para la trabajabilidad del hormigón, y la consiguiente necesidad de mezclas más altamente dosificadas de arena, lo que implica el empleo de más cemento y agua. (...) El efecto directo de la granulometría en la resistencia del hormigón aparece como secundario con el efecto indirecto a través de la cantidad necesaria de agua de amasado y la trabajabilidad. A este respecto, una granulometría es óptima cuando produce la trabajabilidad requerida con un mínimo de agua." (POPOVICS, en GUIGOU, 1990).

Sin embargo y para esto, con un árido de machaqueo debemos alcanzar una aceptable compacidad en su composición granulométrica, procurando una superficie específica mínima. En los áridos canarios existen irregularidades granulométricas ya descritas como son sus bajos coeficientes de forma, sus anormales retenciones en diversos tamices de una fracción supuestamente monogranular, sus excesivos contenidos en finos, que difícilmente hacen fiables determinados métodos basados en premisas muy concretas, que acotan su aplicación. Para hormigones convencionales, tal es el método de Fuller, adecuado a secciones normalmente armadas, para árido redondeado, con un tamaño máximo de 50 (± 20 mm) y con dosificaciones superiores a 300 Kg/m³ de cemento.

Bolomey admite unas menores retenciones en los tamices primeros de la serie respecto a Fuller. Esto lo hace más factible en la compensación de áreas de defecto y exceso entre las curvas de referencia y composición, arrojando una postura más concordante con la realidad granulométrica de nuestros áridos (GUIGOU y HERNÁNDEZ, 1999). Bolomey plantea la fijación del contenido de cemento, por lo que inmediatamente conoceremos el porcentaje que del mismo entra en el volumen real de áridos. Obteniéndose la cantidad de agua en función de la consistencia, tamaño máximo y tipo de árido. Posteriormente al obtener la cantidad de agua precisa en cada caso, se deben observar las correcciones prescritas por Bolomey en sus tablas al efecto, regulándose finalmente, mediante amasadas de prueba.

En lo que a este apartado se refiere y para nuestra investigación, es evidente que la consistencia no sólo depende de la cantidad de agua añadida en la mezcla y del aditivo, sino también del tipo de árido y de su tamaño. Como sabemos, un árido rodado requiere para una consistencia determinada una menor cantidad de agua que un mismo tamaño de árido triturado. Asimismo, una dosificación que parte de un tamaño máximo superior requiere una menor cantidad de agua, además de pasta, que si se ejecutara partiendo de un tamaño máximo inferior. Lo mismo podemos deducir al afirmar que a igual cantidad de agua (independiente del superfluidificante) un árido rodado tendrá una consistencia más fluida que un árido picado.

- Otros datos inherentes al árido canario (humedad, absorción de agua, resistencia mecánica y estabilidad química):

Además del conocimiento referente a la realidad granulométrica del árido canario, existen otras variables relativas al árido que pasamos a enumerar en el siguiente listado (GUIGOU, 1990):

- La humedad en las arenas canarias es muy variable debido por una parte a un ambiente húmedo además de una climatología cambiante y por otra parte al insuficiente control de ejecución y almacenamiento de las materias primas del hormigón. Esta humedad de los áridos afecta a las dosificaciones en peso de cada material en el hormigón, puesto que los sólidos húmedos pesan más que los secos. Pero además, si las dosificaciones se hacen en volumen es necesario tener en cuenta el entumecimiento de las arenas, por el que aumentan de volumen aparente cuando están húmedas. Por otro lado, con los áridos húmedos estamos introduciendo una cierta cantidad de agua que hay que descontar del agua prevista en la dosificación.

- Relacionado con el punto anterior, es fundamental conocer la absorción de los áridos, ya que pueden hacer disminuir el agua de conjunto con la que se produce la hidratación química del cemento.
- En general, los áridos canarios para construcción tienen una alta resistencia mecánica a compresión. Este dato es positivo ya que los hormigones de altas resistencias tienden a fracturar por insuficiencia del árido. En este sentido, un árido con una alta resistencia mecánica conseguirá mejor resultado igualando el resto de condicionantes. Los bajos coeficientes de desgaste son indicadores de altas resistencias mecánicas y de buena durabilidad del hormigón frente al rozamiento. Este segundo aspecto también nos interesa dado que los paneles podrían estar sujetos a golpes o rozaduras propias de una fachada prefabricada.
- Como sabemos, los áridos de hormigón deben ser inertes y no tener ninguna actividad química, atacar al cemento o propiciar la corrosión de lo armados. Deben estar limpias de materia orgánica o arcilla, para que no provoquen mermas de resistencias, adherencias del árido o variaciones de volumen. En este aspecto, los áridos fonolíticos cumplen con todas las exigencias establecidas. Por otra parte, con respecto al árido basáltico de barranco se debe atender a las posibles adherencias de arcillas, teniendo en cuenta que cada vez se utiliza menos en su versión de arena.

3.4. CONSIDERACIONES ACERCA DEL HORMIGÓN EN CANARIAS

A la vista de las referencias consultadas y del texto expuesto, entendemos que en una caracterización del hormigón canario siempre deben aparecer, por una parte, las peculiaridades del cemento puzolánico habitual en nuestras Islas. En este aspecto, se observa que cumple su función y destacamos un requerimiento alto de agua además de la atención al curado prolongado y suficiente de agua, para evitar

la desecación y fisuración. Por otra parte, el aspecto más importante del hormigón canario son sus deficientes áridos. Tanto su forma, como su módulo granulométrico rayan los límites admisibles. Además, el alto contenido en finos también incumple con frecuencia los reglamentos establecidos. Extendemos como resumen un listado de consideraciones a las que se debe prestar atención durante la ejecución y análisis de los ensayos particulares, así como las recomendaciones que debemos tener en cuenta para hormigones pigmentados canarios en fachada:

- Hormigón Convencional - HC -:

- En general, con los cementos puzolánicos de las Islas se cumple con las exigencias para cementos de endurecimiento normal, aún a pesar del efecto retardador que a edades tempranas propicia la puzolana, máxime teniendo en cuenta las apreciables cantidades que de esta roca se adicionan al cemento Pórtland en nuestras Islas.
- Con áridos fonolíticos se consiguen peores evoluciones con dosificaciones de arena monogranular, siendo ésta de machaqueo, lo cual se debe por un lado, al contenido en polvo de esta arena, que acelera la desecación temprana de la masa dificultando la acción puzolánica y por otro al defectuoso coeficiente de forma del árido, dotado de excesivos componentes lajeados y carente de granos dóciles. Las mejores evoluciones se consiguen con arena mezcla de dos tamaños, uno fino natural y otro grueso de machaqueo.
- En relación al coeficiente de forma, y atendiendo a la fecha en que fue realizado y a su normativa de aquel momento, el árido fonolítico 5-10 con coeficiente 0,10 no cumple con las prescripciones de la anterior instrucción EH-88. En general el resto de nuestros áridos cumple con la limitación 0,15 de la misma pretérita norma (GUIGOU, 1990).

- También con respecto a la granulometría, así como a la misma fecha y normativa (no vigente en la actualidad) donde se prescribía la limitación del 6% de paso de finos por el tamiz 0,080 UNE 7050, respecto al total de la muestra de arena, podemos decir que nuestras arenas incumplen con la limitación del contenido en finos prescrita por aquella instrucción. Su influencia en la evolución resistente del hormigón es notable, máxime con nuestros cementos puzolánicos, cuya velocidad de desecación propicia una deficiente hidratación del cemento. Además, la variación del módulo granulométrico de la arena de machaqueo precisará reajustes granulométricos, que conducirán a mejoras resistentes con la misma cantidad de cemento (GUIGOU, 1990).
- Se desaconseja el empleo de una sola fracción de arena en la masa, máxime si ésta es de machaqueo. La combinación de arena amarilla y de machaqueo ha arrojado los mejores resultados en las investigaciones del profesor Guigou. En cuanto a la resistencia a compresión del hormigón, la arena de machaqueo como única fracción fina perjudica más la resistencia a compresión del hormigón fonolítico que la del basáltico.
- **Hormigón de Altas Resistencias - HAR -:**
 - Con el hormigón aditivado se comprueba una mayor velocidad de desarrollo de las resistencias tempranas (7/28 días), con respecto al hormigón sin aditar, por otra parte se verifica una atenuación de esta velocidad a edades avanzadas (28/90 días) (GUIGOU, 1993).
 - Se han alcanzado en la laboratorio de la ETSALP resistencias superiores a 70 MPa con cemento de adición puzolánica de clase resistente 32,5 con adición de microsílíce y superfluidificante (GUIGOU, 2004).

- Se ha desestimado la opción de realizar un hormigón de 100 MPa para una obra singular - El Arco de Los Tilos, en La Palma - debido a la resistencia a compresión simple del árido (basáltico). En esta obra, sí se ha conseguido 75 MPa a los 28 días (PÉREZ-FADÓN y HERRERO, 2002).
- Hormigón de Altas Prestaciones - **HAP** -:
 - Empleando superfluidificantes con el estricto objetivo de reducir la cantidad de agua de amasado, sin cambiar el tipo de consistencia blanda elegido como de usual aplicación en nuestros hormigones estructurales (descenso de 6 o 7 cms en Cono de Abrams), se aprecia un beneficioso efecto sobre la resistencia a compresión en los hormigones canarios (GUIGOU, 1993).
 - La obtención de colores pastel obligan el uso de cementos blancos y pigmentos naturales (PÉREZ LUZARDO, 1991).
 - En general, el grado de saturación para los pigmentos artificiales está aproximadamente en el 5% para cementos blanco y en el 7% para cementos grises (PÉREZ LUZARDO, 1991).
 - Al combinar dos colores acaba dominando el de las partículas de mayor tamaño (PÉREZ LUZARDO, 1991).
 - Para alcanzar una correcta trabajabilidad de la masa con nuestros hormigones y para una consistencia blanda, con medidas de cono próximas a los 7 cms se precisa unas relaciones agua/cemento superiores al límite 0,6 previsto en la anterior instrucción para ambientes normales. En Canarias son habituales las relaciones 0,7 para tamaño máximo 5-10.
 - Empleando superfluidificante con el doble objetivo de reducir el contenido de agua de amasado y de aumentar la fluidez de la masa fresca, se han

obtenido un 10% de disminución de agua paralelo a un aumento de 5 centímetros en el cono de Abrams (GUIGOU, 1993).

- Se hace notar la sensibilidad que frente al cambio de consistencia experimenta el hormigón aditivado ante una leve variación del contenido de agua. En concreto, por variar la relación A/C de 0,58 a 0,60 y con la misma cantidad de superfluidificante se obtienen dos hormigones con Cono = 6 cms y con Cono = 12 cms, respectivamente (GUIGOU, 1993).
 - Aumentando el superfluidificante por encima de lo prescrito por el fabricante se ha observado una reducción del agua de amasado en un 22% y alcanzado un cono de 15 centímetros. También las resistencias a compresión han aumentado en torno a un 75% (GUIGOU, 1993).
 - La restricción en la cantidad de agua de amasado por la adición del superfluidificante, reduce ostensiblemente la porosidad capilar de la pasta endurecida, lo que entraña una mejora del aspecto superficial de la pieza hormigonada y una consideración positiva de cara a su durabilidad ante el ataque químico (GUIGOU, 1993).
 - Se debe atender también a las aportaciones próximas de otros investigadores. En concreto, nos referimos a las mejoras en los hormigones canarios en base a las fibras de polipropileno (MELIÁN y NELSON, 2004).
- **Hormigón Autocompactante - HAC -:**
 - Con productos cementicios canarios, además de las investigaciones y aplicaciones en prefabricados de nuestro equipo en hormigón autocompactante (SANTANA, 2004), es esencial considerar la aportación que se hace con la obra del museo Oscar Domínguez (*véase capítulo 2.2*), de los arquitectos Herzog y De Meuron. Acerca de tal obra, desplegamos la dosificación a continuación (DOMÍNGUEZ, 2005):

○ Cemento	370 Kg/m ³ ±2%
○ Clase de cemento	II / A-P 42,5
○ Árido 6-12 (machaqueo)	650 Kg/m ³
○ Arena 0-6 (machaqueo)	750 Kg/m ³
○ Arena 0-2 (natural)	350 Kg/m ³
○ Agua	160 litros/m ³
○ A/C	0,43
○ Superfluidificante (<i>Melcret CX - Degussa</i>)	4 litros/m ³
○ Consistencia	9 cms

Continuando con esta mezcla, a la llegada a obra se ajusta la consistencia (DOMÍNGUEZ, 2005):

○ Superfluidificante	1,8% c.
○ Pigmento (negro)	5% c.
○ Consistencia final	24 - 27 cms ≈ (torta de 60 cms).

El vertido se realiza como hormigón bombeado y con planteamientos que indican el cuidado que se ha prestado en el proceso de hormigonado. Por otra parte, es significativo el hecho de que no se mencionen datos de resistencias, con lo que se muestra que son otras prestaciones las que más importan en esta ejecución. Nos referimos a las prestaciones estéticas de una fachada. En este punto, es compartido con nosotros el mismo planteamiento.

Todas estas consideraciones se verán reflejadas en los planteamientos de cada uno de los pasos del programa experimental de esta tesis.

BIBLIOGRAFÍA PARTICULAR DEL CAPÍTULO 3

• CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN EN CANARIAS

CALAVERA RUIZ, J; ALAEJOS GUTIERREZ, P; GONZÁLEZ VALLE, E; FERNÁNDEZ GÓMEZ, J y RODRÍGUEZ GARCÍA, F. (2004): *Ejecución y control de estructuras de hormigón*. Editado por INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones).

CALAVERA RUIZ, J; LÓPEZ SÁNCHEZ, P; FERNÁNDEZ GÓMEZ, J; GONZÁLEZ ISABEL, G. y PÉREZ LUZARDO, J. M. (1999): *Aspectos Visuales de Hormigón*. Madrid. Monografía nº 3. INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales de Construcción).

DOMÍNGUEZ SURIA, Sinesio (2005): "Características, puesta en obra y acabado del HAC del museo Oscar Domínguez" en *II Curso de Tecnología del Hormigón en la edificación y la obra pública*. La Laguna.

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (1990): "Influencia de las características petrográficas de los áridos canarios en las propiedades de los hormigones" (Tesis Doctoral). Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Las Palmas.

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (1993): *Dosificación de hormigones con aditivos superfluidificantes*. Colección Temas de Construcción num. 6. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (2002): "El hormigón como material de estructura y acabado", en *Temas de Construcción*. Las Palmas de Gran Canaria. (Inédito).

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (2002): "Ideas para la mejora de durabilidad y resistencia de los hormigones confeccionados con componentes de Canarias" en *Tecnología de hormigones de altas prestaciones y su aplicación en Canarias*. Santa Cruz de Tenerife y Las Palmas de Gran Canaria.

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (2004): "El hormigón fresco como inductor de las propiedades del hormigón endurecido" en *I Curso de Tecnología del Hormigón en la edificación y la obra pública*. Las Palmas de Gran Canaria.

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos y HERNÁNDEZ DÉNIZ Juan Francisco (1999): "Dosificación del hormigón", en *Construcción I; Materiales y técnicas de construcción*. Las Palmas de Gran Canaria. (Inédito).

HERRERO BENEÍTEZ, José Emilio (2005): "El hormigón de alta resistencia en el arco de Los Tilos" en *II Curso de Tecnología del Hormigón en la edificación y la obra pública*. La Laguna.

JIMÉNEZ MONTOYA, Pedro; GARCÍA MESEGUER, Álvaro y MORÁN CABRÉ, Francisco (2000): *Hormigón Armado. 14ª Edición basada en la EHE*. Barcelona.

MELIÁN MARRERO, Gonzalo y FLORES MEDINA, Nelson (2004): “Mejora de las condiciones físicas y mecánicas de hormigones con fibras de polipropileno” en *I Curso de Tecnología del Hormigón en la edificación y la obra pública*. Las Palmas de Gran Canaria.

PÉREZ LUZARDO, José Manuel (1991): “Color y textura en el hormigón estructural” (*Tesis Doctoral*). Departamento de Construcción Arquitectónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

PÉREZ-FADÓN, Santiago y HERRERO, José Emilio (2002): “El arco de Los Tilos en la isla de La Palma” en *Tecnología de hormigones de altas prestaciones y su aplicación en Canarias*. Santa Cruz de Tenerife y Las Palmas de Gran Canaria.

POPOVICS, Sandor; *Efectos del árido sobre ciertas propiedades del hormigón de cemento Pórtland*. Univ. De Auburn, Alabama. EEUU.

SANTANA RODRÍGUEZ, Ricardo Javier (2004): “Características y propiedades de los hormigones autocompactantes y su aplicación en Canarias” en *I Curso de Tecnología del Hormigón en la edificación y la obra pública*. Las Palmas de Gran Canaria.

CAPÍTULO 4:

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

Una vez analizadas en la sección anterior las propiedades del hormigón canario y definido el punto en el que se encuentra el conocimiento del producto cementicio de uso común en Canarias, en el presente capítulo se exponen los aspectos vinculados a la campaña experimental. Alcanzado este punto de madurez en la investigación, en donde hemos identificado la actual situación evolutiva del hormigón en el ámbito internacional –recordemos los hormigones de altas prestaciones y el hormigón autocompactante-, se presenta ahora factible la posibilidad de poder constituir, a partir del hormigón actual en Canarias, uno nuevo que constituya un avance en la ciencia y en el estado del saber de nuestro material de trabajo.

Explicaremos primeramente los objetivos y expondremos nuestro programa experimental. De esta manera, el inicio de este trabajo está marcado por la propuesta experimental para la caracterización de los elementos constituyentes del hormigón de trabajo, incidiendo de manera conciente en los áridos. Posteriormente describiremos la metodología aplicada en el diseño de la mezcla así como en los tipos de ensayos efectuados. En este paso descubriremos que nos interesa especialmente el comportamiento del hormigón en estado fresco, en especial sus características reológicas, pero siempre sin obviar el resto de sus propiedades físicas y mecánicas.

En este capítulo se relacionarán todas las normas específicas aplicadas, la metodología de dosificación, los procedimientos de ensayos, los equipos de laboratorio que se emplearon tanto en la campaña de metodología de diseño de dosificaciones como en los ensayos de comprobación del hormigón creado. También se muestra en este capítulo el tratamiento de la información producida y la forma de obtención de resultados.

Las etapas experimentales necesarias para poder verificar los objetivos de esta investigación han sido divididas en el presente capítulo en los apartados que a continuación se detallan. Esta división responde a una sencilla secuencia lógica de actuación:

1. Objetivos de la investigación.
2. Exposición de la campaña experimental.
3. Método de diseño de dosificaciones.
4. Procedimiento de ensayos aplicados.
5. Equipos para la fabricación de hormigones y de los métodos de ensayo empleados, además del tratamiento de información producida por éstos.

4.2. OBJETIVOS Y EXPOSICIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

En determinados momentos de nuestra profesión de arquitecto en Canarias nos hemos dado cuenta de lo alejados e insularizados que nos encontramos. A pesar de saber acerca de evolucionados materiales de construcción a través de las revistas que manejamos, conocemos la realidad de qué éstos no se encuentran disponibles en nuestro ámbito de trabajo. Ya sea por el natural aumento económico que supone su importación o simplemente porque no existe posibilidad de traerlos, la ejecución de obras de construcción en Canarias parece seguir siendo igual que hace veinte años. En este mundo globalizado, donde es posible conseguir de todo, ya sea de EE.UU., Madrid o China, donde cualquier producto tecnológico de última generación está disponible en apenas unos días, todavía sigue suponiendo una dificultad proporcionarnos los materiales y las técnicas de construcción más avanzadas.

El hormigón siempre ha constituido una de nuestras más importantes carencias en tanto que a materiales de construcción nos referimos. Sí que tenemos hormigón desde hace mucho tiempo, pero éste no tiene iguales características que el que se produce en Europa.

El principal objetivo de nuestra investigación es la aplicación en Canarias del estado evolutivo que tiene el hormigón a nivel internacional. Se trata de un objetivo ambicioso que intenta abarcar todo el campo del hormigón en nuestras Islas. Evidentemente, en un intento de presentar conclusiones ha de limitarse en su extensión, dejando para futuras investigaciones la continuación del mismo.

La diferencia esencial entre el hormigón de uso común en Canarias y el hormigón de última generación a nivel internacional son las prestaciones que ofrece cada uno. Sin entrar a repetir cuáles son, puesto que ya han sido tratadas ampliamente en capítulos anteriores, hemos seleccionado la autocompacidad puesto que representa “el desarrollo más revolucionario de las últimas décadas en el campo de la construcción con hormigón” además de una característica que ofrece múltiples prestaciones (www.efnarc.org). Por tanto, nuestro segundo objetivo esencial supone conseguir un hormigón autocompactante, esto es, de altas prestaciones con hormigón canario.

El hormigón canario lo entendemos como producido con materiales de Canarias o habitualmente de uso en las Islas. Los materiales primordiales de nuestras islas serán el cemento, el agua y los áridos, entendiendo que tanto los aditivos como las adiciones podrán incorporarse desde el exterior. Esta premisa se justifica debido a que la cantidad necesaria para cada dosificación de aditivo o adición no es significativa en comparación a la del resto de materiales constituyentes. Otra determinación será la de usar estos productos básicos como actualmente se ofrecen en el mercado, es decir, que no entramos a solucionar las contrariedades que puedan ofrecer los áridos o el cemento puesto que sería originar otro producto.

Sabemos que es una tarea dificultosa por la inadecuación que poseen nuestros áridos y cemento para la composición idónea teórica de un hormigón determinado (GUIGOU, 1999).

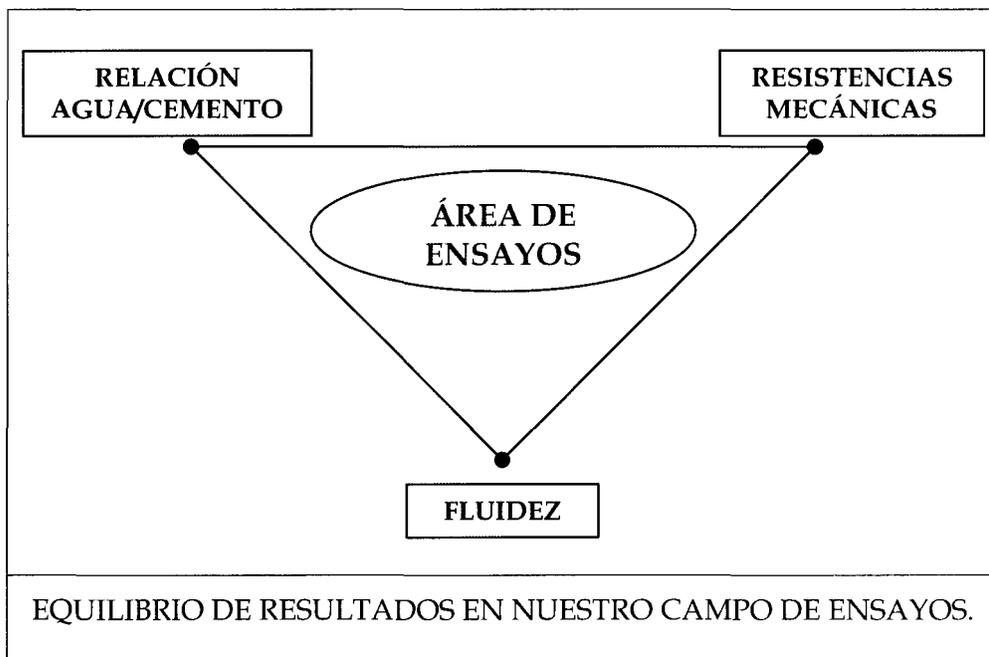
Por otra parte, hemos pretendido siempre en nuestro trabajo una referencia teórica sólida para una aplicación práctica útil. En este sentido, hemos escogido al prefabricado puesto que refleja un tipo de construcción de futuro (VAN ACKER, 2002). Además en este campo, seleccionamos el panel de fachada que representa la cara vista del edificio prefabricado. En definitiva, un tercer objetivo es cualificar a partir de prestaciones obtenidas desde el propio material al panel prefabricado de hormigón.

Otros objetivos que vienen aparejados a los citados anteriormente son:

- Conocer la aptitud de los áridos utilizados en Canarias para la fabricación de hormigones de última generación.
- Indagar en la influencia de los cementos puzolánicos para la fabricación de hormigones de altas prestaciones.
- Atribuir el influjo de los superfluidificantes en la relación agua/cemento para el caso de Canarias.
- Examinar la atribución de las adiciones minerales y pigmentos en este hormigón de altas prestaciones.
- Ofrecer métodos aplicados para el diseño de dosificaciones y procedimientos de ensayos con hormigones de altas prestaciones.

Éstos y otros colaterales que surgen a lo largo del desarrollo de esta tesis se dejan a la espera de futuras investigaciones más específicas que ahonden en los mismos. De esta manera, en nuestra campaña experimental, surge un muy extenso número de ensayos realizados que responden a los apartados siguientes:

1. Caracterización del hormigón base -HC- con el que vamos a trabajar. La primera sección que centra el campo de actuación dentro del plan de ensayos consiste en un conocimiento más exhaustivo del hormigón elaborado en Canarias en la actualidad. Detallaremos cada uno de sus elementos constitutivos a través de lo que conocemos por nuestras reseñas acompañados con análisis experimentales. Esta indagación nos permitirá resolver cuestiones iniciales como la granulometría, humedad o absorción de agua que serán clave en el desarrollo de los ensayos y en sus resultados. Asimismo, en este mismo apartado conoceremos también las características específicas de trabajo del hormigón base sobre el que pretendemos evolucionar.
2. Avance hacia el hormigón de altas prestaciones a través del hormigón de altas resistencias -HAR-. En esta segunda secuencia de ensayos avanzamos en un paso intermedio que consideramos imprescindible según fundamentábamos en el capítulo segundo de esta tesis. En esta serie no pretendemos intencionadamente autocompacidad, ni siquiera fluidez, sino la indagación con potenciales materiales constituyentes de posible disponibilidad en Canarias, que proporcionen mejoras en la resistencia y en la relación agua/cemento del hormigón convencional. De esta manera, trabajamos en la búsqueda de un hormigón de altas resistencias -HAR- reduciendo la proporción de agua en la dosificación. Estas dos referencias junto a la fluidez conforman un triángulo de equilibrio que debemos controlar en el desarrollo de estos experimentos.

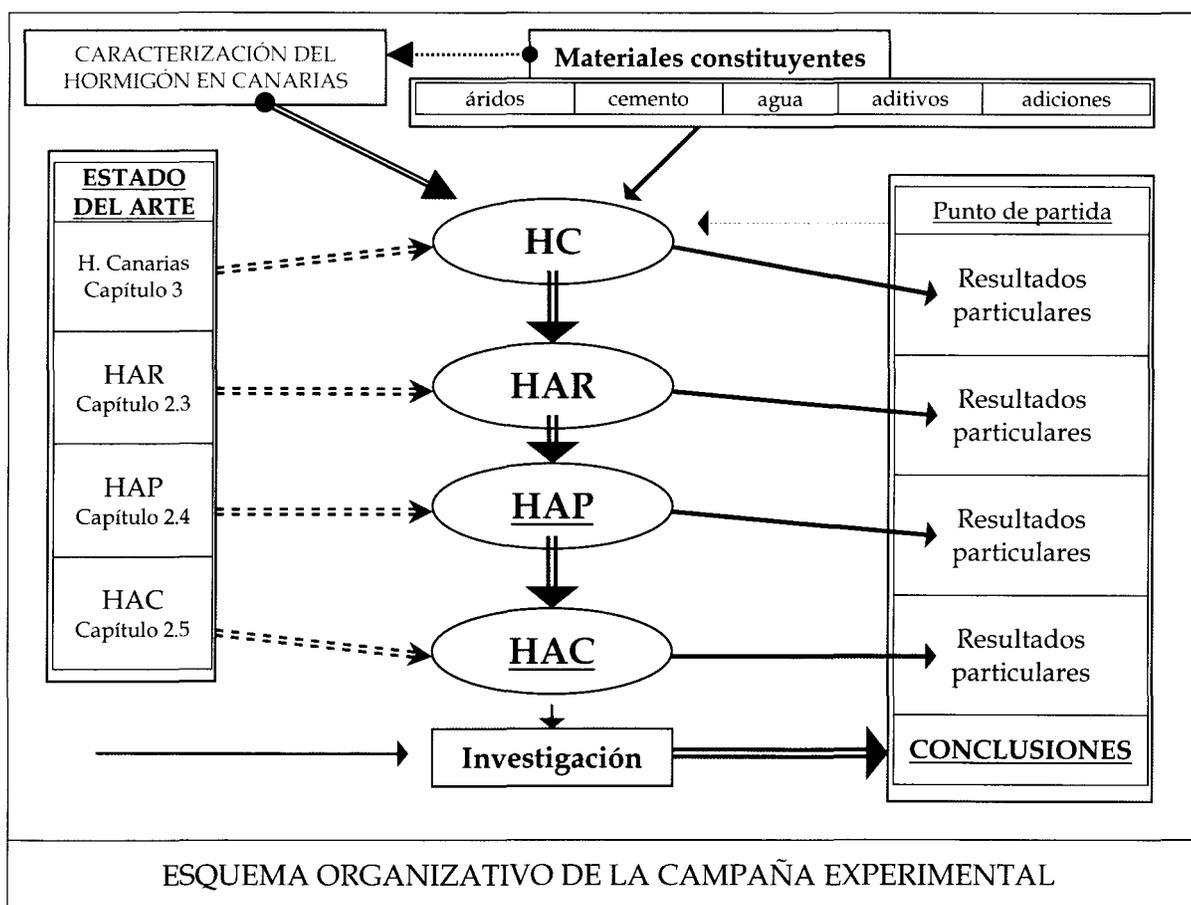


Nuestra área de ensayos se debe encontrar siempre dentro de este ámbito de equidad. Debemos aumentar las resistencias sin disminuir la fluidez y controlando la relación A/C para los HAR y/o aumentar la fluidez sin disminuir las resistencias con la misma moderación para los HAP. Para ayudarnos en este menester es necesario trabajar con superfluidificantes.

3. Condición del hormigón de altas prestaciones -HAP-. En este gran apartado de los ensayos trabajamos hacia la búsqueda de una mayor fluidez vigilada. Dentro de este equilibrio citado y fijando la relación agua/cemento y las resistencias mecánicas en los puntos establecidos, avanzamos hacia la solución. El aditivo superfluidificante es imprescindible en esta trayectoria, pero también lo es igualmente las proporciones y relaciones entre los áridos.
4. Carta de colores con hormigón de altas prestaciones pigmentados -HAPP-. Se elabora paralelamente al apartado anterior una extensa carta de colores con hormigón de altas prestaciones pigmentado. La función de ésta es orientativa con el fin de facilitar la proporción de pigmento requerida para

una tonalidad determinada. El fin último de esta sección es la elaboración de la capa exterior en paneles de fachadas prefabricados con HAP.

5. Cualificación del hormigón autocompactante -HAC-. El último apartado del plan de ensayos examina la autocompacidad. Una vez alcanzado el punto de equilibrio entre la relación agua/cemento, resistencia y fluidez, ahondamos en la caracterización del hormigón autocompactante realizado. Nos referimos en esta sección al armonía entre fluidez y cohesión (GARRIDO; 2004, p. 7). En estos ensayos certificamos la cualidad del autocompacto, es decir, fluidez unida a capacidad de paso y resistencia a la segregación. Presentamos a continuación un esquema de la organización de los ensayos de laboratorio:



4.3. MÉTODO DE DISEÑO

Hemos comentado la razón por la que nuestro plan de ensayos es muy amplio y abarca en términos generalistas desde los hormigones convencionales -HC- elaborados comúnmente en Canarias, pasando por los hormigones de altas resistencias -HAR- y de altas prestaciones -HAP-, hasta llegar a los hormigones autocompactantes -HAC-. Este desarrollo evolutivo ha marcado el método de diseño seguido. Éste se nutre de diferentes referencias desplegadas en la bibliografía de este capítulo cuarto, mientras que en el presente apartado son puestas en práctica mediante un ejemplo. En dicho modelo, que se desplegará a continuación, tratamos nuestro desarrollo evolutivo del hormigón como si de una única mezcla se tratara. Evidentemente, no ha sido una única argamasa con los mismos materiales de partida en todo su desarrollo, sino una sucesión de múltiples ensayos donde hemos experimentado con nuevos elementos en una secuencia lógica de -ENSAYO - EXPERIENCIA - ERROR- hasta conseguir un resultado óptimo en nuestra fase final de comprobaciones. La premisa fundamental inamovible es el empleo de áridos, cemento y agua de común utilización en Canarias.

Para el avance de nuestros experimentos partimos del reflejo de que el hormigón autocompacto es una tecnología que se encuentra en plena evolución (www.efnarc.org). Este dato nos supone estar siempre pendientes de la nueva ciencia que se va generando, atendiendo a que hoy por hoy ésta se desarrolla de manera muy intensa debido a los congresos, ponencias, Internet y toda la comunicación veloz del mundo. Además sabemos por nuestra lectura que los métodos de dosificación son distintos de los tradicionalmente empleados en hormigón convencional. En este aspecto, resaltamos las dificultades inherentes a nuestra insularidad y lejanía de Europa. Esta circunstancia nos ha llevado a un importante esfuerzo en nuestro contacto con científicos e instituciones técnicas de

reconocido prestigio en Europa que nos han apoyado en nuestro aprendizaje (BWI Congress 2002 y BWI Congress 2003 -Colonia-, INTEMAC -2005, Madrid-, Universidad técnica de Viena -2005-, Beton Bau -2006, Graz-).

Queda claro que tanto en el caso de los HAR como en el de lo HAP los procedimientos de elaboración tienen poco a nada que ver con los habitualmente utilizados en el hormigón convencional. Llegados al momento de la campaña experimental también podemos concluir “que se deduce tras una cuidadosa lectura de la información disponible que no existe un método directo para efectuar el estudio de dosificación de un hormigón de alta resistencia” (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993, p. 13). Este dato unido a la singularidad del hormigón en Canarias ya desarrollada nos sugiere que el camino correcto de trabajo es el de las prácticas continuadas en laboratorio.

Por otra parte, sabemos que los métodos habituales de dosificación como Fuller, Bolomey, De la Peña y otros no son adecuados. En nuestro caso para los hormigones de altas prestaciones y autocompactantes deben estar fundamentalmente basados en ensayos empíricos (GETTU y AGULLÓ, 2004, p. 59). Otras referencias también ponen de manifiesto que uno de los principales obstáculos que encontraremos en la aplicación de HAC es el desarrollo de procedimientos racionales de dosificación (IECA LEVANTE, 2003, presentación). Otros autores también son de la misma opinión y lamentan que el desarrollo de los procedimientos operativos de dosificación es una de las principales dificultades del HAC (GARRIDO, 2004, p. 7). Nosotros entendemos que esta difícil evolución se complicará aún más con nuestros materiales naturales de trabajo.

Todos los ensayos han sido realizados en el Laboratorio de Materiales del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. En cada combinación se han ejecutado un número variable de probetas en función de los diferentes ensayos y maquetas elaboradas. Estos

modelos se han ejecutado atendiendo a la comprobación de las prestaciones que eran capaces de ofrecer. Las prestaciones, como se ha desarrollado en el capítulo correspondiente a los HAP, atienden a la docilidad y trabajabilidad, resistencias mecánicas, impermeabilidad y durabilidad, aspectos estéticos y otras consideraciones. Salvo excepción, la mezcla se ha sometido a diferentes ensayos de autocompacidad, según directrices de la EFNARC, Normas italianas UNI en desarrollo y posteriormente elaborado probetas cilíndricas para ensayos mecánicos a compresión a las edades de 24 horas, 7 días, 28 días y 90 días, según normas UNE. Estas normas y directrices quedan desplegadas en el Anexo B.

4.3.1. Hormigón convencional -HC-

Ante estos condicionantes de partida hemos decidido iniciar las prácticas con la caracterización del hormigón base. Entendemos este hormigón de partida como el de uso común en Canarias y lo denominamos *hormigón convencional -HC-*. Esta nomenclatura aparecerá como referencia en cada uno de nuestros ensayos para dosificaciones de este grupo.

Hemos desarrollado un subapartado dedicado a cada uno de los elementos constituyentes: los áridos, el cemento, el agua, los aditivos y las adiciones, donde detallamos sus propiedades específicas. La segunda parte estudia una serie de dosificaciones frecuentes con estos elementos que se pueden considerar como estándares en nuestra región. Nuestro hormigón convencional -HC- es un hormigón constituido a base de áridos de machaqueo de condición fonolítica, cemento puzolánico y agua de abasto. El árido procede de una cantera situada en el sureste de la isla de Gran Canaria. El sistema de obtención de la materia prima es a base de voladura y rotura secuencial por medio de procedimientos mecánicos. Desplegamos toda la información necesaria para el conocimiento exacto del material a través de diversas fichas, así obtenemos la composición química,

mineralógica, peso específico, absorción de agua y otros fundamentos que lo clasifican desde el punto de vista normativo. Paralelamente realizamos ensayos en laboratorio para determinar granulometrías y los datos determinados que nos ayudan a fijar las futuras dosificaciones. El cemento utilizado es también de común uso en Canarias; se trata de un cemento pórtland con puzolana. El agua es la de abasto y cumple con las exigencias impuestas por la normativa.

El método de dosificación de nuestro definido como hormigón convencional - HC- se basa en el conjunto de recomendaciones del Comité 211 del A.C.I. (American Concrete Institute) que es aplicable a hormigones tradicionales que abarcan un amplio campo de posibilidades (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993, p. 85):

- Resistencia a compresión, MPa..... $13 \leq f_c \leq 40$.
- Relación agua/cemento..... $0,41 \leq a/c \leq 0,82$.
- Asiento de cono (mm)..... $25 \leq C \leq 175$.
- Tamaño máximo de árido (mm)..... $9 \leq D \leq 75$.
- Módulo de finura del árido fino..... $2,4 \leq M_f \leq 3,0$.

Otros sistemas de dosificación más habituales en España como el método de Fuller, de Bolomey, De la Peña o Faury establecen procedimientos similares de dosificación. En general, consisten en ajustar la curva de composición de áridos a una curva ideal de máxima compacidad y paralelamente incorporar unas cantidades definidas de cemento y agua que vienen presupuestas en función de la consistencia y tamaño máximo de árido requerido (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993, p. 86).

El sistema que más se aproxima a la realidad de los áridos canarios es el método de Bolomey. El equipo de investigación del Departamento de Construcciones

Arquitectónicas de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria ha subrayado que el método de Fuller es adecuado para hormigones con secciones no fuertemente armadas, con cantidad de cemento superior a 300 Kg/m³ y con áridos redondeados de tamaño máximo comprendido entre 20 y 80 mm. Sin embargo, Fuller origina resultados poco convincentes al aplicarlo a la dosificación de nuestros hormigones canarios. Según este equipo, se debe optar por el método de Bolomey como el más adecuado para nuestras composiciones granulométricas. En concreto, es un método muy apropiado para hormigones en masa, aunque las experiencias con hormigones armados también han sido muy positivas. Para aplicar este método, la cantidad de cemento debe ser un dato de partida, considerado como la fracción más fina del árido y con módulo granulométrico de valor cero ($m_0 = 0$).

El método de Bolomey supone una matización del método de Fuller para ampliar las posibilidades de empleo de éste. Para el caso que nos importa, podemos comprobar que es adecuado para áridos de machaqueo (GUIGOU y HERNÁNDEZ, 1999).

En nuestros ejemplos de dosificación del hormigón convencional, las proporciones relativas a los elementos constituyentes las hemos seleccionado de la práctica común en Canarias. Hemos obtenido una serie de dosificaciones patrón de planta de prefabricados, en fábricas de hormigón elaborado, en documentación técnico-constructiva de proyectos de arquitectura y en ejemplos tipo seleccionados de los que se han comprobado previamente en nuestro laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Las Palmas. Paralelamente, nos hemos guiado del proceso teórico de dosificación que propone Jiménez Montoya para hormigones tradicionales sin aditivos (JIMENEZ, GARCÍA y MORÁN, 2000, pp. 48-59). Además, nos hemos ajustado a las consideraciones que propone el autor Guigou Fernández para Canarias (GUIGOU y HERNÁNDEZ, 1999).

Hemos comenzado a partir de una resistencia mecánica a compresión simple característica “ f_{ck} ”. Ésta debe ser menor que la resistencia media “ f_{cm} ” obtenida en los ensayos de rotura de probeta cilíndrica, según los métodos que se describen en las normas UNE 83.301 e ISO 1920 de definición de probetas y moldes; ISO 2736 de preparación de probetas; UNE 83.303 de refrentado de probetas y UNE 83.304 e ISO 4012 para método de ensayo a compresión, siempre con arreglo a la norma EN 206. Hemos entendido que la resistencia característica viene dada por la siguiente expresión:

$$“f_{ck} = f_{cm} (1 - 1,64 \varphi)”$$

siendo “ φ ” el coeficiente de variación de la población de resistencia. Este valor “ φ ” depende de las condiciones de ejecución y dado que ejecutaremos nuestro hormigón de ensayo en laboratorio y con unas condiciones de control intensas hemos decidido tomar el valor de “ $\varphi = 0,10$ ”, por tanto:

$$f_{ck} = f_{cm} \times 0,836$$

Atendiendo a los materiales de trabajo consideraremos un árido de machaqueo con tamaño máximo 20 mm y de naturaleza fonolítica y unas arenas mixtas natural sedimentaria del Sahara de tamaño 0/2 y otra artificial extraída en cantera de naturaleza fonolítica y tamaño 0/5. El cemento es del tipo II / B-P 32,5 R y del tipo I / A-P 42,5 R. Se aportará una cantidad inicial de 320 Kgs y 350 Kgs de cemento por metro cúbico respectivamente.

Se han tomado seis dosificaciones a modo de ejemplos en planta de prefabricados, fábrica de hormigón elaborado y ejecución de obra con hormigonado “in situ” según campaña de control en ejecución de obras como referencia. A partir de éstas se han ejecutado dos mezclas como modelo de hormigón convencional que ilustra correctamente la fabricación de hormigón tradicional en Canarias.

Estas dos amasadas se han realizado en nuestro laboratorio de hormigones en unas condiciones óptimas de ensayo y se han tomado como valores base a partir de los que comenzamos a evolucionar en prestaciones para el hormigón.

4.3.2. Hormigón de altas resistencias -HAR-

Ni las tablas del A.C.I., ni los métodos apuntados para el caso de España, ni el procedimiento referido para el caso de Canarias son adecuados para dosificar hormigones de altas resistencias -HAR-. En concreto, podemos especificar que los métodos citados no tienen validez para resistencias superiores a 60 MPa, para asentos en el cono de Abrams igual o superior a 175 mm y para valores de relación agua/cemento inferior a 0,3 (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993, p. 86). Por otra parte, la Instrucción de la EHE en su artículo 39.2 tipifica los hormigones de resistencia característica hasta 50 N/mm² (MPa), indicando expresamente que para valores superiores a éste se debe hacer una adecuación oportuna. En el anejo 11 de la misma Instrucción se recogen recomendaciones para su empleo. En éstas se presenta un modelo con las siguientes premisas (EHE, Anejo 11. Título 5º. Art. 68):

- Cemento comprendido entre 400 y 500 Kgs/m³.
- Relación agua/cemento inferior a 0,4.
- Aporte de humo de sílice con un porcentaje adecuado entre el 8% y el 12% sobre el peso del cemento.

Entendemos a partir de este momento que es preciso el desarrollo de métodos adaptados a las características de estos hormigones así como a las peculiaridades de Canarias.

Por una parte, desde 1993 González-Isabel nos describe que la obtención de un HAR es un proceso forzosamente lento, basado en la propia experimentación con los materiales disponibles. Las variables que intervienen son elevadas y las variantes a considerar numerosas. El producto de variables por variantes conduce a un número de combinaciones cuya experimentación es necesaria. Las dosificaciones se deben efectuar a partir de numerosos ensayos de laboratorio y las proporciones resultantes son aplicables a los materiales empleados en los ensayos. También otros autores nos indican una relación de complicaciones si se intenta aplicar aquellos procedimientos tradicionales citados para los HAR (ALAEJOS y FERNÁNDEZ, 2000, pp. 35-37):

- No se conoce con precisión a qué relación agua/cemento corresponde cada nivel de resistencia. Esto es debido a la consistencia adecuada conseguida mediante aditivos químicos.
- En general, para alcanzar resistencias por encima de los 80 MPa es necesaria la utilización de humo de sílice, a pesar de que no queda cuantificada claramente su influencia en la resistencia del hormigón.
- El árido grueso deja de ser una variable del método de dosificación, ya que en la práctica totalidad de los casos se parte de un árido de tamaño máximo 14 mm.
- El árido fino ha de ser rodado para que no se produzca una excesiva demanda de agua en el amasado.
- En la tecnología del HAR es habitual manejar únicamente consistencias fluidas o líquidas, con masas algo pegajosas, con la máxima trabajabilidad pero sin riesgo de segregación.

- Teniendo en cuenta lo expuesto, el contenido de agua necesario en la mezcla va en función de la efectividad y compatibilidad del superfluidificante. Es necesario recurrir a los ensayos de laboratorio.
- Interesa no sobrepasar los 450 kilogramos de cemento por metro cúbico para no tener problemas de hidratación y retracción.
- Para conocer las proporciones de los áridos, se debe entender que las curvas granulométricas tradicionales (Fuller, Bolomey...) no tienen por qué proporcionar buenos resultados en un HAR.

Recapitando acerca del número de incógnitas que se plantean cuando queremos elaborar un HAR -entiéndase también para un HAP- y a pesar de que la bibliografía recoge una serie de dosificaciones específicas aplicadas con éxito, podemos sentenciar que no existe un procedimiento sistemático de dosificación similar al desarrollado para hormigones convencionales (ALAEJOS y FERNÁNDEZ, 2000, p. 38).

Para continuar desarrollando nuestro particular método de dosificación hemos recogido las explicaciones expuestas acerca de las recomendaciones para HAR en el anejo 11 de la Instrucción EHE. En éstas se indican un contenido óptimo de cemento entre 400 y 500 kilogramos por metro cúbico. Por encima de 450 Kgs/m³ se permitiría introducir más agua en el amasado con la misma relación agua/cemento y mejorar la fluidez del hormigón fresco. Nunca se debería superar los 500 kilos en esta misma relación por efectos negativos en el calor de hidratación y la consecuente retracción (ALAEJOS y MARÍ, 2000, pp.318-319).

Atendiendo paralelamente a la experiencia generada por la práctica común de uso del hormigón en Canarias, ya comentada en el capítulo anterior, donde destacamos:

- Uso de cementos puzolánicos.

- Áridos fonolíticos de machaqueo con perjudicial coeficiente de forma.
- Arenas fonolíticas de machaqueo con deficiente forma además de elevada e incontrolada absorción de agua.
- Prohibida relación agua/cemento, muy generalizada por encima de 0,6.

Y además, considerando las investigaciones del Departamento de Construcciones Arquitectónicas respecto a la dosificación de hormigones canarios con aditivos superfluidificantes donde recogemos mezclas de ensayos en laboratorio con los siguientes datos (GUIGOU, 1993, pp. 5-11):

- Contenido de cemento entre 319 Kgs/m³ y 352 Kgs/m³.
- Relaciones de agua/cemento de entre 0,617 hasta 0,745.
- Superfluidificante -*Sikament 200 R*- entre 1,5% y 2,7% del peso del cemento.
- Siempre considerados para áridos fonolíticos de machaqueo con tamaño 5/10 y 10/20, así como arenas naturales y fonolíticas de machaqueo, de tamaño 0/1 y 0/5, respectivamente.
- Con unos resultados obtenidos de resistencia a compresión simple a los 28 días de entre 29 MPa y 42 MPa.

Concluimos que a la vista de las recomendaciones expuestas para elaborar un método de diseño de dosificación con HAR y aplicándolo a la realidad de los hormigones canarios se aprecia la dificultad con la que nos encontramos en este trabajo de investigación. No obstante, nos hemos ajustado a los objetivos planteados en nuestra tesis para proporcionar soluciones a la hora de dosificar HAR.

En concreto, nuestros ensayos se centraron en primer lugar en la aplicación de algunos métodos de dosificación tradicionales para los HC y en su posible modificación para hacerlos aplicables a los HAR.

Se eligió como objetivo específico central en nuestros ensayos de HAR encontrar unos resultados que aumentaran la resistencia media f_{cm} a compresión a los 28 días. Planteábamos como patrón a alcanzar los 50 N/mm² establecidos por la EHE - traducidos a 50 MPa para nosotros- y como referencia de partida los resultados obtenidos en nuestro laboratorio años atrás con los mismos elementos constitutivos. Evidentemente, se debe tener en cuenta que se trata de un aditivo diferente al utilizado en nuestra referencia.

Otro objetivo primordial en los HAR buscaba trabajar con relaciones agua/cemento bajas para Canarias. Bipolarizando el 0,4 de relación agua/cemento que recomienda la EHE y el 0,6 de a/c mínimo habitual de HC en Canarias y considerando además los resultados mínimos obtenidos por los ensayos en nuestro laboratorio años atrás consideramos que trabajaríamos con dosificaciones por debajo de 0,5 de relación agua/cemento.

Con estas razones decidíamos que no se debía ceñir a una consistencia de partida, ésta vendría dada con las prácticas. Posteriormente se realizaría la campaña de ensayos encaminada a determinar los resultados de la mezcla en las resistencias y consistencia con los HAP.

Es necesario apuntar que las intenciones de trabajo con estos HAR es buscar las resistencias y atender en menor medida a la consistencia puesto que ésta última sería el objetivo fundamental posterior de nuestra investigación. Por otra parte, puntualizamos que conocemos la importancia que tiene la fase previa a la dosificación del HAR, nos referimos a la selección de los materiales constituyentes. Una mala selección de los materiales puede llevar a un problema sin solución para alcanzar los máximos niveles de resistencia (ALAEJOS y FERNÁNDEZ, 2000, p. 38). Otros autores no son tan tajantes y consideran como posibles materiales constituyentes a los habitualmente empleados en la fabricación de hormigones tradicionales, además de la incorporación de aditivos y adiciones, como ya se ha

reflejado (GONZÁLEZ-ISABEL, 1993, p. 27). Con todo debemos controlar estrictamente las características homogéneas de estos materiales, esto es su forma, estado de humedad real y absorción de agua, principalmente.

Como hemos apuntado, para nuestra investigación contamos con unos materiales fijos que son los de uso común en Canarias como el cemento, el agua, los áridos y las arenas. A partir de éstos introducimos nuevos elementos entendidos como aditivos y adiciones de efectiva disposición en nuestra región.

4.3.3. Hormigón de altas prestaciones -HAP-

Por cuanto hemos señalado en el anterior subcapítulo 2.3 acerca de la definición de los HAR o los HAP y de la relación entre ambos se deduce que los hormigones de altas prestaciones son continuación en la evolución del hormigón. Por esta razón también se contemplan como proceso de continuidad en nuestro método de diseño de dosificaciones. La variación entre los ensayos de HAR y los de HAP estriba en que en estos segundos el campo de estudio se amplía. En el caso de los HAP la alta resistencia a compresión a los 28 días pierde el protagonismo, ya que en este apartado esencial de los ensayos circulamos hacia la docilidad del hormigón en estado fresco. El objetivo específico que buscamos a lo largo de los múltiples ensayos que contiene este subapartado -HAP- se centra en aumentar la fluidez de forma controlada, de manera que ésta se traduzca en diferentes prestaciones. Determinados los áridos, arenas y cemento de trabajo sabemos que aumentar la fluidez pasa principalmente por aumentar el agua, la relación agua/cemento y la cantidad de superfluidificante. Tampoco podemos olvidar que una correcta proporción de los áridos y adiciones disminuirá su demanda de agua y consecuentemente aumentará la fluidez de la mezcla.

Para los HAP hemos establecido criterios objetivos para el control de esta fluidez. Por una parte, para los HAP no pretendemos altas resistencias sino otras múltiples prestaciones que nosotros hemos articulado a la trabajabilidad del hormigón fresco. La resistencia será considerada suficiente para nuestros ensayos si cumple con lo reglamentado por la EHE, en su artículo 30.5, que establece una resistencia característica f_{ck} a compresión de 25 N/mm² a los 28 días. Hemos mayorado este valor para nuestros ensayos a una resistencia media f_{cm} en laboratorio de 40 N/mm² (\approx 40 MPa para nosotros) en función de las variables de los ensayos desarrollados.

Por otro lado, estipulamos que alcanzar relaciones agua/cemento por debajo de 0,3, como apuntan algunas referencias expuestas, es algo muy atrevido para hormigones canarios en el momento actual. Pero además conseguir relaciones agua/cemento por debajo de 0,5 unidas a una fluidez máxima pretendida para nuestros HAP de ensayo también se presume irreflexivo. En este sentido, establecemos conseguir fluidez pero no superar el límite de 0,6 establecido por la norma para ambiente tipo II-a de estructuras armadas de interiores de edificios con humedad media-alta (>65%) o condensaciones y ajustarnos al 0,55 exigido para ambiente tipo II-b de estructuras armadas de exteriores sin cloruros y sometidas a agua de lluvia con precipitaciones medias anuales inferior a 600 mm. Entendemos que estos dos ambientes unidos al tipo III-a de valor 0,5 para estructuras situadas a menos de 5 kilómetros de la costa ejemplifican los casos generales en nuestra región, dentro de nuestra actual normativa.

Por tanto, expuesto por nuestros ensayos iniciales en HAR que es posible realizar hormigones en Canarias con una relación 0,4 o 0,45 y conseguir altas resistencias, cambiamos el objetivo y trabajamos alrededor del coeficiente agua/cemento aproximado al valor 0,55 y sin superar el coeficiente de 0,6. Este

punto de inflexión intenta conseguir otro tipo de prestaciones ligadas a la docilidad del hormigón fresco, pero cumpliendo con las resistencias mínimas exigidas.

El método de diseño de dosificaciones no es sistemático por las mismas razones apuntadas para los HAR, pero además la amplia ambigüedad que ofrece este sustantivo de *'prestaciones'* abre el abanico de forma inabarcable. Como ya hemos desarrollado, entendemos que los HAP agrupan casi todos los hormigones especiales de última generación. En esta sección de los ensayos de diseño de dosificación hemos ido combinando la proporción de agua y superfluidificante a la vez que mejorando la combinación de áridos para conseguir una granulometría completa.

4.3.3.1 Hormigón de altas prestaciones pigmentado -HAPP-

Uno de las permanentes intencionalidades en nuestros trabajos del Laboratorio de Materiales del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la ULPGC ha sido la aplicación práctica de nuestros resultados en la edificación actual. La posibilidad de continuar el desarrollo de nuestros experimentos con HAP en una planta de prefabricados nos brinda la oportunidad de combinar nuestras teorías y experiencias de laboratorio con una práctica industrial y de mercado de primera línea en Canarias. Por cuanto que nuestra aplicación concreta a la arquitectura se desarrolla en el ejemplo del panel prefabricado de hormigón para fachada, hemos desarrollado distintas cartas de colores aplicadas al producto citado para el mercado de Gran Canaria.

Los trabajos en el laboratorio para estos hormigones han seguido las mismas premisas de materiales establecidos que en el resto de las mezclas. Hemos realizado las dosificaciones con el cemento y árido disponibles en nuestra zona y en el ejemplo de la fábrica con la que trabajábamos. Por tanto, para este caso, incluso los

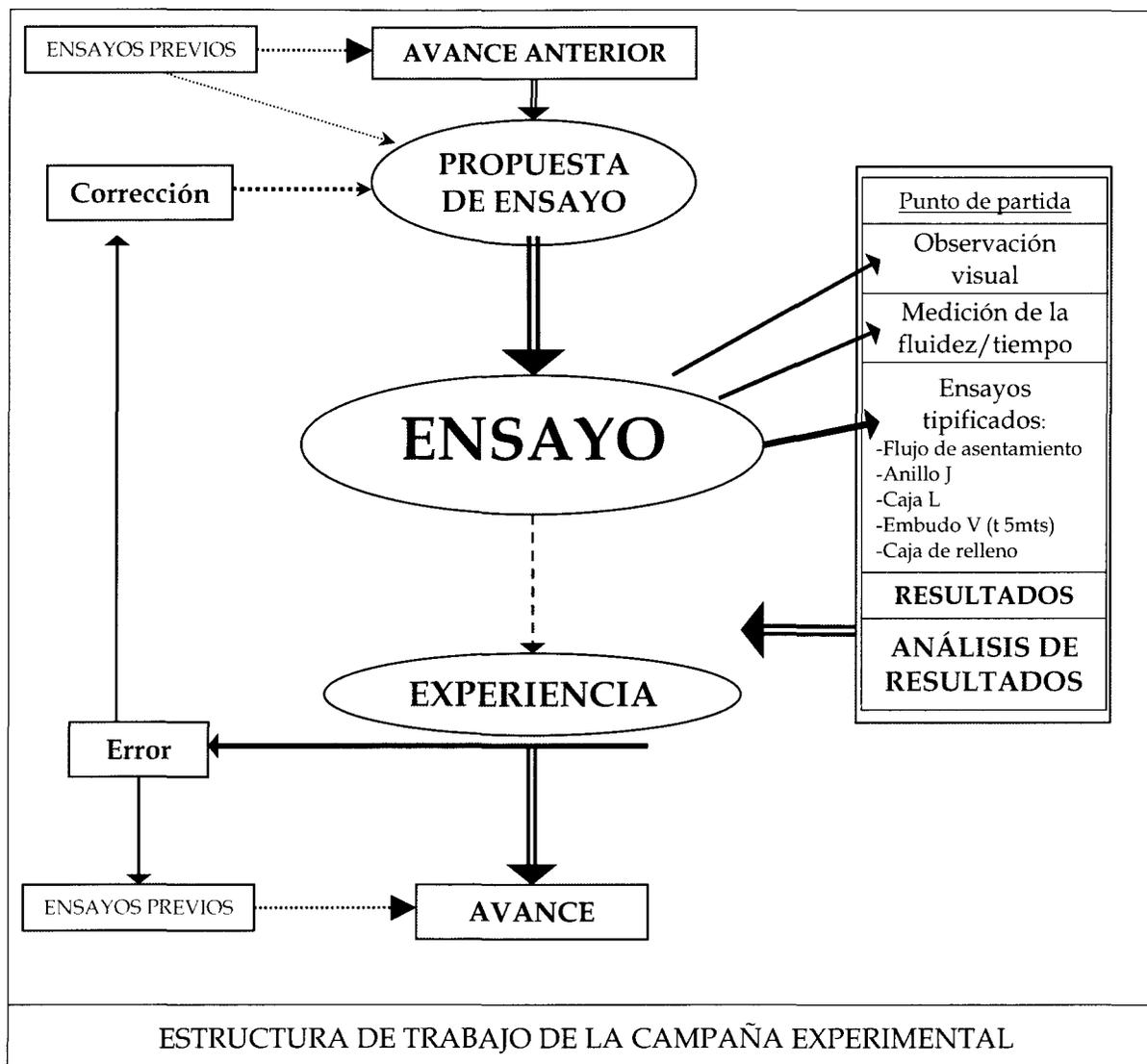
pigmentos eran los que ellos disponían por razones de mercado. Las mezclas se han realizado a mano en recipiente metálico y con cuchara de albañil, debido a la poca cantidad que se requería para la muestra. El vertido y llenado de los moldes se ha realizado ayudado con vibración manual mediante picado y golpeado suave con el mazo. Los moldes utilizados responden al óptimo tamaño para su empleo como modelo y posterior selección de tonalidades así como a la forma adecuada que se aproxima a la realidad de la planta de prefabricados.

Paralelamente hemos realizado hormigones autocompactantes pigmentados para comprobar como influían los pigmentos en la autocompacidad y también en la tonalidad de estos hormigones canarios. Esto los hemos adjuntado al grupo de los HAC puesto que esta última cualidad es la primordial de los ensayos finales.

4.3.4. Hormigón autocompactante -HAC-

El hormigón autocompactante es el modelo que mejor ejemplifica el hormigón de altas prestaciones en la actualidad (*véase subcapítulo 2.3 `HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES`*). El fin último de los ensayos que hemos realizado a lo largo de esta tesis pretende alcanzar la autocompacidad del hormigón canario. Una vez que hemos conseguido un hormigón fluido, dócil, con una trabajabilidad adecuada y manifestada en planta de prefabricados, paralelamente también alcanzada una notoria mejoría en los paneles aplicados con unas muestras a tamaño real y con ejecución directa en edificación, abordamos la autocompacidad como la característica última en esta etapa de nuestra investigación.

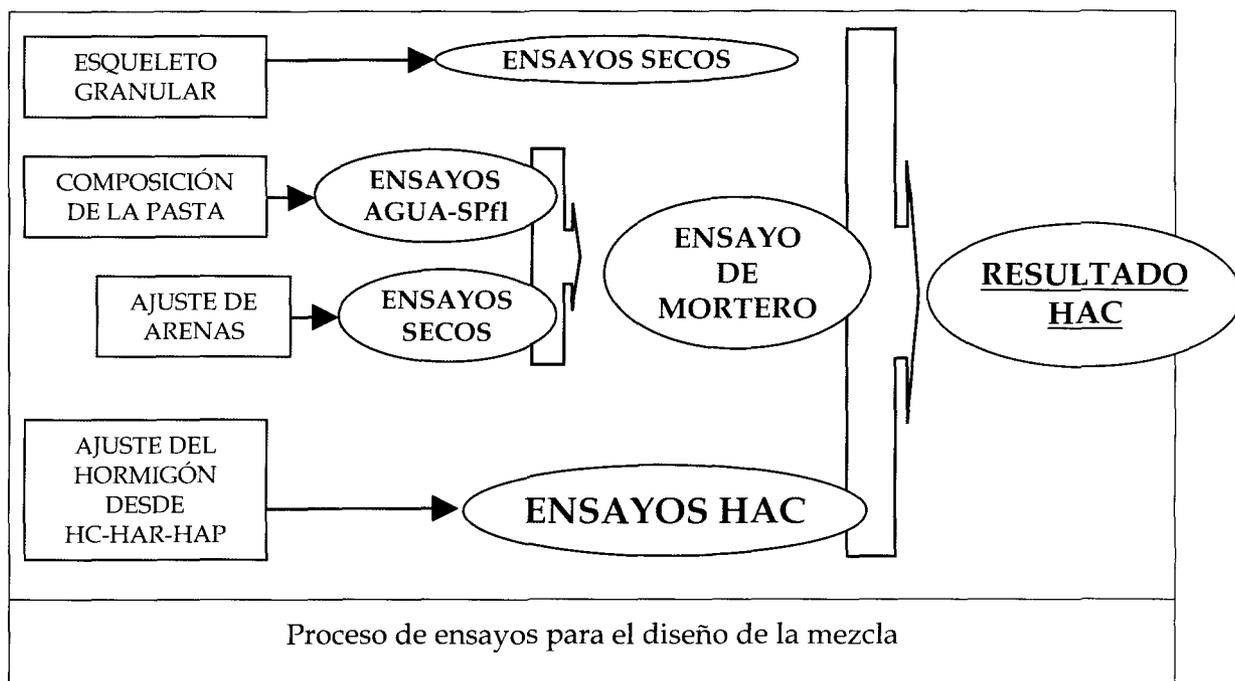
El método para cada una de las pruebas de dosificación continúa en la línea de la experimentación no sistemática mediante el tipo PRUEBA-EXPERIENCIA-ERROR y con el cambio de estrategia hacia la consecución del resultado. Los ensayos han estado guiados mediante el siguiente esquema:



Paralelamente, nos hemos guiado de las propuestas de diseño de dosificación de nuestra lectura. Esencialmente hemos tomado el método de Okamura y su equipo (OUCHI, HIBINO y OKAMURA, 1997, pp. 37-40), del que hemos presentado un esquema en el apartado 2.3.4.8 de este mismo volumen.

En nuestro caso hemos separado en cuatro partes el diseño de la mezcla. En primer lugar hemos realizado una optimización del esqueleto granular con el objeto de conseguir la máxima compacidad; en segundo lugar hemos despejado las incógnitas de la pasta de cemento; en tercer lugar, a partir de la composición de la pasta, indagado en las proporciones de la arena. Por último, se ha realizado la

comprobación a partir de las dosificaciones previas con los otros tipos de hormigones - HC, HAR, HAP -. La siguiente representación nos ayuda a reflejar el camino seguido:



• Esqueleto granular:

- 1º. Hemos prefijado como punto de partida un volumen de árido grueso (> 4 mm) en un 45% del total de árido. Sin olvidar las recomendaciones para HAC que nos proponen que el árido grueso debe estar entre el 50% y el 60% del total (OKAMURA, 1997, pp. 50-54), pero atendiendo a la dificultosa forma de nuestro árido reconsideramos el límite inferior de este baremo situándolo ligeramente por debajo.
- 2º. La arena (árido entre 4 mm y 0,125 mm) por tanto ocupará el 55% del total del árido, repetimos que este valor es inicial y de partida. A su vez, la arena mixta está compuesta en nuestro caso por dos tipos iniciales - fonolita de machaqueo 0/5 y caliza natural 0/1 - y por una adición posterior (en nuestros ensayos) de arena caliza -caliza de machaqueo 0/3

- Esta última es procedente de una cantera de Sevilla y se dispone con facilidad en nuestra isla. Por tanto, toda la arena a su vez hay que dividirla en porciones en función de su tamaño y forma, buscando una participación homogénea de todos los tamaños.

De la siguiente tabla extraída de los datos de los granulométricos resulta que en una proporción igual de las tres arenas (un 33% de cada una) nos proporciona homogeneidad en el granulométrico total de la arena:

Fonolita 0/5	machaqueo	heterogénea	65 % entre 2 - 5 mm
Caliza 0/3	machaqueo	homogénea	50 % entre 0,5 - 2 mm
Caliza 0/1	natural	homogénea	75 % entre 0,125 - 0,5 mm

Por tanto partimos de una combinación por igual para las tres arenas.

- 3º. La relación entre todos los áridos -gruesos y arenas- que forma parte de la mezcla debe de ser la que nos proporcione la máxima compacidad. En primer lugar, para estudiar la máxima compacidad de los áridos, se mezcla en seco sin compactar y se comprueba la composición que presenta mayor densidad aparente (HURTADO, 2004, p. 103).

En nuestro caso, para las tres arenas del experimento lo hemos realizado sobre el fundamento de este mismo esquema y con el aumento de una variable. Básicamente, el ensayo ha consistido en rellenar un recipiente de 5 litros con una mezcla seca correspondiente a una determinada relación de arenas. A partir de las densidades y pesos de los componentes se determina el peso unitario de la mezcla y el contenido de vacíos. Tras realizar este ensayo con diferentes proporciones de arenas se obtiene la relación que da el esqueleto granular de máxima compacidad o mínimo volumen de huecos. Las proporciones se han resuelto a partir de la

premisa de igual porcentaje de arenas según el párrafo anterior y continuado con el siguiente esquema:

Tipo arena	Premisa	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
Arena 0/5	33%	<u>40%</u>	30%	30%	29%	31%	31%	33%	...
Arena 0/3	33%	30%	<u>40%</u>	30%	29%	31%	27%	25%	...
Arena 0/1	33%	30%	30%	<u>40%</u>	<u>42%</u>	38%	42%	<u>42%</u>	...
	DATOS	SELECCIÓN - AJUSTE			AJUSTE		AJUSTE		

De aquí se desprende una proporción ideal entre las arenas que reflejaremos en los ensayos para las dosificaciones de hormigón autocompactante. Una vez conseguida esta composición de las arenas las relacionamos con el árido grueso y de la misma manera obtenemos el esqueleto granular de máxima compacidad.

- 4°. Paralelamente se ha realizado otro procedimiento para hallar el esqueleto granular de mínimos huecos, partiendo del mismo fundamento y tipo de ensayo. Hemos separado los dos áridos de mayor tamaño -árido grueso fonolítico de machaqueo 5/10 y arena fonolítica de machaqueo 0/5- y los hemos combinado hasta hallar la composición idónea que colme todos los huecos. Parte del mismo procedimiento consiste en rellenar un recipiente de cinco litros con una mezcla seca correspondiente a la relación árido grueso/arena = 45%/55% conforme a los datos de referencia arriba citados (HURTADO, 2004, p. 103). El ensayo se ha realizado para distintas relaciones obteniéndose la estructura que tiene el esqueleto de granos idóneo. A continuación añadimos el siguiente árido, en relación a su tamaño -arena caliza natural 0/3-, a la mezcla ya conseguida y de igual forma combinamos hasta conseguir la eficiente relación. De igual

forma llegamos a la constitución del conjunto del árido con la última arena. Sirva a título de ejemplo el siguiente esquema:

Tipo árido	Premisa	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º
Grava 5/10	45%	40%	} 75%	80%	85%	88%	} 85%	87%	...
Arena 0/5	55%	60%		...					
Arena 0/3	-----	-----	25%	20%	15%	12%			...
Arena 0/1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	15%	13%	...
	DATOS	AJUSTE	SELECCIÓN - AJUSTE				AJUSTE		

• Composición de la pasta:

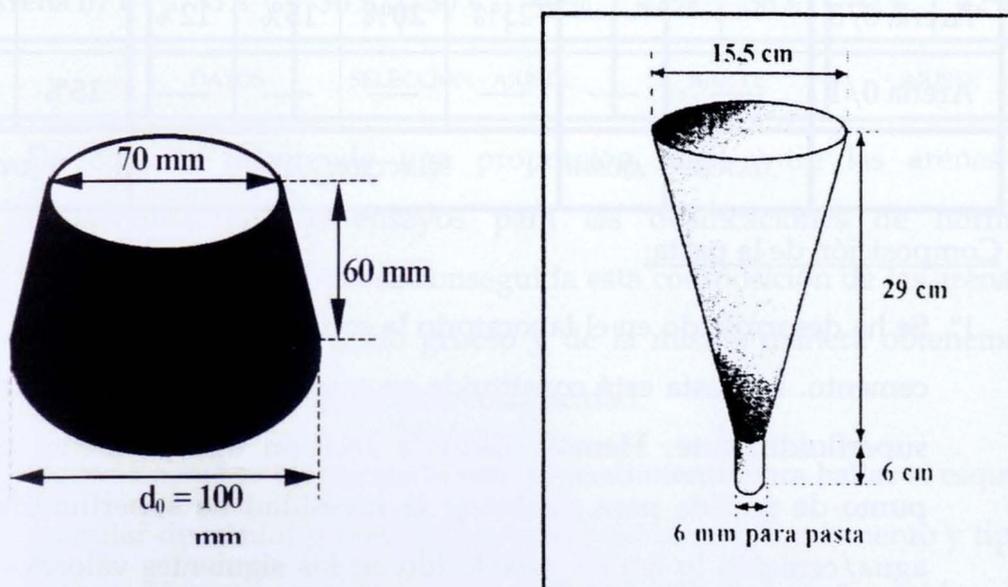
1º. Se ha desarrollado en el laboratorio la composición idónea de la pasta de cemento. La pasta está constituida en nuestro caso por cemento, agua y superfluidificante. Hemos fijado la relación agua/cemento como un punto de partida para establecer la necesidad de superfluidificante. El agua/cemento lo hemos establecido en los siguientes valores - $a/c=0,45$ $=0,50$ $=0,55$ $=0,60$ -. Para cada uno de éstos hemos estudiado el superfluidificante necesario para alcanzar el punto de saturación.

2º. La dosificación de superfluidificante con respecto al cemento 'sp/c' se ha determinado conforme a dos procedimientos diferenciados:

a) Ensayo de cono de extensión en flujo de la pasta: En este primer caso hemos cogido la relación a/c prefijada en cada caso y añadiendo diferentes proporciones de superfluidificante según recomendaciones de la firma comercial (CHRISSE) hasta alcanzar una extensión del escurrimiento en un tiempo considerable.

b) Ensayo de cono de Marsh: Respetando las mismas relaciones a/c citadas, hemos realizado ensayos con diferentes valores de superfluidificante/cemento hasta obtener el grado en el que no aumentaba más la fluidez de la pasta de cemento.

Este valor alcanzado por los ensayos nos refleja la proporción de aditivo en relación al cemento y al agua que corresponde a la saturación del superfluidificante.



Cono de flujo de asentamiento y cono de Marsh para pasta

Una vez obtenida, por un lado, la relación a/c y sp/c idónea y por otro, el esqueleto granular de máxima compacidad, ya estamos en disposición de realizar la dosificación completa ajustando las proporciones en función de la forma y demanda de agua de los áridos. A la vista de los resultados de estos ensayos hemos efectuado un ajuste previo de las arenas antes de plasmar la dosificación del HAC. Este siguiente paso lo hemos determinado como ajuste de las arenas.

- Ajuste de las arenas:

1º. Consideramos que este ensayo para el ajuste de los morteros es esencial para los hormigones de altas prestaciones canarios debido a la

peculiaridad de nuestras arenas. Como hemos visto (véase apartado 2.3.4.7 A), para los HAC, las arenas idóneas son las de procedencia natural. Sin embargo, la premisa de trabajar con áridos machacados junto al deficiente módulo de forma y absorción de agua de nuestras arenas constituye una de las bases de nuestra investigación. Por ello creemos necesario el estudio paulatino de la incorporación de cada una de las arenas en la mezcla. Este ensayo responde a nuestra intencionalidad de ajustar las arenas en una fluidez controlada para el mortero. Hemos realizado el ensayo con un embudo para mortero según reflejamos en la imagen siguiente:

Con este último ensayo controlamos la fluidez de manera paulatina a medida que incorporamos cada una de las arenas, desde la más pequeña hasta la más grande. A continuación, incorporamos en este ensayo el árido grueso y efectuamos el ensayo del Embudo 'V' para hormigones.

- Comprobación del HAC:

Una vez recorridos los pasos de manera paulatina hasta alcanzar el propósito en cada uno de los ensayos, realizamos otros para certificar que se cumple con todos los requisitos establecidos para que la mezcla se considere autocompacta. Nos referimos a la capacidad de relleno, la capacidad de paso y la resistencia a la segregación (SKARENDAHL y PETERSSON, 2000, p. 25).



Embudo para mortero y embudo para hormigón

Para ello hemos estudiado las especificaciones y directrices expuestas por la federación europea para el hormigón y sus aplicaciones. En concreto, hemos acudido a la lista de métodos de ensayo para el HAC de EFNARC (2002, p. 5, tabla 1). Entendiendo que también es necesario comprobar los tres requisitos de autocompacidad a la vez, se ha optado por ensayos combinados que engloben el total de las propiedades (EFNARC, 2002 p. 5, tabla 2). Los procedimientos seleccionados para realizar los ensayos así como las propiedades que evalúan cada uno de éstos han sido las siguientes y quedan recogidos por orden cronológico en la siguiente tabla:

1º	Flujo de asentamiento	Capacidad de relleno
2º	Flujo de asentamiento en tiempo a Ø=50 cms	Capacidad de relleno
3º	Anillo J	Capacidad de paso
4º	Caja en L	Capacidad de paso
5º	Embudo V	Capacidad de relleno
6º	Embudo V con reposo de 5 mts	Resistencia a la segregación
7º	Caja de Relleno	Capacidad de paso y Resistencia a la segregación

Una vez realizado un hormigón fluido y con potencial de autocompacidad es determinante comprobar los requisitos y cualidades que lo caracterizan. En este sentido, los ensayos destinados a testificar los requerimientos son esenciales en la correcta conclusión de la investigación. Entendiendo desde nuestro equipo de trabajo que la ratificación del HAC es necesaria y paralela a los métodos de diseño de la mezcla, estos ensayos se han desarrollado en apartado diferente. En otras palabras, el método de diseño se ha desarrollado de una manera menos metódica en una búsqueda de las posibilidades que podría presentar nuestro hormigón y, por otra parte, los procedimientos de ensayo para verificar la autocompacidad del hormigón se ajustan a las formas sistemáticas establecidas (*aunque recordamos que todavía no reglamentadas*).

4.4. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS APLICADOS

Según conocemos y hemos desarrollado en la sección anterior (*apartado 4.3*) no existe un método sólido para el diseño de la dosificación de hormigón autocompactante. Sin embargo, sí que existen procedimientos concretos para comprobar los requisitos imprescindibles de autocompacidad (capacidad de relleno, capacidad de paso y resistencia a la segregación). Para analizar bien el origen de cada uno de estos ensayos es necesario acudir a las referencias citadas para el HAC. En concreto, recomendamos el apartado dedicado a las técnicas de medida del autocompacto del tercer simposio internacional *RYLEM* sobre hormigón autocompactante (WALLEVIK y NIELSSON, 2003, pp. 299-366), el reportaje acerca del estado del arte del HAC (SKARENDAHL y PETERSSON, 2000, pp. 23-39) así como la *Guía para el HAC*, del grupo de federaciones europeas del hormigón (www.efca.info). Además, en castellano encontramos las especificaciones y directrices para el HAC (www.efnarc.org).

Además de éstos, para explicar el procedimiento estricto que hemos seguido en los ensayos de autocompacidad de nuestro hormigón hemos acudido a la reciente normativa italiana (UNI 11040). Por ser este hormigón autocompactante un desarrollo tecnológico de la última generación aún en evolución no existen todavía normas que acatar (www.efnarc.org -prólogo). No obstante, estas normas del país vecino van camino de convertirse en precedentes de las futuras normas europeas (*ésta ha sido nuestra intención de acogernos a esta normativa*). En este subapartado desarrollamos a modo de ejemplo el proceso seguido en los sucesivos ensayos realizados por nosotros, dejando para el anexo de este capítulo cuarto el despliegue de los aspectos relevantes de esta normativa, así como de las especificaciones de la *EFNARC*, que afectan a la realización de ensayos de autocompactante.

- Ensayo de flujo de asentamiento y ensayo de $T_{50\text{ cms}}$:

El flujo de asentamiento se utiliza para evaluar el flujo libre de HAC en ausencia de obstrucciones. Éste se basa en el método de ensayo para determinar el asentamiento. El diámetro del círculo de hormigón ofrece una buena evaluación de la capacidad de relleno del hormigón. Aunque no obtenemos datos sobre el hormigón al pasar entre la armadura sin bloqueos, sí a la resistencia a la segregación.

El equipamiento utilizado ha sido el siguiente:

- Molde en forma de un cono truncado, con las siguientes dimensiones internas: 200 mm de diámetro en la base, 100 mm de diámetro en la parte superior y una altura de 300 mm.
- Placa de asiento cuadrada de un material rígido no absorbente, de 900x900 mm, marcada con un círculo que indica la ubicación central del cono de asiento, y otro círculo concéntrico de 500 mm de diámetro.
- Llana, pala, regla y cronómetro.

Hemos utilizado 6 litros de hormigón para realizar el ensayo, que se toman como muestra de manera normal desde dentro de la amasadora. Se ha humedecido la placa de asiento y el interior del cono de asentamiento. La placa de asiento estaba sobre un terreno uniforme y estable. Se coloca el cono de asiento en el centro de dicha placa y se mantiene sujeto hacia abajo con firmeza. Se llena el cono con la pala. El hormigón no se compacta ni pica, tan sólo se nivela en la parte superior del cono con la llana. Se quita el hormigón sobrante de alrededor de la base del cono.

Se eleva el cono verticalmente y se permite que el hormigón fluya hacia el exterior libremente. De manera simultánea, se cronometra y registra el tiempo que requiere el hormigón para alcanzar el círculo de 500 mm. (Éste es el

período T 50). Se mide el diámetro final del hormigón en dos direcciones perpendiculares. El promedio de los dos diámetros medidos será el resultado. (Se trata del flujo de asentamiento en mm.) Se debe observar cualquier borde del mortero o la pasta de cemento sin árido grueso en el límite del charco del hormigón.

Cuanto mayor sea el valor del flujo de asentamiento (FA), mayor será su capacidad para llenar el encofrado por su propio peso. Para el HAC se requiere un valor de por lo menos 600 mm y recomendable de 650 mm.

El período T50 es una indicación secundaria del flujo. Un período inferior indica una mayor fluidez. Un tiempo de 2-5 segundos es correcto para las aplicaciones en edificaciones.

En el caso de una segregación grave la mayor parte del árido grueso permanecerá en el centro del charco de hormigón y el mortero y la pasta de cemento en la periferia del hormigón. En caso de una segregación menor puede producirse un borde de mortero sin árido grueso en el límite del charco de hormigón.

- Ensayo de anillo J:

Este ensayo se ha empleado para determinar la capacidad de paso del hormigón. Después del ensayo, se mide la diferencia de altura entre el hormigón en el interior y justo en el exterior del anillo J. Se trata de una indicación de la capacidad de paso o del grado en que el paso del hormigón a través de las barras se ve restringido. También ha resultado instructivo al comparar la extensión de la combinación anillo J/flujo de asentamiento con el flujo de asentamiento sin restricciones.

El equipamiento utilizado ha sido:

- Molde en forma de un cono truncado, con unas dimensiones internas de 200 mm de diámetro en la base, 100 mm de diámetro en la parte superior y una altura de 300 mm.
- Placa base de asiento de un material rígido no absorbente, de 900x900 mm, marcada con un círculo que indica la ubicación central del cono de asiento, y otro círculo concéntrico de 500 mm de diámetro.
- Llana, pala, regla y cronómetro.
- Anillo J, un anillo circular de 300 mm de diámetro al que se le ha soldado una armadura de barras corrugadas de 100 mm de longitud verticalmente. Estas barras son de \varnothing 20 mm y un espaciado entre ellas de 40 mm.

Se ha requerido 6 litros de hormigón para realizar este ensayo, que se toman como muestra de manera corriente. Se humedece la placa base de asiento y el interior del cono de asentamiento. Se coloca la placa de asiento sobre un terreno estable, el Anillo J centrado en la placa base y el cono centrado en el Anillo J. Se mantiene sujeto hacia abajo con firmeza y se llena el cono con la pala. No se tiene que compactar ni picar, tan sólo nivelar el hormigón de la parte superior del cono con la llana. Se quita el hormigón sobrante de alrededor de la base del cono y se eleva el cono verticalmente para permitir que el hormigón fluya hacia el exterior libremente.

Se mide el diámetro final del hormigón en dos direcciones perpendiculares y se calcula el promedio de los dos diámetros medidos. Se mide la diferencia de altura entre el hormigón justo en el interior de las barras y el que se encuentra justo en el exterior de las mismas. Se calcula el promedio de la diferencia de altura en cuatro lugares. Se observa cualquier borde del mortero o la pasta de cemento sin árido grueso en el límite del charco de hormigón.

Hay que tener en cuenta que el flujo se ve afectado por el grado en que el movimiento del hormigón está bloqueado por las barras de refuerzo. El alcance del bloqueo se ve mucho menos afectado por las características de flujo y podemos decir que cuanto mayor sea la diferencia de altura, *menor* será la capacidad de paso del hormigón. El bloqueo y la segregación también pueden detectarse visualmente.

- Ensayo de embudo V y de embudo V a T_{5mts}:

El ensayo de embudo V se ha utilizado para determinar la capacidad de relleno del hormigón. El fonil se llena con aproximadamente 12 litros de hormigón y se ha medido el tiempo necesario para fluir a través del aparato.

Después del proceso, el embudo se ha vuelto a llenar con hormigón, que se deja aposentar durante 5 minutos. Si el hormigón muestra segregación, entonces el tiempo de flujo aumentará significativamente. Aunque el ensayo se ha diseñado para medir la fluidez, el resultado se ve afectado por propiedades del hormigón distintas a las del flujo. La forma de cono invertido consigue que cualquier tendencia del hormigón a bloquearse se refleje en el resultado, cuando, por ejemplo, hay demasiado árido grueso. Un tiempo de flujo elevado también puede asociarse con una escasa deformabilidad debido a una alta viscosidad de la pasta, y con una alta fricción entre las partículas.

El equipamiento es:

- Embudo en V.
- Balde (12 litros).
- Llana, Pala y Cronómetro.

Se requieren unos 12 litros de hormigón para realizar el ensayo, tomados como muestra de manera normal. Previamente se fija de manera firme el embudo V sobre el suelo y se humedecen las superficies interiores. Se cierra la

trampilla, se coloca un balde debajo y se llena completamente el aparato con hormigón sin compactarlo ni presionarlo, sólo se tiene que nivelar el hormigón de la parte superior con la llana.

Al abrir la trampilla transcurridos 10 segundos del llenado se permite que el hormigón salga por su propio peso. De manera simultánea, se ha iniciado el cronómetro y registrado el tiempo hasta que se completa la descarga. Se considera que se ha completado cuando se ve la luz desde la parte superior a través del embudo.

Posteriormente sin limpiar ni humedecer las superficies interiores del embudo. Se cierra la trampilla y vuelve a llenar el embudo V. Se llena el aparato completamente con hormigón sin compactarlo ni presionarlo. Se abre la trampilla 5 minutos después del segundo llenado del embudo y se deja que el hormigón fluya hacia el exterior por su propio peso. De manera simultánea, se activa el cronómetro al abrir la trampilla y registra el período de la descarga hasta su conclusión (el tiempo de flujo a T 5 minutos). Se considera que ha concluido cuando se ve la luz desde la parte superior a través del embudo.

Este ensayo mide la facilidad para fluir del hormigón, un tiempo de flujo más breve indica una mayor fluidez. Para el HAC, un período de flujo de 10 segundos se considera adecuado. La forma de cono invertido restringe el flujo y los tiempos de flujo prolongados pueden indicar la susceptibilidad de la mezcla al bloqueo.

Después de 5 minutos de reposo, la segregación del hormigón mostrará un flujo menos continuo con un aumento en el período de flujo.

- Ensayo de caja en L:

Este ensayo evalúa la capacidad de fluir del hormigón y también la medida en la que el hormigón está sujeto a bloqueos por parte del armado. El aparato

consiste en una caja de sección rectangular con forma de “L”, con una sección vertical y otra horizontal, separadas por una puerta móvil, delante de la cual se encajan longitudes verticales de barras de armado. Muestra el alcance del hormigón en reposo. Se trata de una indicación de la capacidad de paso o del grado en que se restringe el paso del hormigón a través de las barras.

La sección horizontal de la caja se marca a 200 mm y a 400 mm de la compuerta y se miden los tiempos necesarios para alcanzar estos puntos. Se conocen como los tiempos T20 y T40 y constituyen una indicación de la capacidad de relleno.

El equipamiento consiste en:

- Caja en L de un material rígido no absorbente.
- Llana, Pala y Cronometro.

Se precisan unos 14 litros de hormigón para realizar el ensayo, tomados como muestra de manera normal. Se instala el aparato sobre terreno firme y uniforme. Se humedece las superficies interiores del aparato y se elimina el agua sobrante. Tras cerrar la compuerta se llena la sección vertical del aparato con la muestra de hormigón. Se deja reposar durante 1 minuto. Se eleva la compuerta deslizante y se permite que el hormigón fluya hacia la sección horizontal. De manera simultánea, hemos activado el cronómetro y registrado los tiempos que requiere el hormigón para alcanzar las marcas de 200 y de 400 mm. Cuando el hormigón deja de fluir, se miden las distancias “H1” y “H2” para calcular $H2/H1$ que es la relación de bloqueo.

Si el hormigón fluye tan libremente como el agua, en descanso estará horizontal, de modo que $H2/H1 = 1$. En consecuencia, cuanto más cerca esté el valor de este ensayo a la unidad, mejor será el flujo del hormigón. Nuestro equipo de investigación sugirió un valor mínimo aceptable de 0,8 según las

recomendaciones de la *EFNARC*. Los períodos T20 y T40 pueden ofrecer una indicación sobre la capacidad de fluir. Un bloqueo del árido grueso detrás de las barras de refuerzo puede detectarse visualmente.

- Ensayo de caja de relleno:

Este ensayo también se conoce como “ensayo Kajima-box”. El ensayo se utiliza para medir la capacidad de relleno del hormigón autocompactante. El aparato consiste de un recipiente transparente con una superficie uniforme y lisa. Dentro del recipiente se disponen obstáculos y el recipiente se llena de hormigón a través de un conducto de llenado. La diferencia de altura entre ambos lados del recipiente es una medida de la capacidad de relleno.

Este ensayo ofrece una buena impresión sobre las características autocompactantes el hormigón. Incluso una mezcla de hormigón con una elevada capacidad de relleno obtendrá malos resultados si la resistencia a la segregación y la capacidad de paso no son buenas.

El equipamiento necesario es:

- Caja de relleno de material rígido, transparente y no absorbente.
- Pala de aproximadamente entre 1,5 y 2 litros.
- Regla y Cronómetro.

Se precisan unos 45 litros de hormigón para realizar el ensayo. Se coloca el aparato sobre terreno firme y se humedecen las superficies interiores del aparato y elimina el agua sobrante. Se llena el aparato con el hormigón de muestra añadiendo cada 5 segundos una pala con 1,5 - 2 litros de hormigón fresco en el embudo de entrada hasta que el hormigón cubra el primer obstáculo superior. Después de que el hormigón se ha asentado hemos medido en dos puntos la altura desde la que se ha llenado el recipiente y calculado el promedio (h1). Hemos medido de igual manera en el lado opuesto (h2).

Se calcula el porcentaje medio de relleno:

$$\text{Porcentaje de relleno: } F = \frac{h_1+h_2}{2 \cdot h_1} \cdot 100\%$$

Si el hormigón fluye con la misma libertad que el agua, en reposo será horizontal, de modo que el porcentaje de relleno medio será igual al 100%. Por consiguiente, cuanto más cerca esté el valor del ensayo al 100% mejores serán las características de autocompactación del hormigón.

4.5. EQUIPAMIENTO DE LABORATORIO PARA LA INVESTIGACIÓN

El lugar de trabajo para la realización de los ensayos ha sido el Laboratorio de Materiales del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Se encuentra ubicado en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la misma universidad en el Campus de Tafira, municipio de Las Palmas de Gran Canaria. Nuestro laboratorio consta de dos salas principales de 140 metros cuadrados cada una con una cámara húmeda, además de pequeños espacios para oficinas y servicio de personal.

Se trata de un espacio amplio y cómodo para la realización específica de investigación relacionada con la edificación. Este laboratorio tiene una práctica experimentada con el hormigón canario desde su creación en 1980 (PÉREZ, 1991, p. 98) y continúa en la misma línea investigadora. El equipo de personal de nuestro laboratorio está organizado de la siguiente manera:

- el Director de Departamento (profesor titular de la ULPGC),
- un Director de Laboratorio (profesor asociado de la ULPGC),
- un Coordinador de ejecución de ensayos de laboratorio (Titulado ingeniero químico, funcionario de la ULPGC),
- un ayudante técnico del coordinador (funcionario de la ULPGC),

- tres laborantes de laboratorio (funcionarios de la ULPGC).

La maquinaria y aparatos del laboratorio también están correctamente capacitados para la realización de los ensayos más determinantes en torno al hormigón. En concreto, para nuestro experimento hemos utilizado:

- Balanza automática C-1500, de flexo-Tracción de 500 kilogramos de capacidad. Fabricante: Suzpecar.
- Amasadora planetaria para morteros C-700 de 5 litros con dos velocidades de amasado de 140 y 285 r.p.m. Fabricante: Suzpecar.
- Hormigonera H-100 para laboratorio y obra de 75 litros, 1,5Hp y 3m³/hora de rendimiento. Fabricante: Suzpecar.
- Moldes de probetas cilíndricos de Ø 15 cms por 30 cms.
- Moldes de probetas cúbicas de lado 20 cms de acero inoxidable.
- Moldes cúbicos de 7 centímetros de lado.

El curado de las probetas se ha realizado en una cámara húmeda con atmósfera saturada.

Además, para nuestro trabajo específico de hormigón de consistencia fluida hemos necesitado incorporar algunos aparatos específicos para la elaboración y pruebas de los requisitos del hormigón autocompactante. Nos referimos a los siguientes:

- **Molde cónico con dispositivo de apoyo y plato metálico de Ø 300 mm de base** para flujo de asentamiento relativo de pasta de cemento y/o mortero (cedido por el laboratorio de Dolcan, S.L.).
- **Cono de Marsh** para la determinación de las propiedades de fluidez del mortero.

- **Embudo V de mortero y sus accesorios** para fijar la fluidez relativa medida en tiempo (dimensiones: 275 x 30 x 1200 mm). Fabricante: Testing.
- **Cono de Abrams y placa de asiento** para determinar el flujo de asentamiento del hormigón (placa: 900 x 900 x 5 mm).
- **Molde de precisión para prismas de mortero** (40 x 40 x 160 mm) terminados en superficie galvanizada.
- **Anillo J y placa de asiento** para evidenciar la fluidez y el bloqueo del hormigón. Anillo de 300 mm de diámetro con 16 barras verticales corrugadas de Ø de 20 mm. (placa: 900 x 900 x 5 mm).
- **Caja en L** para comprobar la fluidez, el bloqueo y la segregación del hormigón. (dimensiones: 700 x 200 x 600 mm). Fabricante: Testing.
- **Embudo V de hormigón y sus accesorios** para precisar la fluidez relativa en tiempo y la segregación. Acero inoxidable (dimensiones: 515 x 75 x 800 mm). Fabricante: Testing.
- **Caja de Relleno (caja Kajima) y accesorio para llenado** para justificar el grado de llenado del hormigón, así como de la segregación. Caja de metacrilato y barras plásticas de PVC (dimensiones: 500 x 300 x 300 mm). Fabricante: Testing.

Estos aparatos de laboratorio desplegados han sido imprescindibles para la realización de la campaña experimental y también ha sido fundamental el tratamiento de la información producida para su análisis. En este aspecto, hemos sistematizado toda la información que producíamos a consecuencia de los ensayos. Se han elaborado unas fichas en función de cada uno de los tipos de hormigón desarrollados, cuyos modelos se recogen a continuación:

- Caracterización del hormigón canario:

PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES
 DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN ESTRUCTURICA - LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN
 COMPONENTES DEL HORMIGÓN GRANULOMÉTRICO B

ENCABEZADO DE LA FICHA CON DATOS GENERALES

REFERENCIA: Abertura del árido:
 FECHA GRANULOMÉTRICO: Fecha de la muestra:
 FECHA RECEPCIÓN ÁRIDO: Denominación:
 PROCEDENCIA DEL ÁRIDO: Forma: Método de determinación:

	RETENIDO		PESO		PORCENTAJE (%)	
	PERMILÍMETRO	SEMI-MILÍMETRO	PERMILÍMETRO	SEMI-MILÍMETRO	PERMILÍMETRO	SEMI-MILÍMETRO
ÁRIDO ORUEBO	40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ARENA	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,125	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FINO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

INCENTAJE (%) POR TAMAÑOS:

Tamaño máximo de árido (Ø): milímetros
 Tamaño mínimo de árido (Ø): milímetros

GRÁFICOS

OBSERVACIONES

- Hormigón convencional base:

PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES
 DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCION ESTRUCTURICA - LABORATORIO DE CONSTRUCCION
HORMIGÓN CONVENCIONAL BASE
 DOSIFICACIONES

ENCABEZADO DE LA FICHA

REFERENCIA:

FECHA DE AMASADO:

Suma áridos. Kg/m³
 Suma húmedos. Kg/m³
 Suma total. Kg/m³

material	cantidad	eval.	Mg/m ³	eval.	Mg.	Pa.	Pa.c	4. In	4.mHAC
arena	arena	✓	0.00	✗	0.00	✓			0.00
		✓		✓		✓			
		✗		✗		✓			
						✓			

DOSIFICACION

Comprobación. Volumen probado 2001.48 m³ suma áridos 428.00

Observaciones iniciales

Resultado relación A/C FRACTURAS 0.00

Aplicar Volumen 0.00 Pa. Cambró 0 Kgs. suma total 0 Kg/m³

material	Mg/m ³
arena	

ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

placa con hormigón Abstracción cm.

Observaciones finales

RESISTENCIAS

RESISTENCIA	24 H			
resistencia.				
resistencia.				

- Hormigón de altas resistencias:

PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE CONSTRUCCIÓN
LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN

HORMIGÓN DE ALTAS RESISTENCIAS

DOSIFICACIONES

REFERENCIA:

FECHA DE AMASADO:

Suma sidos. Kg/m³
 Suma sólidos. Kg/m³
 Suma total. Kg/m³

material	cantidad	unidades	kg/m ³	kg	litros	litros	kg/m ³	kg/m ³
cemento	400	Kg	100	40000	0	0	100	100
arena	100	Kg	100	10000	0	0	100	100
grava	100	Kg	100	10000	0	0	100	100
agua	100	litros	100	100	100	100	100	100

Comprobación: Volumen pedregal=500,42788 Resultado: suma sidos=000

Observación previa:

Resultados: relación A/C= FRECCION= 0,00

Ajustes: Volumen= 0,000 lts. Kg/m³= 0 Kg. suma total= 0 Kg/m³

DOSIFICACIÓN CORREGIDA

IMAGEN

RESULTADOS

RESISTENCIAS

RESISTENCIA PROYECTOS SIN HORMIGÓN

material	cantidad	unidades	kg/m ³	kg	litros	litros	kg/m ³	kg/m ³
cemento	400	Kg	100	40000	0	0	100	100
arena	100	Kg	100	10000	0	0	100	100
grava	100	Kg	100	10000	0	0	100	100
agua	100	litros	100	100	100	100	100	100

- Hormigón de altas prestaciones:

PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES
 DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ACUMULACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
 HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES
 DOSIFICACIONES

REFERENCIA:

FECHA DE AMASADA:

FECHA DE RECEPCIÓN DE CEMENTO:

1ª agua:

1ª aire:

Suma áridos: Kgm³

Suma áridos: Kgm³

Suma total: Kgm³

número	referencia	TC	PA	Mq/m ³	PA	Mq	lba.	PA	q. in	q. in-HAC
nombre	descripcion			0.00		0.00			0.00	0.00

Comprobación: Volumen global=5201.4278 lba. Pavales total: suma áridos=400= 0.00

Observaciones previas:

Resultados: relación HAC= = 0.00 EUI

Ajustes: Volumen= 0.000 lba. Cemento= 0 Kgs. suma total= 0 Kgm³

número	Mq/m ³	Problemas	Resistencia

plan con edit: LONG ABRAMO= 0.5 cm.

plan con edit: LONG ABRAMO= >25 cm. → TORTA= d / D cm l. (50% lgl)

RESULTADOS

RESISTENCIAS

RESISTENCIA PROYECTO SIN PEER

nº	7 D						
nº							
nº							

- Hormigón de altas prestaciones pigmentados:

ENCABEZADO DE LA FICHA

PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES
 DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA - LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN
HORMIGÓN CONVENCIONAL PIGMENTADO

CONDICIONES

REFERENCIA:

FECHA DE AMASADA:

FECHA DE RECEPCIÓN DE CEMENTO:

l' agua.
 l' arena.
 Suma áridos. Kglm²
 Suma sólidos. Kglm²
 Suma total. Kglm²

cantidad	referencia	rel. A/C	Kg./m ³	rel. A/C	Kg./m ³	rel. A/C	rel. A/C	rel. A/C
nombre	descripcion	rel. A/C	0,00	X	0,00	rel. A/C	0,00	0,00
		X		X				
		X		X				
		X		X				

DOSIFICACIÓN

Amasado a mano y pade en cono Abrams. Placa incl. OK suma de áridos (l) = 0,00

OBSERVACIONES

Resultado: relación A/C = 17500 kg = 0,00 EUR

placa incl. OK suma de áridos (l) = 0,00

- Hormigón autocompactante:

PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCION ARQUITECTONICA - LABORATORIO DE CONSTRUCCION
HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE
DOSIFICACIONES

REFERENCIA:

FECHA DE ELABORADA: Sumas áridos: Kg/m³

FECHA DE RECEPCIÓN DE ELEMENTO: Sumas líquidos: Kg/m³

Pagos: €
Pebos: €

material	referencia	kg/m ³							
CEMENTO	II/AP 425 R	0,00							0,00
ARENA 0/1	SAHARA-E								
ARENA 0/5	ARICAN-E								
ÁRIDO 5/10	ARICAN-E								
ARENA 0/3	CALCITA-min. Slo. Argel-								
AGUA	estasio								
ADITIVO	PREMIA 180								

Volumen: m³ Aire: % PREC D M3: 0,00 EUR.

Acabado (con aditivo) NO ABRAMB: cm.

OBSERVACIONES

1º CAPA DE ELLEB: Espesor: cm Tipo: Segregación: S/N Búsqueda: S/N

2º CAPA DE PASO Espesor: cm Tipo: Segregación: S/N Búsqueda: S/N Bloqueo: S/N

3º CAPA DE PASO Espesor: cm Tipo: Segregación: S/N Búsqueda: S/N Bloqueo: S/N

Fluidez: S/N Bloqueo: S/N Segregación: S/N

IMAGEN

Sequencia:

OBSERVACIONES FINALES

RESISTENCIA:

24 H									
MPa									

RESISTENCIAS

PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN ARQUITECTÓNICA - LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN
HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

DOSIFICACIONES

REFERENCIA:

Págua: °C
Pasta: °C

FECHA DE AMASADA:

Suma áridos: Kg/m³

FECHA DE RECEPCIÓN DE CEMENTO:

Suma áridos: Kg/m³

Suma total: Kg/m³

materia	referencia	Vol	Vol	Kg/m ³	Vol	Kg	Vol	Vol	Vol
CEMENTO	III/AP 425R			0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	0,00			0,00
ARENA D1	SAHARA-E								
ARENA D5	ARICÁN -E								
ÁRIDO S/10	ARICÁN -E								
ARENA D3	CALCITA-min. Sto. Argel-								
AGUA	stasio		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		
ADITIVO	PREMIÁ 130		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		

Volumen = l. Cem. m³ = Kgs. A/C = PREC. D. M³ = EUR.

plur (dn adit) CO MO ABRAMB = cm.

Observación preliminar:

Folce:

FLUIDEZ

FLUJO ASENTAMIENTO

de plur Flujo a asentamiento = cm. sg.

Embudo V sg. Bloqueo:

Segregación:

EMBUDO V

ANILLO J

de plur Anillo J = cm. sg.

CAJA L

Caja L (W/m²) sg. Bloqueo:

CAJA RELLENO (K/M³)

Caja relleno (K/M³) % Bloqueo:

Segregación:

BLOQUEO

EMBUDO V

(5 mts)

Embudo: sg. Bloqueo:

Segregación:

Seguenda:

SEGREGACIÓN

OBSERVACIONES:

RESISTENCIA:

PROBETAS CURADAS:

24 H 7 D 28 D 24 H 7 D 28 D 24 H 7 D 28 D

resul:

resul:

RESISTENCIAS

BIBLIOGRAFÍA PARTICULAR DEL CAPÍTULO 4

• PROGRAMA EXPERIMENTAL

ALAEJOS GUTIERREZ, María del Pilar y FERNÁNDEZ CÁNOVAS, Manuel (2000): *Hormigón de alta resistencia: Dosificación y propiedades mecánicas*. Ministerio de Fomento - Centro de estudios y experimentación de obras públicas CEDEX. Madrid.

ALAEJOS GUTIERREZ, María del Pilar y MARÍ BERNAT, (2000): "Anejo 11º. Recomendaciones para hormigones de alta resistencia", en *La EHE explicada por sus autores*. Madrid. pp. 309-321.

GARRIDO ROMERO, Luis (2004): "Tecnología, propiedades generales y realizaciones con hormigón autocompactante" en *Hormigones autocompactantes*. Sevilla. XI Jornadas técnicas sobre Otros Hormigones.

GETTU, Ravindra y AGULLÓ, Luis (2004): "Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización (Parte I y II)" en *Cemento-Hormigón* nº 861. Madrid. Abril y mayo de 2004.

GONZÁLEZ-ISABEL, Germán (1993): *Hormigón de alta resistencia*. Madrid. Editado por INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones).

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (1993): *Dosificación de hormigones con aditivos superfluidificantes*. Colección Temas de Construcción num. 6. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos y HERNÁNDEZ DÉNIZ Juan Francisco (1999): "Dosificación del hormigón", en *Construcción I; Materiales y técnicas de construcción*. Las Palmas de Gran Canaria. (Inédito).

IECA LEVANTE (2003): Presentación, en *Hormigón autocompactable, un hormigón para el siglo XXI. Jornadas técnicas*. Valencia, febrero de 2003.

JIMÉNEZ MONTOYA, Pedro; GARCÍA MESEGUER, Álvaro y MORÁN CABRÉ, Francisco (2000): *Hormigón Armado. 14ª Edición basada en la EHE*. Barcelona.

OUCHI, Masahiro; HIBINO, M y OKAMURA, Hajime (1997): "Effect of superplasticier on Self-Compactability of fresh concrete" en *Transportation Research Record* nº 1574. pp. 37-40.

VAN ACKER, A. (2002): "State and developments of precast concrete building construction in Europe", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural), pp. 679-684.

www.efnarc.org -Página Internet-: "Especificaciones y directrices para el hormigón autocompactable - HAC". *EFNARC* (eds.). Fecha entre febrero de 2002 y febrero de 2006.

CAPÍTULO 5:

5. VALORACIÓN DE

RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

Una vez expuesto el estado del arte acerca del título en cuestión y presentada detalladamente las intenciones, formas y maneras del programa experimental, se expone a continuación los resultados de esta campaña de ensayos. Expresado ha quedado que estas verificaciones prácticas han consistido en múltiples pruebas de dosificación para la ejecución de hormigón. La peculiaridad para esta mezcla es que se ha realizado con materiales constituyentes de origen canario.

Este capítulo debería ser leído siempre conjuntamente con el anexo al capítulo quinto, que se recoge en la segunda parte de esta tesis dedicada a los anejos.

En primer término, el anexo citado acopia cada uno de los ensayos realizados de manera detallada y con un importante contenido de resultados. A partir de éstos, en este capítulo destacamos los esenciales y se reflejan para realizar comparativas y valorarlos.

En segundo término y en concreto a lo que este capítulo se refiere, el texto de valoración de resultados queda dividido en subapartados que se refieren al hormigón convencional canario - HC -, de altas resistencias y de altas prestaciones - HAR y HAP - y hormigón autocompactante - HAC -, según hemos venido recogiendo y explicando en el contenido global de esta tesis.

Para el desarrollo de nuestras apreciaciones en el hormigón habitual canario, nos ayudamos de los aspectos peculiares que hemos encontrados también en sus materiales constitutivos, en especial, en los áridos. Se expondrá un análisis exhaustivo de sus características más importantes en el desarrollo de la plasticidad. Expresaremos a continuación la dosificación base y su significado, en referencia a la trabajabilidad.

El segundo y tercer bloque exponen de manera secuencial los ensayos, así como las discusiones y mejoras en el hormigón. Según hemos reflejado a lo largo de la tesis, progresamos en los primeros pasos desde un hormigón de altas resistencias hacia un hormigón con otras prestaciones. El desarrollo de este capítulo irá mostrando cada uno de los avances en función de los ensayos, en la secuencia ya mostrada de *ENSAYO - AVANCE/ERROR - EXPERIENCIA*. El hormigón de altas resistencias pone de manifiesto los resultados positivos alcanzados con la inclusión de los superfluidificantes destacando los ensayos de capacidad mecánica. A medida que se avanza en el HAP se comprobará que los resultados nos encaminan hacia la docilidad, incluso fluidez. Mención aparte y destacada en este subapartado merece el hormigón de altas prestaciones pigmentado - HAPP - en tanto que supone un claro referente como exponente estético para los paneles de fachada y por cuanto refleja el acreditado interés de nuestra Escuela de Arquitectura de Las Palmas acerca de los hormigones pigmentados en las últimas décadas.

La última unidad de este capítulo representa la condición de autocompacidad en el hormigón conseguido. Se calificará la capacidad autocompactante con relación a su capacidad de relleno, su resistencia al bloqueo y a la segregación, según se recogió en los apartados de definición y requisitos del HAC (*véase 2.3.4.3 y 2.3.4.7*). Para esta evaluación nos hemos ayudado del nuevo equipamiento de nuestro laboratorio para ensayos con hormigones de última generación. Además, hemos creado un programa informático específico que ayuda a escoger la mejor posibilidad de dosificación en función de las características de los materiales constituyentes elegidos. En nuestro caso, a partir de una gráfica ideal, se pueden crear alternativas a un supuesto intento de buscar la autocompacidad con materiales constituyentes similares a los utilizados en Canarias.

Para terminar, el último módulo de este capítulo, dedicado a los resultados del programa experimental, supone la aplicación consecuente de las investigaciones. En

este sentido, se muestra un desarrollo de los trabajos llevados a cabo con este fin, donde se han resuelto casos prácticos reales de paneles de fachada con hormigón autocompactante, es decir, de altas prestaciones.

5.2. HORMIGÓN CONVENCIONAL - HC -

Como hemos explicado a lo largo de este trabajo, el hormigón convencional lo hemos identificado para nuestra tesis con el de uso habitual en la actualidad en Canarias. Aunque sabemos que existen múltiples variaciones principalmente en función de la especificidad de los áridos, del tipo de cemento o de superfluidificante usado, nosotros hemos escogido para estas primeras mezclas un hormigón genérico de las principales empresas de hormigón en Gran Canaria. El fin de estas dosificaciones es la elección del hormigón que sirve de base para el comienzo de los ensayos y que queda recogido en la referencia R001 del anexo al capítulo quinto.

Para la selección de este hormigón convencional base hemos tenido en cuenta que hasta hace dos décadas el uso de fluidificantes para hormigón en Canarias era algo excepcional. Posteriormente, durante la década de los noventa, los trabajos de investigación del doctor Guigou estudiaban, entre otros aspectos, la influencia de estos aditivos en el hormigón canario. Con estos trabajos de laboratorio se intuía de alguna manera la necesaria incorporación de nuestros hormigones a la actualidad internacional. En estos últimos años de trabajo en nuestra tesis, hemos comprobado que el uso de superfluidificantes se está comenzando a generalizar en las plantas de producción industrial de hormigón. Sin embargo, en las memorias técnicas de proyecto de nuestros arquitectos y proyectistas no se suele reflejar datos significativos acerca del uso de estos aditivos. Debemos advertir de la peligrosidad del uso de superfluidificantes sin un control adecuado (FERNÁNDEZ, 2003).

5.2.1. Componentes del hormigón convencional

Tras haber analizado los constituyentes del hormigón canario, desde el punto de vista de las posibilidades para conseguir trabajabilidad, destacamos una vez más las deficiencias de los áridos. Presentamos a continuación las características destacables en cada uno de estos materiales:

• **Agua:** El agua tiene unas propiedades correctas para la ejecución de hormigones de altas prestaciones. La empresa *DOLCAN, S.A.* nos proporciona los resultados de un análisis de laboratorio para una muestra de agua (25/febrero/2002). Se trata de agua normal de abasto y los resultados que destacamos son los siguientes:

<u>PARÁMETROS</u>	<u>RESULTADOS</u>
PH	8.1
Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$ (20°)	985
Cloruros (mg/L)	295
Sulfatos (mg/L)	6
Calcio (mg/L)	24
Magnesio (mg/L)	16

Tampoco contiene sustancias orgánicas o de otro tipo que incumplan con la norma EN 1008 donde se establece la idoneidad para el agua de amasado.

• **Cemento:** El cemento empleado reúne también todas las garantías de conformidad, en este caso cumple con todas las certificaciones conforme a la norma UNE - EN 197. Aunque hemos utilizado hasta cinco tipos de cementos, podemos resaltar en general la inclusión de puzolana en ellos. En relación al momento de fraguado del hormigón, esta adición activa, muy particular del cemento de

Canarias, infiere una característica fundamental que es la alta velocidad de desecación del hormigón y consecuentemente la necesaria humedad pasados los primeros días (GUIGOU, 1990). Sin embargo, esta característica nada tiene que ver con una mayor necesidad de agua durante el amasado.

No obstante, en nuestros ensayos (*véase R025.8*) pudimos comprobar la propiedad de absorción de agua de la puzolana canaria en la fase de estado fresco del hormigón. Incluso observamos la posibilidad de que pequeñas cantidades de esta piedra evitaran la segregación. En este sentido, independiente al resto de constituyentes, el cemento puzolánico canario confiere un mínimo grado de consistencia más seca que otro cemento sin esta adición activa. La razón es la demanda de agua cuando esta puzolana reacciona con la cal liberada del cemento (GUIGOU, 1990, p. 74). Sin embargo, debemos insistir en que esta influencia del cemento puzolánico no es determinante en la docilidad del hormigón, si la comparamos con lo que más condiciona al intentar conseguir autocompacidad en los hormigones canarios. Nos estamos refiriendo a los áridos.

- **Áridos:** De igual manera que el cemento, los áridos han sido suministrados por la empresa de prefabricados de hormigón *DOLCAN, S.A.* Los mismos proceden de su empresa filial *Áridos Canarios, S.L.* dedicada a la producción de áridos para construcción. Éstos se obtienen a través de la extracción mecánica por procedimientos artificiales y al machaqueo sucesivo hasta la consecución de los tamaños de piedra demandados. Esta fábrica de áridos presenta el certificado de conformidad CE otorgado por AENOR, según normas aplicables UNE - EN 12620 y UNE - EN 13043.

Analizando la cantera de extracción citada y realizando algunas comprobaciones valoramos algunos aspectos esenciales para nuestra tesis. La cantera de extracción de áridos se encuentra en el Sureste de la isla de Gran Canaria (*cerca del núcleo de población de Juan Grande*). En esta zona se aprecian materiales volcánicos

correspondientes al primer ciclo volcánico subaéreo de la isla, también se observan una serie de depósitos sedimentarios variados al pié de los relieves lávicos. En esta base de terreno sedimentario es sobre la cual se asienta toda la maquinaria fabril para la producción de áridos.

Este último aspecto debe ser tenido en cuenta por la posibilidad de la alteración accidental con otro tipo de roca o finos, así como la posibilidad futura de considerar esta potencial extracción. Se trata de sedimentos conglomeráticos o aluviales compuestos por cantos mayoritariamente fonolíticos, aunque también presentan arenas y gravas heterométricas de naturaleza diversa como basaltos, basanitas, traquitas, refritas o traquifonolíticas (según *Mapa Geológico de España, hoja 1.114; publicado por el ITGE, 1990*).

Los relieves sobre esta base horizontal corresponden a una formación fonolítica. En concreto, constituyen un apilamiento de coladas fonolíticas y traquifonolíticas de color verde jaspeado. Morfológicamente, son estructuras masivas de varios metros de potencia, que en ocasiones se encuentran alteradas adquiriendo una tonalidad beige o anaranjada. A simple vista, presenta una disyunción columnar gruesa y una marcada fisibilidad que le confiere la conocida rotura en lajas.

La cantera exacta de la que se extraen las rocas para el posterior proceso de machaqueo y obtención de áridos se realiza en un claro afloramiento de fonolitas. La actividad extractiva tiene lugar en diversos frentes verticales de unos veinte a treinta metros de altura. En estas paredes de excavación se puede observar una tonalidad gris verdoso. Al atender con detalle comprobamos diversas inclinaciones de las capas de roca que corresponden a la disyunción columnar comentada. Se puede visualizar también un intenso lajeado en función del flujo en el interior de la colada. Estas anotaciones tomadas a pie de cantera y mostradas de manera sintética manifiestan lo que después ocurre en el proceso de producción de áridos y arenas.

Analizando estos datos y contrastando con los ensayos en el laboratorio obtenemos las siguientes valoraciones relevantes:

- En cuanto a su composición química, queda patente que su contenido en cloruros y sulfatos no alcanza los límites marcados por la norma. Estos aspectos no presentan problema con relación a la búsqueda de hormigón de última generación con estos áridos (UNE 1744 - 1/99). También resulta confirmada la ausencia de materia orgánica o de terrones de arcilla, así como la negativa reactividad frente a los álcalis de cemento (UNE 7133/58, UNE 146507 - 1/99).
- Comprobamos que el peso específico de estos áridos se encuentra entre 2,55 y 2,65 grs/cm³, según el tamaño de los granos. Este valor que se refiere a la densidad de las partículas sí influirá de manera notable en la aptitud de autocompacidad del hormigón. Este peso capacita en mayor o menor grado la flotabilidad de cada una de los gránulos (áridos o arenas) sobre la pasta de cemento fluida. Un árido con mayor peso específico requerirá mayor densidad y cohesividad de la pasta para que los granos no choquen entre sí. Podemos afirmar que a igualdad del resto de condiciones, entre mayor es este contacto entre las partículas, más energía será necesaria para conferir plasticidad al hormigón fresco. Además una densidad y cohesividad alta es antagónica con la fluidez; como ya hemos despejado para los HAC, debe mantenerse un equilibrio entre estas propiedades.
- Por otra parte, a igualdad del resto de condiciones y de alteraciones microestructurales, en términos generales podemos decir que la densidad del árido es directamente proporcional a su resistencia mecánica. A más densidad del árido, mayor será su capacidad mecánica frente a la rotura. Este dato es importante en el caso de los hormigones con altas resistencias donde la fractura se produce a través de las debilidades del árido.

- Al acercarnos nuevamente al proceso para producción de áridos para construcción según sus diferentes tamaños, podemos advertir que el 100% de la roca triturada procede de la cantera fonolítica, con lo que en la actualidad desaparece totalmente la posibilidad accidental de mezclado con otras rocas. Sin embargo, conocemos que la situación de esta cantera y su proceso de producción y almacenamiento de áridos se encuentra en un lugar muy ventoso. Esta circunstancia puede implicar un depósito de finos de todo tipo sobre el producto final a la hora de ser utilizado. Se sabe que es necesario un control exacto de los materiales constituyentes para la ejecución de HAP, por lo que es imprescindible controlar estas circunstancias.

Al examinar visualmente con ayuda de la fotografía digital de gran aumento y con programas informáticos para el control de imagen percibimos que aunque a simple vista la totalidad del árido parece sano, existe un pequeño porcentaje, en torno al 5% de las piedras, que están moderadamente alteradas. Éstas se reconocen por presentar una tonalidad más clara y un aspecto menos cristalino con una superficie más rugosa. Por coherencia, creemos que estas piezas proceden de las zonas adyacentes a las fracturas que se observan en la pared de la cantera. A medida que el tamaño del árido es más pequeño, va disminuyendo también este porcentaje de piedras alteradas. Esto es debido a que durante el proceso de machaqueo van rompiendo por estas debilidades internas, quedando los granos más compactos de la roca. Esta observación es importante para la ejecución de altas resistencias debido a la rotura de este hormigón a través de las debilidades del árido.

- La mayor desventaja de un alto número de granos alterados proviene de su superficie áspera. La macrovisión que nos ofrece la fotografía digital denota una superficie altamente fruncida frente a los áridos sanos. A efectos de la producción de HAC, esta circunstancia generará irregularidades en la

absorción de agua del árido, así como en el contenido en finos. Este desvarío vendrá en función de la cantidad mayor o menor de granos alterados.



Árido fonolítico de machaqueo 10/20 (Escala 5:1)

- Con respecto al global de estos áridos, la morfología es angulosa y la superficie áspera. Se observa una disimetría en un porcentaje elevado de las piedras relacionada con el lajeado de la roca. Al examinar con lupa binocular, no se observa la existencia de poros ni de vesículas en estos áridos fonolíticos. Sí se comprueba la presencia de minúsculos cristales. La textura interna de estos áridos corresponde a la de un cuerpo con desiguales tamaños de granos de tipo cristalino sobre una matriz con carácter fluidal marcado. Se puede comprobar la dirección del flujo magmático así como el color verdoso del fondo. En alguna de sus caras se puede visualizar una superficie escamosa,

reconocida por la sensación de un moteado de tonalidad clara (reflejo de la luz) sobre el fondo más verdoso.



Árido fonolítico de machaqueo 5/10 (Escala 3:1)

- Al valorar estos datos, ratificamos que distan mucho de ser los más adecuados para la ejecución de hormigones de altas prestaciones. Encontramos unas cualidades negativas como su forma angulosa, incluso lajeada, frente a una ideal esférica; una superficie rugosa, diferente de la idónea que sería pulida. Estas circunstancias repercuten en un mayor rozamiento entre las partículas cuando el hormigón se encuentra en estado fresco. La consecuencia comprende una menor tendencia a la fluidez de la mezcla. Además, esta escabrosidad en la superficie del árido tiende a la retención de agua en forma de humedad y también a la acumulación de finos. El agua influirá negativamente en la capacidad resistente del hormigón resultante y los finos inciden también en una mayor demanda de agua con lo que se duplica el problema. La consecuencia última para el hormigón comprende una zona de transición, entre el árido y la matriz de pasta de cemento, con una banda más ancha y con una relación agua/cemento mayor que en la propia pasta. El resultado incidirá en menor capacidad mecánica del hormigón tanto a

compresión como a tracción y desde el punto de vista de la autocompacidad es una más heterogénea mezcla; con zonas de masa fluidas pero cohesivas y con exceso de agua en los bordes del árido.

- Al realizar los exámenes de cada uno de los áridos gruesos fonolíticos según su tamaño - 4/10, 10/20 y 20/40 -, encontramos que hay un mayor índice de lajas cuanto más pequeño es el tamaño del árido (UNE 933 - 3/97). Recogemos los siguientes valores según tamaño:

Tamaño del árido	Índice de lajas (Media de resultados)
20/40	21
10/20	25
4/10	33

Aunque todos se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma ("*inferior a 35*"), esta diferencia expresa que los más pequeños son menos tendentes a la fluidez.

- De igual manera ocurre al comparar la forma general del árido, donde notamos que según el coeficiente de forma los áridos más pequeños son menos propensos a fluir:

Tamaño del árido	Coefficiente forma
40/80	Poliédrico *
20/40	0,25 %
10/20	0,26 %
4/10	0,19 % **

(*: Examen visual en cantera) (**: Debajo del permitido en norma - 0,20 %)

- Al determinar el contenido de finos que pasan por el tamiz 0,063 (UNE EN 933 - 2/96) comprobamos que los áridos con tamaño más pequeño contienen más cantidad de finos:

Tamaño del árido	Contenido en finos (Media de resultados)	
20/40	0,21 %	
10/20	0,35 %	(Max: 0,36 - min: 0,35)
4/10	1,04 %	(Max: 1,19 - min: 0,94)
0/4	5,09 %	(Max: 6,20 - min: 2,21)

Este porcentaje de partículas finas es admisible en el tamaño de áridos gruesos, pero acaba convirtiéndose en excesivo para el tamaño 0/5, que corresponde a la arena fonolítica procedente de machaqueo. Como ya hemos comentado, el aumento del contenido en finos afecta de manera negativa en la ejecución de un HAC. González-Isabel (1993) nos advierte de lo poco recomendables que son las arenas de machaqueo.



Arena fonolítica de machaqueo 0/5 (Escala 4:1)

Una vez más lo más perjudicial no es este alto porcentaje, sino el enorme vaivén entre unas partidas y otras (*desde 2,21 % hasta un 6,20 % en nuestros ensayos*). Esta variación produce un descontrol en la reología de la dosificación cuando trabajamos con hormigón autocompactante, resultando una mezcla más compleja cuando este contenido es alto.

- La absorción de agua en estos áridos y arenas fonolíticas tampoco presenta una valoración muy positiva. La superficie áspera y no pulida de las caras en cada uno de los granos tiende a la retención de agua en forma de humedad. Esta situación aumenta en el caso de esta cantera por la existencia de una humedad alta durante la noche, debido a la cercanía del mar. Los datos del laboratorio reflejan una absorción de agua en torno al 2% para los gruesos que se elevan al 3% en las arenas. Destacamos una vez más la oscilación de los valores en los tamaños más pequeños:

Tamaño del árido	Absorción de agua (Media de resultados)	
20/40	2,30 %	
10/20	2,09 %	(Max: 2,15 - min: 2,03)
5/10	1,88 %	(Max: 1,91 - min: 1,85)
0/5	3,21 %	(Max: 3,40 - min: 3,01)

Este dato vislumbra el agua que contienen los áridos y por tanto debe ser tenida en cuenta en la dosificación de los constituyentes de un HAC. De lo contrario, resultaría un exceso de agua en la mezcla. Sin embargo, la varianza existente en este valor implica incertidumbre en la operación de dosificación y en su resultado como hormigón autocompacto.

La arena amarilla del Sahara no procede de la cantera anteriormente tratada, ni siquiera del Archipiélago Canario (A los efectos de nuestra tesis la tratamos como material constituyente canario en tanto que en nuestro sector de construcción se tiene asumida por lo cercana, económica y tradicional de su uso). Esta arena es de origen sedimentario, de procedencia desconocida (debido a circunstancias de recelo comercial), aunque no nos cabe ninguna duda de que se trata de arena natural sedimentaria procedente del desierto de dunas del Sahara. Es una arena de trabajo de la empresa de prefabricados *DOLCAN*, que a su vez ha sido proporcionada por *GRANINTRA*, como importadores. En lo que a las diferentes partidas se refiere, se trata de un árido completamente regular que no ofrece ninguna variación a lo largo de estos años de trabajo. A continuación presentamos nuestras valoraciones sobre esta arena de trabajo:

- Presenta un tamaño uniforme entre 0 y 1 milímetro (0/1). La forma no es esférica cuando se contempla con lupa binocular, pero sin embargo no presenta ninguna arista en forma de aguja o lajeada, ni siquiera poliédrica. Todos los encuentros entre las distintas caras del grano son redondeados. También todo el gránulo presenta una superficie especular lisa, incluso podríamos decir que pulida.



Arena natural del Sahara 0/1 (Escala 5:1)

- El conocido color “amarillo” le proviene de la mezcla de infinitas piedras de diferentes colores y tonalidades que van desde el blanco o transparente hasta el marrón, pasando por el beige, castaño, rojizo, amarillo... Existen también de manera excepcional pero muy bien integradas en el conjunto granos de alguna tonalidad verde oscuro, grises o negro.
- Esta arena muestra una apariencia correcta para la ejecución de HAC. No presenta reactividad al alcalis de cemento, no contiene terrones de arcillas, ni materia orgánica. El contenido en sulfatos y cloruros cumple con holgura el máximo permitido. Tiene un peso específico de 2,60 grs/cc.
- Destacamos que presenta un índice de absorción de agua bajo (1,83%) teniendo en cuenta el tamaño de arena (0/1). También contiene un bajo contenido en finos entre sus granos. Estas características que lo hacen un tipo de arena correcta para la dosificación de autocompactos viene determinada por la forma redondeada y principalmente por la superficie cristalina y pulida. Este pulimento es fruto de la sedimentación y rozamiento entre partículas a lo largo del tiempo.



Arena natural del Sahara 0/1 (escala 20:1)



Arena fonolítica de machaqueo 0/5 (escala 10:1)



Árido fonolítico de machaqueo 5/10 (escala 15:1)



Árido fonolítico de machaqueo 5/10 (escala 15:1)



Árido fonolítico de machaqueo 10/20 (escala 15:1)



Árido fonolítico de machaqueo 10/20 (escala 15:1)

• **Adición:** A lo largo del capítulo segundo acerca del estado del arte razonábamos la necesidad de adiciones para la ejecución de HAP. Entre las recomendables se apuntaba las cenizas volantes, humo de sílice o filler calizo principalmente. El humo de sílice se consideraba imprescindible para la ejecución de resistencias superiores a los 80 MPa. No obstante, tanto esta adición de microsílíce como las cenizas volantes no son de factible importación a Canarias. En tanto que nuestra principal intención no era el logro de altas resistencias - por encima de 80 MPa - se desestimó durante los primeros experimentos la opción del humo de sílice como única adición. Sin embargo, en los últimos ensayos se plantea la inclusión de una pequeña cantidad de estas micropartículas con la intención de aumentar los finos para controlar la segregación y exudación. Además se podría mejorar la resistencia, la impermeabilidad y la durabilidad.

Por otra parte, González-Isabel (1993) ya nos apuntaba los buenos resultados con el filler calizo para prefabricados. Atendiendo a estas consideraciones y previendo nuestra aplicación en paneles prefabricados se estudió la posibilidad del fino calizo. Al comprobar además la realidad de la importación de este material como adición - existen otras empresas que lo importan a Gran Canaria desde la Península -, se optó primeramente por esta adición y los buenos resultados nos animaron a continuar. La adición consiste en una arena de Carbonato Cálcico ($\text{CO}_3\text{Ca} = 99,3\%$) con un alto contenido en finos, procedente de la Minera del Santo Ángel, en Gilena (Sevilla) y presenta los siguientes datos:

Ph	8,2
Peso específico	2,73
Densidad aparente	1,52 gr/cc.

El análisis granulométrico se ofrece en el anexo al capítulo quinto (*véase R12*), en el grupo de los componentes del hormigón de trabajo. Se trata de una arena con una

curva granulométrica muy regular que indica un contenido de tamaños de granos muy completo y muy adecuado para HAC. Su valoración expone que se trata de una arena con un contenido en finos (menor de 0,063) que corresponde al 15,5% de su peso.

5.2.2. Dosificación del hormigón base

Tras el análisis de los componentes característicos para la confección del hormigón en Canarias, se realiza una búsqueda de la dosificación tipo como hormigón habitual canario. Se trata de un apartado complejo donde se analizan variadas mezclas de hormigones. Pasamos a recoger a continuación algunas determinantes para nuestra posterior elección:

- Ejemplo de dosificación básica: la siguiente mezcla la hemos encontrado de manera no formal en la construcción no industrializada en Canarias:

Cemento	300 Kg/m³	Tipo I 42,5 R A-P
Áridos	1.280 Kg/m³	De machaqueo
Arena	640 Kg/m³	Mixto (natural y machaqueo)
Agua	200 Kg/m³	
Relación A/C	0,66	A/C: ¡NO CUMPLE! *
Consistencia	Plástica	
Asiento cono Abrams	3 - 5 cms	
Resistencia característica	25 MPa	

*: Esta mezcla no cumple con la normativa establecida debido a la relación agua/cemento que resulta mayor del índice 0,55 o 0,60 que prescribe la EFHE para los casos habituales de Canarias.

- Ejemplo de dosificación industrial actual: este ejemplo constituye la muestra de una planta de hormigón a nivel industrial. Hemos seleccionado para este ejemplo una empresa de prefabricados por la aplicación práctica para paneles de nuestra tesis. Aunque existe variedad en la dosificación según el elemento prefabricado, se ha seleccionado una mezcla genérica para paneles de fachada:

Cemento	350 Kg/m³	Tipo I 42,5 R A-P
Áridos	980 Kg/m³	De machaqueo
Arena	980 Kg/m³	Mixto (natural y machaqueo)
Agua	175 Kg/m³	
Relación A/C	0,5	
Ad. fluidificante	1,3 % cem.	Copolímero de vinilo
Asiento cono Abrams	6 - 9 cms	
Resistencia característica	40 MPa	

Estos modelos no suponen la totalidad del hormigón canario. Son únicamente alguna muestra del hormigón actual que se ejecuta en la construcción de Canarias.

Para la selección del hormigón convencional base, que aparece reflejado en la primera dosificación del anexo al capítulo quinto con el número R001, se ha escogido la que presentamos a continuación. Esta mezcla presenta unas características muy buenas.

material	referencia	% sólidos	Kg./m3	% áridos	% total
CEMENTO	I / 42,5 R	16,3	352	----	15,0
ARENA 0/1	SAHARA	15,0	323	17,9	13,8
ARENA 0/5	ARICAN	22,5	485	26,9	20,7
ÁRIDO 5/10	ARICÁN	17,6	379	21,0	16,2
ÁRIDO 10/20	ARICÁN	28,6	617	34,2	26,3
AGUA	abasto	----	189	----	8,1

La relación agua/cemento es muy adecuada. La consistencia se encuentra dentro del límite entre plástica y blanda, lo que la hace bastante dócil. Las resistencias mecánicas se ajustan con comodidad a la normativa establecida.

relación A/C=	0,536
CONO ABRAMS=	6 centímetros

RESISTENCIA:

7 Días	28 Días	90 Días
31,0 MPa	41,7 MPa	50,6 MPa

Teniendo en cuenta lo expuesto en los anteriores puntos acerca del hormigón habitual en Canarias, consideramos esta mezcla como un desarrollado punto de inicio a partir del cual comenzamos a progresar en la dosificación hacia un mayor número de prestaciones ofrecidas por el hormigón.

5.3. HORMIGÓN DE ALTAS RESISTENCIAS - HAR -

En el hormigón convencional canario hemos interpretado el uso habitual de una alta relación agua/cemento, debido a la necesidad de hidratar completamente el cemento y también con la intención de mejorar las condiciones de trabajabilidad del hormigón fresco. Nuestro equipo de investigación deja claro la necesidad de controlar esta relación A/C al límite de 0,55 en términos generales y en circunstancias excepcionales alcanzar el valor 0,60, nunca superarlo. Hemos demostrado que con el uso de superfluidificantes es muy viable el éxito. Conocemos los problemas del cemento y las circunstancias de los áridos, pero hoy en día éstas no son razones para continuar con este atraso. Además, es sabido que estos valores de A/C conllevan aparejadas unas resistencias que cumplen justamente con los mínimos exigidos.

El logro de unas más altas resistencias pasa por la reducción del agua en la dosificación. Para alcanzar la posibilidad de hidratar completamente el cemento además de una buena trabajabilidad con menos agua, la solución pasa por la introducción en la mezcla de superfluidificantes de última generación. Tras algunos ensayos donde estudiamos la inclusión de estos aditivos en la mezcla, encontramos las siguientes valoraciones (*véase ensayos R001 hasta R006*):

- Al emplear superfluidificante en una mezcla de hormigón convencional canario con el objetivo de reducir el agua de amasado, apreciamos unos beneficiosos efectos en todas las características del hormigón. En referencia a nuestros ensayos podemos concretar que sirviéndonos de un superfluidificante genérico - disponible en el mercado de Canarias; (SVC - 5-9003) - y atendiendo a sus recomendaciones técnicas, obtenemos una disminución de la relación A/C desde el valor 0,536 hasta el 0,408. Esto supone una disminución de 51 litros de agua por metro cúbico a cambio de añadir 5 litros de fluidificante. Paralelamente se ha obtenido una reducción del contenido de cemento en 13 kilogramos concatenado al aumento proporcionado de los áridos y arenas. Las consecuencias positivas son evidentes tanto en estado fresco como endurecido. Se mejora la trabajabilidad del hormigón remontando de tener una consistencia blanda con un asiento en cono de Abrams de 6 centímetros hasta una consistencia líquida con un asiento de cono de 18 centímetros. Además presenta una apariencia cohesiva que refleja la correcta adherencia entre el árido y la pasta. La resistencia a compresión a los 28 días pasa de 41,7 MPa para el hormigón sin aditar hasta 50,4 Mpa cuando se le añade el superfluidificante. Estos valores suponen un aumento del 21% en la capacidad resistente del HC, alcanzando además para este ejemplo la condición de hormigón de altas resistencias. El coste económico de estos beneficios evidentes supone un

aumento de 10 euros por metros cúbico de hormigón. Como reflejo de nuestros ensayos exponemos la siguiente tabla:

	HC	HAR	
Agua/m³	189 litros	144 litros	Disminuye un 24%
Resistencia (28 días)	41,7 MPa	50,4 MPa	Aumenta un 21%
Consistencia (Cono)	Blanda (6 cms)	Fluida (18 cms)	Mejora la trabajabilidad
Homogeneidad	Buena	Buena	Cohesividad correcta
Precio	36 (€/m ³)	47 (€/m ³)	Aumento de 10 €/m³

Estos resultados coinciden en términos definitorios con las investigaciones aportadas de nuestra Universidad acerca de la dosificación de hormigones canarios con superfluidificantes (GUIGOU, 1993).

- Manteniendo la inclusión de superfluidificante en cantidades recomendadas por la firma, prescindimos en la mezcla del árido de mayor tamaño (10/20). Nuestra intención es mantener las altas resistencias con una mayor proporción de mortero y disminución del árido grueso. Con esta propuesta estamos dando superior relevancia a la capacidad mecánica de la matriz del mortero frente a la resistencia propia de la roca. Los resultados en esta segunda propuesta para los HAR son ilustrativos. Se mantienen las resistencias a los 28 días por encima de los 50 MPa, sin embargo la consistencia ha bajado de líquida a plástica, incluso seca. Esta circunstancia sucede incluso para una proporción de agua mayor. La explicación para esta contingencia se halla en el cambio de superfluidificante (Chriso; Premiá-180) y de las proporciones del mismo. No obstante, para nuestro interés se debe tener en cuenta la mayor absorción de agua en las arenas y áridos de machaqueo pequeños frente a los mayores debido a la mayor superficie específica, el mayor contenido en finos y el peor coeficiente de forma (véase apartado 5.2.1-áridos). Otra valoración que conviene considerar respecto

a este HAR es que si las probetas de ensayos a compresión no se pican y vibran (según UNE) sufren una merma en las resistencias del 20% a los 28 días. Podemos leer los datos más relevantes en el siguiente gráfico y ahondar más en las ensayos del anexo:

	HAR (T. Máx=10/20)	HAR (Tam. mín=5/10)	
Mínima relación A/C	0,41	0,47*	* Cambia el spfl. y su proporción.
Resistencia (28 días)	50 MPa	55 MPa**	** :45 MPa cuando las probetas no se vibran, ni pican.
Contenido Ár. Grueso / Ár. total	55%	40%	

Además la apariencia es correcta en ambos hormigones y el precio no varía.

Al comparar el HC de inicio con el HAR conseguido desde los primeros ensayos comprobamos las mejoras factibles en el hormigón habitual canario con la inclusión de aditivos superfluidificantes de última generación. Destacamos las siguientes:

1º. Se consigue reducir el agua.

	HC	HAR
Relación A/C	0,536	0,408

2º. Consecuentemente se mejoran las resistencias.

	HC	HAR
Resistencias a compresión (28 días)	42,9 MPa	56,7 MPa

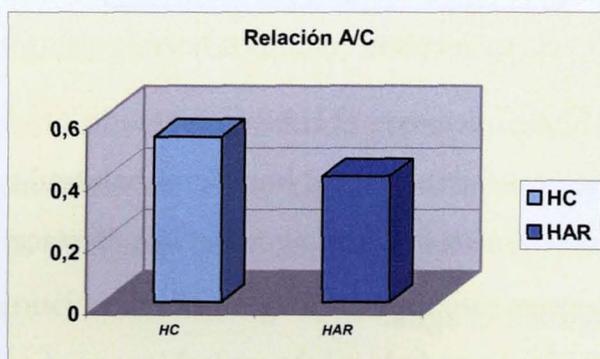
3º. Se mejora la trabajabilidad.

	HC	HAR
Consistencia (Cono Abrams)	Plástica - Blanda (Cono 5 - 6)	Fluida (Cono 17 - 20)

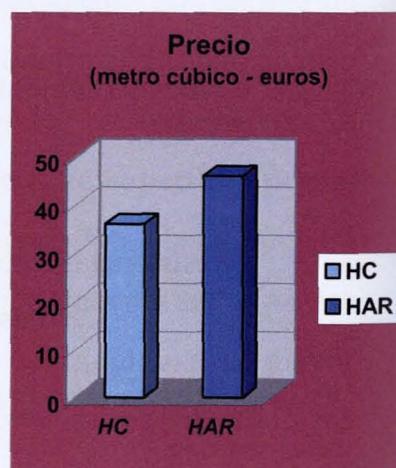
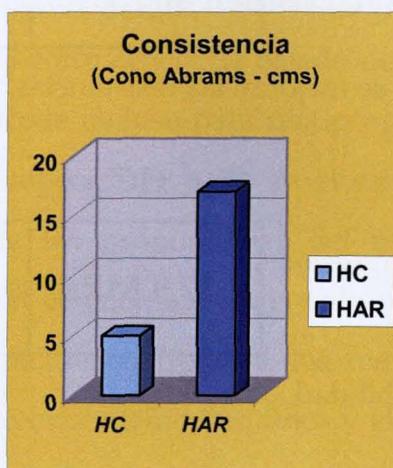
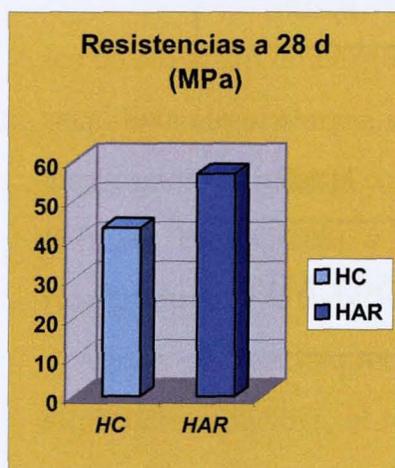
4º. Esta mejora conlleva un aumento del precio.

	HC	HAR
Precio por metro cúbico	36 €/m³	46 €/m³

Gráficamente podemos comprobar que la inclusión de superfluidificante en un hormigón canario de uso habitual supone la siguiente disminución de la relación agua/cemento:



Esta disminución de la relación A/C tiene estas derivaciones:



Estos primeros ensayos han supuesto el primer contacto con los materiales de trabajo para la búsqueda de mejoras en el HC. Éstos resultan coherentes con nuestro desarrollo de la evolución del hormigón internacional (*véase capítulo 2*) y adaptado a las investigaciones del hormigón canario en los últimos años (*véase capítulo 3*). Damos por cumplido el fin de los ensayos con HAR para el cometido inicial de nuestra investigación, no obstante, somos conscientes de la necesidad de ahondar más a partir de estos resultados para la próxima evolución del hormigón de altas resistencias en Canarias. Dejamos constancia de que una de las líneas de investigación futura en nuestro equipo de investigación abarca el campo de las altas resistencias con hormigón en Canarias. Por nuestros ensayos posteriores para los HAP, sabemos que somos capaces de superar estas resistencias expuestas. Sin embargo, reiteramos que nuestro cometido principal en esta tesis consiste en evolucionar hacia los hormigones de altas prestaciones, en especial, hacia la autocompacidad.

5.4. HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES - HAP -

Una vez reflejado con nuestros ensayos que es posible realizar hormigones de altas resistencias con estos áridos fonolíticos de machaqueo, avanzamos en las primeras experiencias hacia los HAP con la búsqueda de una mayor fluidez. Ésta pretende ser paulatina y controlando en todo momento la homogeneidad de la mezcla.

En este proceso consideramos la opción del diámetro máximo de árido como un aspecto fundamental en el control de la reología del hormigón fresco. Las referencias generales estipulan un tamaño máximo de árido de 20 milímetros y consideran la opción de reducir el tamaño a 15 milímetros cuando se trata de áridos de machaqueo. La muy deficiente forma de nuestros áridos inducen a un mayor rozamiento entre partículas, más aún cuando existen granos de mayor

tamaño. Este choque entre partículas estanca en gran medida la fluidez y principalmente conlleva a una mayor facilidad de segregar. Esta segregación la podemos observar en nuestros ensayos cuando los áridos de mayor tamaño colisionan entre sí, dejando escurrir la pasta fluida y el agua por los intersticios que quedan entre estos gruesos. En este sentido presentamos como primera propuesta del HAP la reducción a 10 milímetros del tamaño máximo del árido.

La segunda propuesta para estos ensayos es la inclusión de una adición fina. Al contrario que los aditivos, este componente no es una obligatoriedad aunque todas las referencias lo citan como recomendable. El humo de sílice es necesario para conseguir altas resistencias, sin embargo, no es éste nuestro objetivo. La adición escogida es el filler calizo. No se trata de una adición fina al 100%, sino de una arena 0/2 con un alto contenido en finos (véase R014, de los anexos al capítulo quinto). Esta circunstancia aprovecha el alto contenido en partículas con tamaño menor de 0,063, conveniente en un HAP, pero además beneficia particularmente al hormigón canario debido a los granos del tamaño de la arena (retención en tamices entre 0,063 mm y 2 mm). Estos gránulos complementan a la arena canaria creándole una curva más regular. Por una parte, proporciona una cantidad homogénea de todos los tamaños de granos y por otra mejora la dispersión existente en el contenido en finos, debido al menor contenido en arena de fonolita, la cual presenta un alto y variable porcentaje en finos según partida.

Con estas propuestas esenciales en nuestra dosificación, una vez eliminado el árido 10/20 en los ensayos previos, conseguimos los primeros resultados al incorporar la adición caliza. En base a los HAR anteriores, estos efectos son:

	HAR	HAP^(1º)	(1º) Primeros ensayos HAP (hasta R012)
Relación A/C	0,470	0,599	
Consistencia (Cono)	Plástica (cono 4)	Líquida* (Ø 68 cms)	*: A partir de estos momentos, los valores de consistencia de Abrams resultan obsoletos.
Apariencia	Seca, pero homogénea	Fluida, pero segregada	
Contenido			
Ár. Grueso / Ár. total	40%	43%	
Resistencia (24 horas)	17,9 MPa	8,5 MPa	Reducción del 52 % de la resistencia
Resistencia (7 días)	35,4 MPa	26,4 MPa	Reducción del 25 % de la resistencia
Resistencia (28 días)	44,9 MPa	40 MPa	Reducción del 11 % de la resistencia

Ante estos datos podemos inferir los siguientes puntos:

- 1º. Los primeros ensayos en los que conseguimos una consistencia totalmente líquida ponen en evidencia la invalidez de los procedimientos de ensayos para hormigones tradicionales.
- 2º. A pesar de esta fluidez, la comprobación visual muestra un material heterogéneo con un montículo donde queda colapsado el árido grueso mientras la pasta y el agua se deslizan por el perímetro. Por su heterogeneidad, estas mezclas no funcionan como hormigón. No obstante, son de gran utilidad para comprender la reología de los constituyentes de nuestro hormigón, en concreto, para observar detenidamente el movimiento de los gruesos flotando en la pasta.
- 3º. Baja la capacidad mecánica de resistencias a compresión. En este aspecto, es destacable que la resistencia a edad temprana disminuye un alto porcentaje frente a la resistencia tras la completa hidratación del cemento. Este

resultado se debe valorar con las reflexiones anteriores para hormigones canarios con superfluidificantes, donde ya se anotaba el aumento relativo de resistencias tempranas frente a las tardías (GUIGOU, 1993).

Cuando continuamos con los ensayos para hormigones, desde los HAR hacia los HAP, lo hacemos con la seguridad de saber que éste es el mejor camino para seguir tras los pasos evolutivos del hormigón internacional. Hacemos una serie de experimentos de prueba de materiales y de tiempos de amasado. De esta manera conseguimos ratificar la correcta selección de constituyentes, en función de nuestra investigación y ajustamos los tiempos de trabajo.

- 4°. Una vez vertido del superfluidificante, entre más tiempo de mezclado en la amasadora más alta es la resistencia.
- 5°. Cuanto mayor sea el tiempo de mezclado más baja será la fluidez. Además, si prolongamos el tiempo de amasado 15 minutos, aunque aumentemos el agua o la cantidad de superfluidificante, ya no aumenta más la fluidez y sin embargo bajan las capacidades mecánicas. (Hablamos de fluidez, porque todavía no podemos hablar de autocompacidad).
- 6°. El humo de sílice absorbe de manera drástica la fluidez de la pasta. Podemos comprobar que una misma dosificación a la que añadimos microsílíce en un 3% del peso del cemento, su flujo de asentamiento baja de un diámetro de 73 centímetros antes a un diámetro menor de 40 centímetros. Si bien es cierto que su apariencia es cohesiva y homogénea. De igual manera que la añadidura de microsílíce es inversamente proporcional a la fluidez, encontramos que el mismo aumento es directamente proporcional a la capacidad resistente (véase R018.1 y R018.2).

La fase de ensayos que comprende los HAP ha sido clave en el desarrollo de esta parte experimental de la tesis. Por un lado, hemos ido avanzando

evolutivamente en nuestro hormigón consiguiendo una dosificación cada vez más estable y homogénea. Además en la búsqueda de esta vía hemos examinado nuevos materiales que han quedado en el intento por resultar contrarios a las expectativas creadas. Nos referimos a una arena natural procedente de Escocia, polvo de mármol, diversas adiciones finas minerales, árido fonolítico de machaqueo 10/20, otros tipos de cemento. Estas tentativas reflejan numerosos ensayos en la campaña experimental dignos de una nueva investigación particular acerca de los comportamientos del hormigón en base a éstos.

En esta fase de los HAP mantenemos unas resistencias a compresión por encima de los 45 MPa de manera estable. Además, cualificamos al hormigón de otras prestaciones que lo definen. En primer lugar conseguimos una mejora de la trabajabilidad del hormigón que se refleja en las condiciones de trabajo del laboratorio. En este sentido, los ensayos se agilizan en el tiempo y además se evitan algunas tareas. Bien es cierto que este aprovechamiento del tiempo y de la energía de nuestro equipo de trabajo lo transformamos en la realización de más ensayos. No cabe duda de que este hecho también se reflejaría en tareas de hormigón prefabricado o elaborado. Este aspecto lo demostramos con una serie de realizaciones prácticas en la industria de prefabricados *DOLCAN*. Los trabajos generales de ejecución de paneles de hormigón se aligeran. A cambio, nuestro equipo de investigación acompañado del equipo de control de calidad de la empresa realiza múltiples ensayos necesarios para la investigación.

Es necesario destacar puntualmente la serie de ensayos dedicados a los hormigones de altas prestaciones pigmentados - HAPP -. Nuestra Escuela de Arquitectura de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria siempre ha tenido especial interés por el hormigón pigmentado y la decisión de aplicar nuestras altas prestaciones en fachada radican en nuestra condición de arquitectos y en este interés por los pigmentos como adición (PÉREZ LUZARDO, 1991).

Como resultado de estos ensayos de HAP (R025 - R090) resaltamos las siguientes consideraciones:

1º. Hemos aumentado el cemento desde los 340 Kgs/m³, en los HAR y primeros ensayos de los HAP, hasta los 370 Kgs/m³. Paralelamente, también hemos subido el contenido de agua proporcionalmente para mantener una relación agua/cemento dentro de lo condescendido en Canarias (A/C entre 0,56 y 0,59). En los casos en los que el cemento ha subido de 400 Kgs/m³ la mezcla no ha alcanzado suficiente fluidez para esta dosificación de superfluidificante recomendada.

Paralelo a este aumento de cemento y agua han disminuido ligeramente los áridos de machaqueo (gruesos y arenas). Para esta curva granulométrica, si reducimos el agua se merma la capacidad de fluir y si aumentamos el cemento también baja la fluidez. En esta segunda opción entramos en el peligro de mayor calor durante el proceso de fraguado con el consiguiente curado y posibilidad de retracción. Para aumentar la pasta, además de incrementar la cantidad de cemento y agua, se opta por la adición de filler. Éste lo aprovechamos del alto contenido en finos de una arena caliza 0/2 que además aporta regularidad a la curva de las arenas. Con ello, acrecentamos la proporción de arena del Sáhara y de arena caliza de la Península Ibérica, disminuyendo las arenas fonolíticas.

2º. Se disminuye el contenido en gruesos por debajo de las recomendaciones referenciadas. El porcentaje de áridos mayor de 4 milímetros con respecto al árido total resulta entre un 40% y un 45%, debido al coeficiente de forma e índice de lajas tan perjudicial de nuestras rocas de construcción.

3º. La proporción de superfluidificante es una cuestión característica de los HAP. Depende principalmente del tipo de superfluidificante y de la saturación de la relación cemento/superfluidificante, en función del cemento.

También dependerá en segunda instancia del conjunto de los constituyentes del hormigón. En el caso del superfluidificante utilizado (*CHRISO; Premio-180*), el índice de saturación corresponde al 1,35% del peso del cemento. Por debajo de este porcentaje, aumenta proporcionalmente la fluidez y por encima de este valor ya no se consigue que fluya más, además de incrementarse la tendencia a la segregación.

5.4.1 Hormigón de altas prestaciones pigmentados - HAPP -

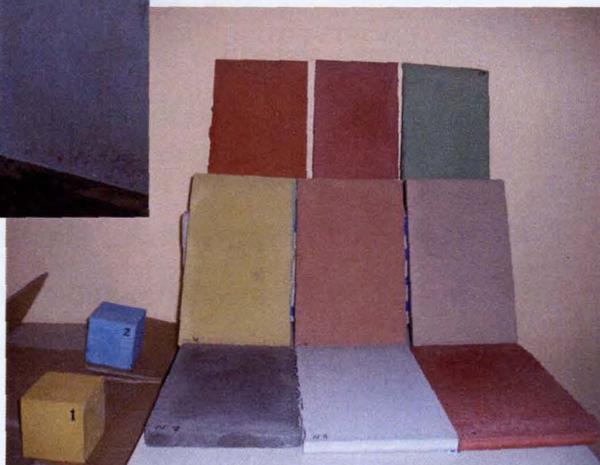
Si a este hormigón de altas prestaciones lo queremos pigmentar mejoraremos sus cualidades estéticas en fachadas. En función de las características de cada pigmento resultará modificada la condición de la fluidez. Para estudiar este aspecto recomendamos los trabajos de investigación acerca de hormigones pigmentados de la Escuela de Arquitectura de Las Palmas (véase p. ej. PÉREZ LUZARDO, 1990). A partir de nuestros experimentos podemos extraer las siguientes consideraciones particulares. Los pigmentos utilizados en esta serie son de la firma comercial *Bayer* y de *Blumerox* (no se aprecian diferencias significativas):

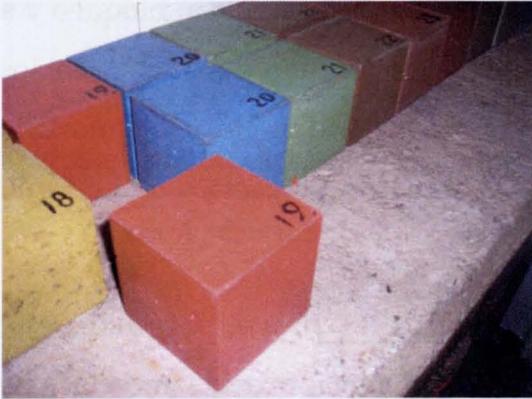
4º. El grado de saturación de los pigmentos para el establecimiento del color en el hormigón lo establecemos en el 6% del pigmento con respecto al peso del cemento en el caso de los cementos grises y en el 2% para el caso de los cementos blancos. Este dato debe considerarse también a efectos de la economía debido a la bajada de precios del cemento blanco en los últimos años. En este sentido, resulta más rentable una dosificación con cemento blanco y un 2% de pigmento que la misma con cemento gris y un 6% de pigmento, manteniendo siempre las mismas capacidades mecánicas y mejorando incluso la tonalidad superficial.

5°. La fluidez en los hormigones de altas prestaciones pigmentados se presenta como una nueva línea de investigación futura de nuestro equipo. Podemos afirmar como primera indicación que el pigmento amarillo requerirá aumentar entre un 5 y un 8% el agua de amasado e incrementar también entre un 7 y un 10% el superfluidificante de la dosificación, con respecto al pigmento rojo para obtener resultados correctos en hormigones autocompactantes pigmentados en Canarias.

6°. Al utilizar los pigmentos con cemento gris se obtiene como resultado una tonalidad más oscura y sin brillo que con cementos blancos, donde éste ofrece una mayor luminosidad de colores. Esta evaluación no supone una desestimación de cualquiera de los cementos sino una apreciación a la hora de seleccionar un tipo de cemento u otro en función de las particularidades de cada proyecto.

Mostramos a continuación la tabla de colores conseguida con estas dosificaciones de pigmentos y seguidamente algunos ejemplos edificados a partir de esta investigación.





5.5. HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE - HAC -

Cuando nos hemos considerado capaces de desarrollar un hormigón con un flujo de asentamiento mayor de 60 centímetros que no bloquee en las armaduras y con las herramientas necesarias para controlar la segregación ensayamos en la denominación de autocompacidad - HAC -. Esta serie de dosificaciones hasta la R130, que supone la última de esta tesis recoge unos hormigones que podemos considerar autocompactantes por la capacidad de relleno, resistencia al bloqueo y a la segregación. Este último requisito se presenta como el más dificultoso en los autocompactos canarios debido a las características de los áridos. Nos referimos a la tendencia a que los áridos gruesos se separen de la matriz de pasta o que ésta no tenga suficiente cohesión como para envolverlos.

Para evaluar esta segregación podemos acudir al ensayo del índice de estabilidad visual - IEV - que califica el grado de retención de la mezcla a la exudación de la pasta y lechada (FERNÁNDEZ y BURÓN, 2005). Según todos los resultados de los ensayos para HAC, podemos calificar esta serie de dosificaciones como de hormigones autocompactantes. Al evaluar la segregación a través de la exudación y en base al IEV se establece un índice 2 para los últimos ensayos de HAC (referencias entre R083 y R091); un índice 1,5 para los primeros ensayos de HAC y un índice de entre 0,5 y 1 para todas las últimas realizaciones de HAC (entre R104 y R130).

El planteamiento de nuestro hormigón autocompactante ha sido un buen esqueleto granular en una matriz de pasta de cemento fluida pero cohesiva. En primer lugar, la fluidez y la cohesividad de la pasta obedece al ajuste entre la relación agua/cemento y del superfluidificante/cemento. Este ajuste depende del tipo de cemento y de las propiedades del superfluidificante, pero también de las propiedades de los áridos y especialmente de las arenas. Una de las tareas de los

primeros ensayos fue emplear diferentes fluidificantes para comprobar la idoneidad del seleccionado (ALAEJOS y FERNÁNDEZ, 2000). Una vez escogido el aditivo, conformamos su relación $spfl/(a/c)$ con ayuda del ensayo de consistencia de pasta. En este experimento utilizamos un tronco de cono de 6 centímetros de altura, \varnothing inferior de 10 cms y \varnothing superior de 7 cms. Se toma una relación a/c fija y se ajusta la dosificación de superfluidificante hasta que resulte una extensión de flujo de 22 a 24 centímetros. Estas experiencias presentan los siguientes resultados:

Agua = abasto
Cemento = CEM II / A-P 42,5 N
Superfluidificante = CHRISO, Premia-180

- Para $A/C = 0,5$:

a) $spfl = 1\%$	Extensión: > 45 cms
b) $spfl = 0,7\%$	Extensión: > 45 cms

- Para $A/C = 0,4$:

a) $spfl = 1\%$	Extensión: > 45 cms
b) $spfl = 0,7\%$	Extensión: > 45 cms

- Para $A/C = 0,3$:

a) $spfl = 1\%$	Extensión = 42 cms
b) $spfl = 0,5\%$	Extensión = 14,5 cms
c) $spfl = 0,8\%$	Extensión = 39 cms
c) $spfl = 0,6\%$	Extensión = 22 cms

Una vez obtenido este resultado que establece idónea una relación $A/C = 0,3$ y una proporción de aditivo del 0,6% del peso del cemento, procedemos a incorporar las arenas y comprobar la fluidez a través del ensayo del embudo para morteros. Obtenemos los siguientes resultados:

Agua (abasto)	
Cemento (CEM II / A-P 42,5 N)	
Arena 0/1 (Sahara)	44% total áridos
Arena 0/5 (Arican)	29% total áridos
Arena 0/2 (Caliza)	27% total áridos

• Para $A/C = 0,3$:

a) spfl = 0,6% c	$T_0 =$ Bloqueo
b) spfl = 1% c	$T_0 =$ Bloqueo
c) spfl = 1,5% c	$T_0 =$ Bloqueo
d) spfl = 2% c	$T_0 =$ Bloqueo

• Para $A/C = 0,5$:

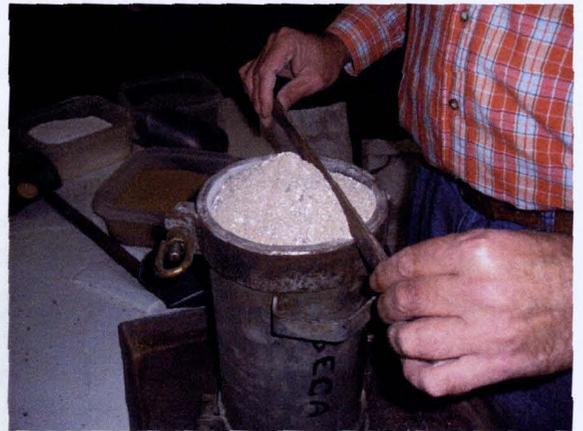
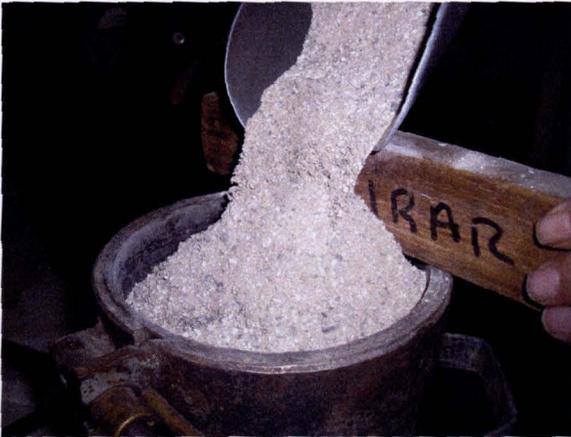
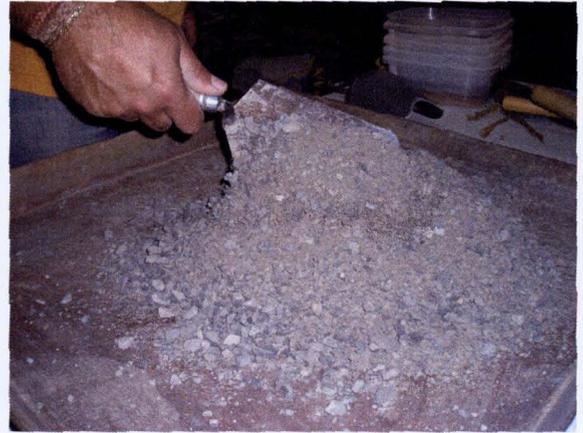
a) spfl = 1,2% c	$T_0 = 18$ sgs	$T_{5mts} =$ Bloqueo
b) spfl = 1,4% c	$T_0 = 16$ sgs	$T_{5mts} =$ Bloqueo
c) spfl = 1,6% c	$T_0 = 5$ sgs	$T_{5mts} = 10$ sgs
d) spfl = 1,8% c	$T_0 = 5$ sgs	$T_{5mts} = 8$ sgs
e) spfl = 2,3% c	$T_0 = 5$ sgs	$T_{5mts} = 7$ sgs
f) spfl = 2,8% c	$T_0 = 5$ sgs	$T_{5mts} = 8$ sgs
g) spfl = 3,3% c	$T_0 = 5$ sgs	$T_{5mts} = 8$ sgs



Según estos resultados obtenemos las siguientes valoraciones:

- 1°. Al realizar el ensayo de asentamiento de flujo en el cono para pasta, no encontramos diferencias significativas entre las proporciones de superfluidificante/cemento con respecto a las proporciones que se establecen para cementos del continente.
- 2°. Al incluir las arenas canarias con sus particularidades se transforma la circunstancia de fluir. No hemos podido conseguir fluidez con una relación agua/cemento de 0,3. Al pasar a una relación $A/C = 0,5$ hemos encontrado el punto de saturación del superfluidificante en el 1,6 % de éste con respecto al peso del cemento.
- 3°. Posteriormente, la dosificación de hormigón se ha ajustado a un valor de agua/cemento aproximado a 0,55 y un ajuste del superfluidificante al 1,35%.

No obstante y unido a estos resultados obtenidos, nuestro equipo considera necesario una mayor profundización en estas proporciones del mortero para conseguir mejoras en el hormigón autocompactante futuro. En este sentido, se propone ésta como una de las investigaciones futuras próximas.



Paralelamente a este ajuste del superfluidificante, hemos justificado un esqueleto granular idóneo para nuestro hormigón. Conociendo de partida las densidades aparentes de cada uno de los áridos, hemos realizado mezclas en seco con el fin de determinar la que mayor densidad presenta. En primer lugar se ha separado el árido y la arena de mayor tamaño de manera que ésta colme los huecos existentes entre aquellos granos. En segundo lugar se ha fijado la combinación idónea de arenas. En los ensayos para las distintas mezclas hemos obtenido los siguientes resultados:

- Densidad aparente de cada uno de los áridos:

MATERIAL	DENSIDAD APARENTE
Arena 0/1 (Sahara)	1,340 grs/cm ³
Arena 0/5 (Arican)	1,420 grs/cm ³
Árido 5/10 (Arican)	1,370 grs/cm ³
Arena 0/2 (Caliza)	1,380 grs/cm ³

- Mezcla 1^a:

Árido 5/10 (45%)	1,500 grs/cm ³
Arena 0/5 (55%)	

- Mezcla 2^a:

Árido 5/10 (50%)	1,494 grs/cm ³
Arena 0/5 (50%)	

- Mezcla 3^a:

Árido 5/10 (40%)	1,481 grs/cm ³
Arena 0/5 (60%)	

- Mezcla 4^a:

Árido 5/10 (35%)	1,476 grs/cm ³
Arena 0/5 (65%)	

- Mezcla 5^a:

Árido 5/10 (55%)	1,489 grs/cm ³
Arena 0/5 (45%)	

- Mezcla 6^a:

Árido 5/10 (47%)	1,494 grs/cm ³
Arena 0/5 (53%)	

- Mezcla 7ª:

Árido 5/10 (42%)	1,481 grs/cm ³
Arena 0/5 (58%)	

ESQUELETO GRANULAR DE MÁXIMA COMPACIDAD (Árido - arena)



- Mezcla 8ª:

Arena 0/5 (40%)	1,503 grs/cm ³
Arena 0/1 (30%)	
Arena 0/2 (30%)	

- Mezcla 9ª:

Arena 0/5 (30%)	1,507 grs/cm ³
Arena 0/1 (40%)	
Arena 0/2 (30%)	

- Mezcla 10ª:

Arena 0/5 (30%)	1,501 grs/cm ³
Arena 0/1 (30%)	
Arena 0/2 (40%)	

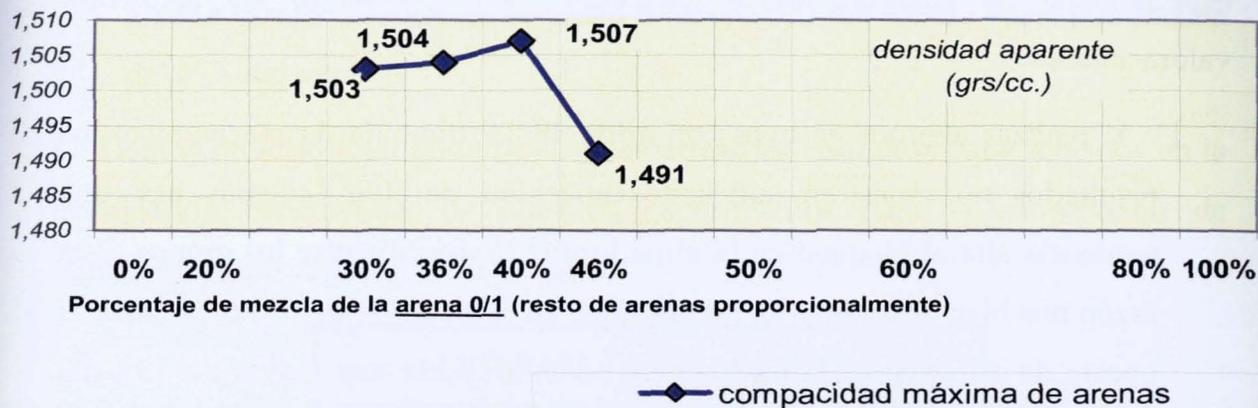
- Mezcla 11ª:

Arena 0/5 (28%)	1,491 grs/cm ³
Arena 0/1 (46%)	
Arena 0/2 (26%)	

- Mezcla 12^a:

Arena 0/5 (32%)	1,504 grs/cm ³
Arena 0/1 (36%)	
Arena 0/2 (32%)	

ESQUELETO GRANULAR DE MÁXIMA COMPACIDAD (arenas)



Apartando los esqueletos granulares de máxima compacidad entre árido y arena, así como la proporción de arenas más densa, obtenemos la siguiente tabla:

- Mezcla 13^a:

Árido 5/10 (45%)	1,672 grs/cm ³
Arena 0/5 (16,5%)	
Arena 0/1 (22%)	
Arena 0/2 (16,5%)	

Este último esqueleto granular es el que presenta mayor densidad aparente. Por tanto, representa una aproximación a la dosificación de los áridos en el HAC con estos áridos. No obstante, nuestro equipo de trabajo considera que es necesario un mayor ajuste de esta granulometría en el futuro con el fin de incrementar la colmatación de huecos en nuestro hormigón. De esta manera conseguiremos un hormigón más resistente y sobre todo más durable. Por esta razón proponemos como investigación la selección de un más adecuado esqueleto granular en relación a su capacidad mecánica e impermeabilidad.

Con esta información previa acerca de la pasta y de la mezcla de áridos en seco, hemos realizado las dosificaciones de hormigón. En los ensayos en los que aparece definida la mezcla como autocompactante (R091 - R130) hemos comprobado sus tres requisitos imprescindibles a través de los métodos de ensayos descritos en el anexo al capítulo cuarto. A medida que hemos ido ajustando esta autocompacidad, especialmente la cualidad de no segregar, hemos anotado las siguientes valoraciones:

- 1º. Al realizar algunos ensayos con árido 10/20 (fonolita de machaqueo) los resultados no muestran suficiente capacidad de fluir, además hay una tendencia alta al bloqueo en la armadura o al choque entre los granos. Esta razón nos hizo desestimarlos, no obstante, en el futuro se podría considerar la opción de incluirlos en la mezcla pero no en un porcentaje mayor del 15% del total de áridos.
- 2º. Los ensayos de HAC realizados con árido basáltico, de extracción natural de barranco, mostraron un resultado desigual. A veces indicó un hormigón autocompactante, pero otras veces reflejó falta clara de fluidez ante la misma dosificación. La razón suponemos que es su alto contenido de arcillas. Atendiendo al futuro, éste podría ser un buen árido para HAC en Canarias, si previamente llevara un proceso de lavado. Sin embargo, el delicado paisaje de nuestras Islas no soportará una extracción minera en los barrancos, por tanto, esta posibilidad debería descartarse.

La clave para conseguir autocompacidad con estos constituyentes comunes y de uso estándar en Canarias la hemos encontrado en los siguientes tres puntos:

- 3º. La adición de superfluidificante (Premia-180) debe ser aproximada al 1,35% del peso del cemento. Por debajo de esta cantidad pierde fluidez de manera directamente proporcional. Por encima de este valor (> 1,40%) tiende a provocar segregación.

4°. El árido grueso (fonolita de machaqueo) debe bajar hasta una relación del 40% con respecto al total del árido. En este porcentaje debe estar incluida la posibilidad de añadir una pequeña porción de árido de tamaño mayor a 10 milímetros.

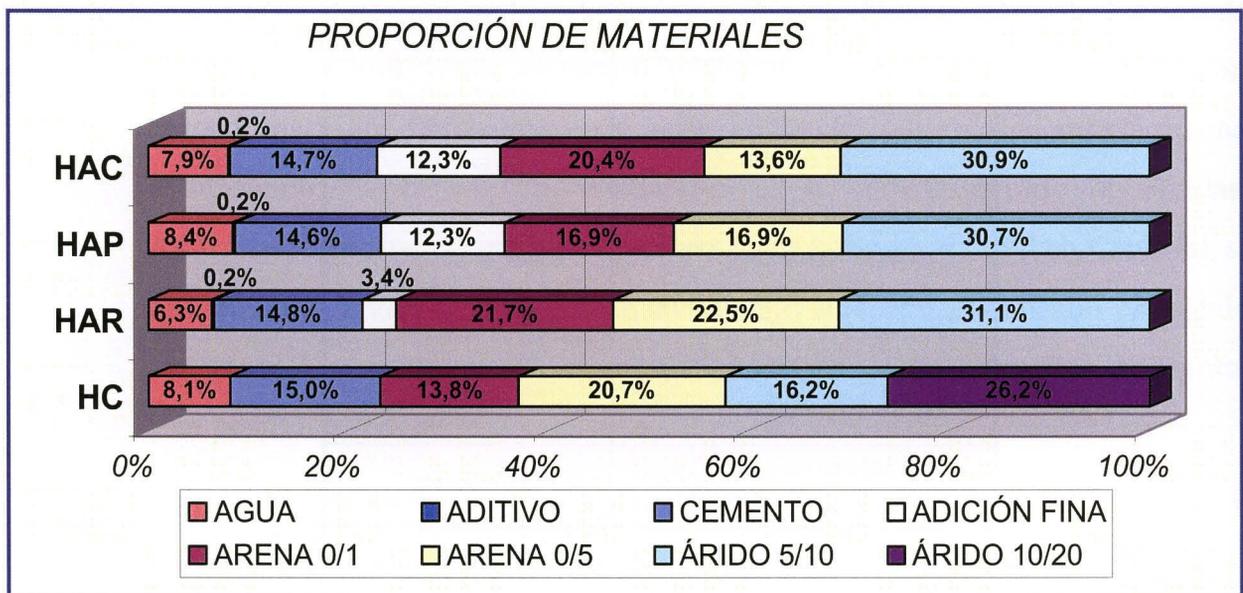
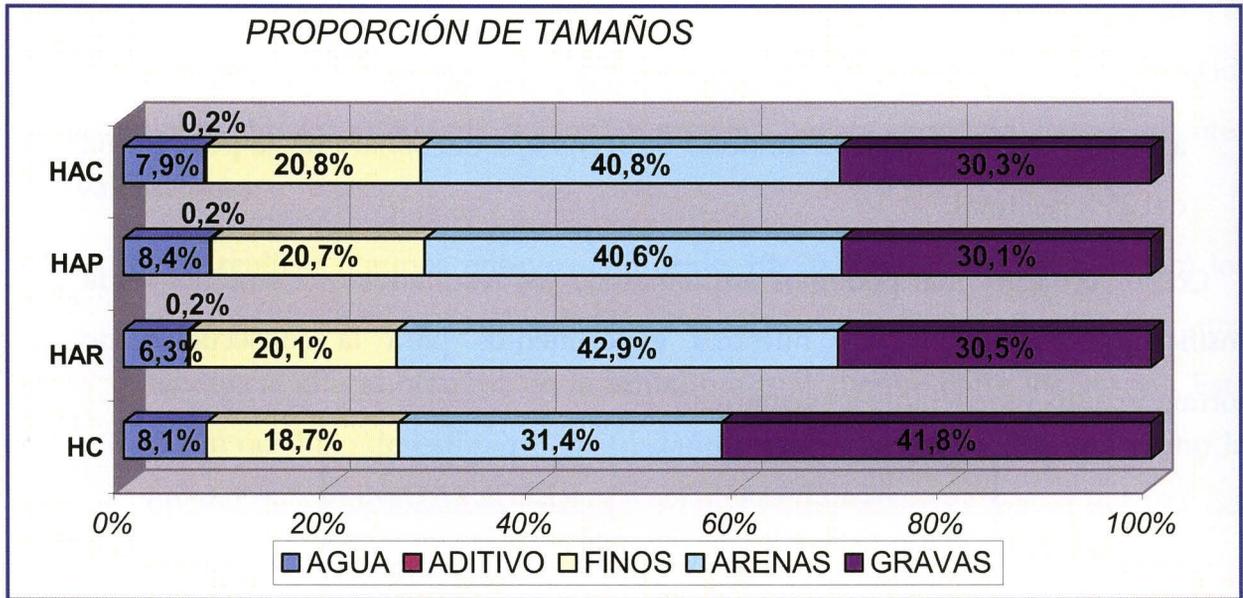
5°. La arena fonolita debe representar un porcentaje menor del 18% del total del árido a cambio de subir la cantidad de arena 0/1 del Sahara hasta por encima del 25% del total.

Como corolario final podemos esquematizar los resultados que tenemos en la dosificación concluyente de nuestros experimentos para la consecución de hormigón autocompactante en Canarias:

<u>MATERIAL</u>	<u>RESULTADOS</u>
Cemento	340 Kgs/m ³
Filler	150 Kgs/m ³
Arena	940 Kgs/m ³
Árido	700 Kgs/m ³
Superfluidificante	5,5 Kgs/m ³
Relación A/C	0,54
Relación A/finos	0,38
Resistencia a compresión (28 días)	60 MPa

Cuando analizamos la proporción de los tamaños en función del tipo de hormigón comprobamos que para conseguir evolucionar en los hormigones actuales canarios hemos disminuido el porcentaje de gravas y aumentado los finos y las arenas. Si apreciamos los materiales constituyentes uno a uno hemos

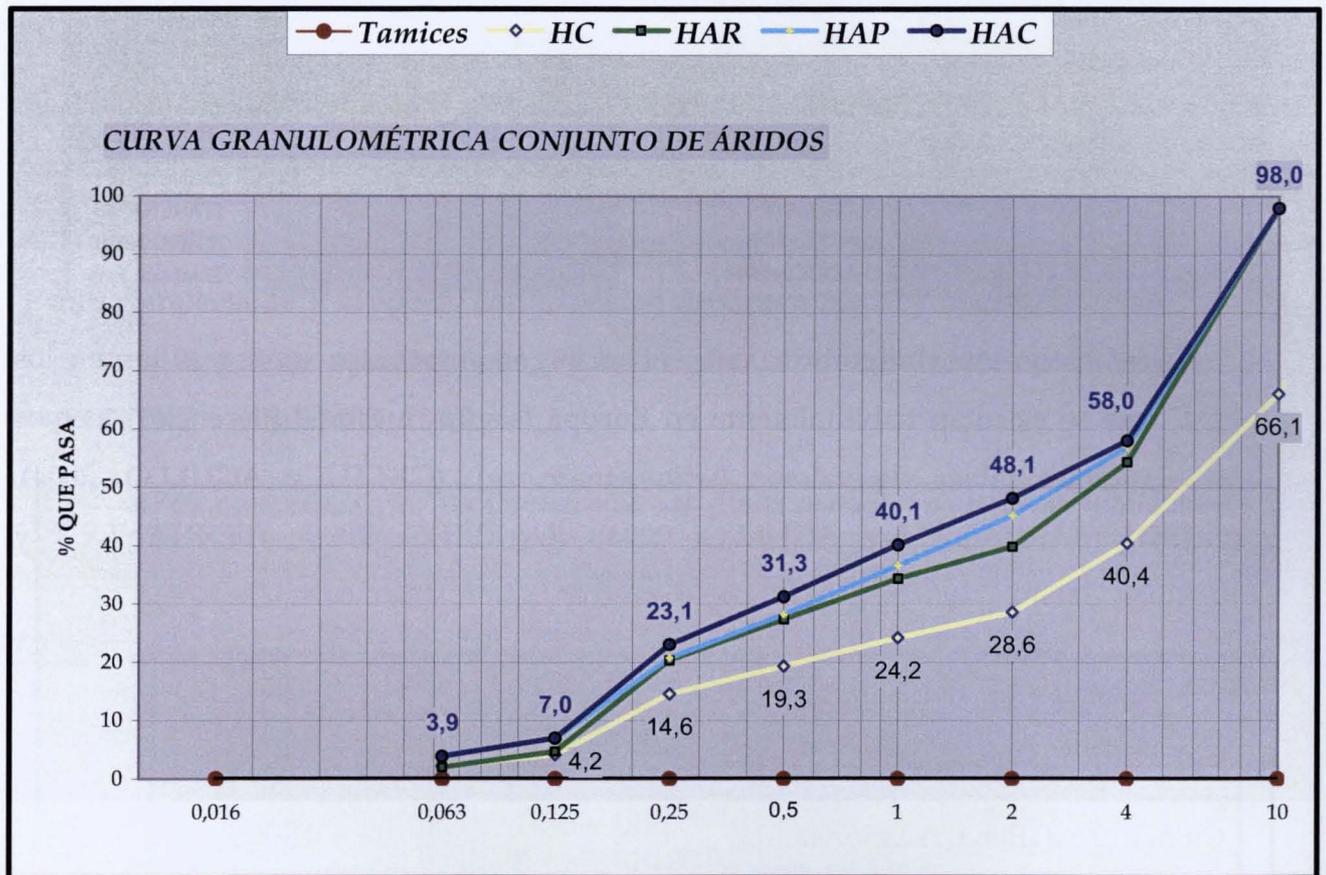
eliminado la grava 10/20 y compensado en la grava 5/10, hemos adicionado una nueva arena con un alto contenido en finos que nos regulariza la granulometría de las arenas e incorporado el superfluidificante.

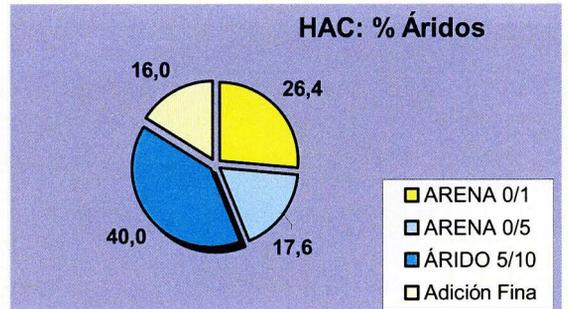
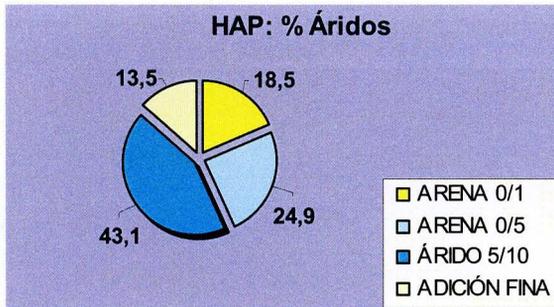
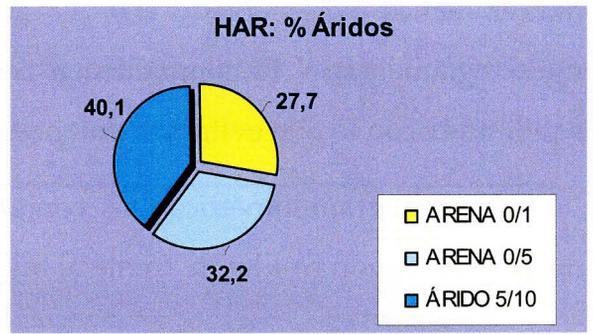
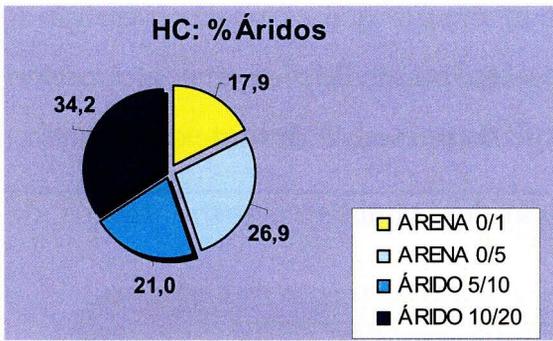


Podemos constatar que hemos controlado la relación agua/cemento. Gracias a la ayuda del superfluidificante ya no estamos en el límite de lo reglamentado sino que hemos conseguido bajar hasta el valor 0,4 para los HAR. Cuando nos interesaba

fluidez hemos incrementado algo el agua pero al final la hemos vuelto a dirigir al rigor reglamentario. El contenido en cemento se ha mantenido en una proporción equilibrada con lo que evitamos potenciar el riesgo de retracción durante el fraguado.

La curva granulométrica del conjunto de áridos también muestra rasgos de nuestro hormigón resultante frente al inicial:



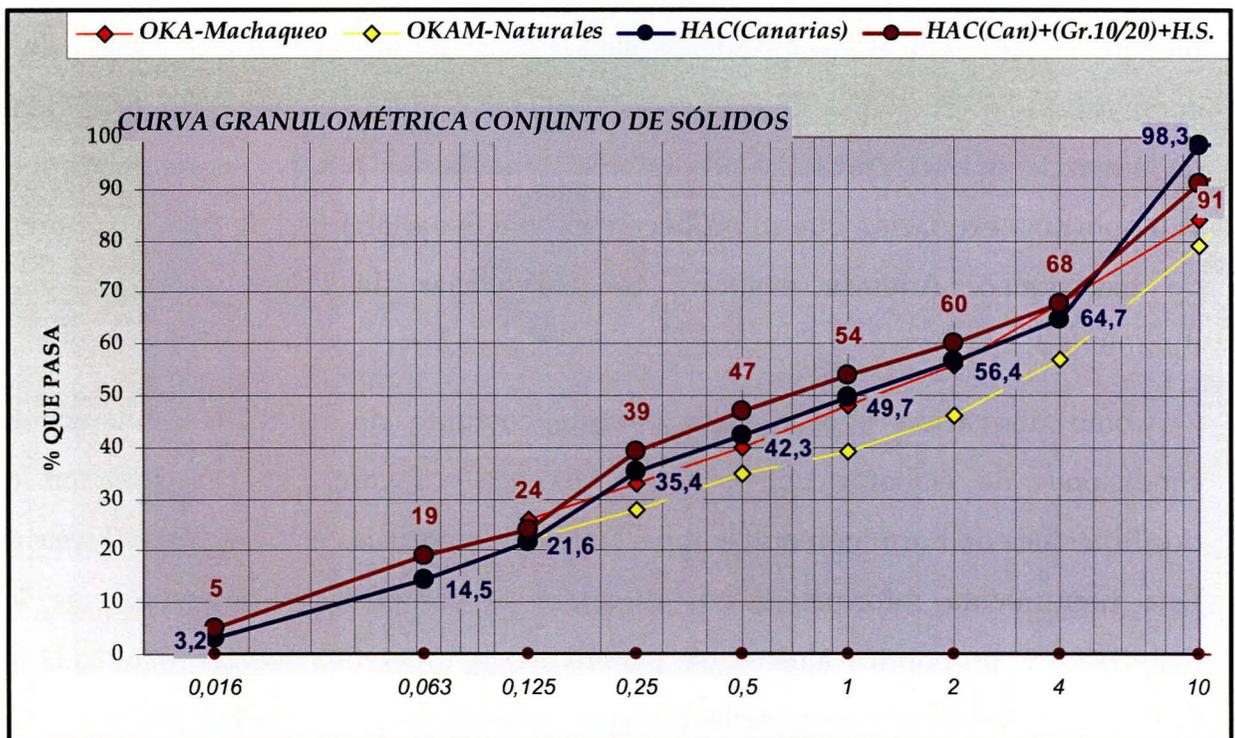


Al establecer una comparativa entre el hormigón autocompactante resultante y los HAC que se ejecutan habitualmente en Europa (según nuestras referencias) leemos las siguientes tablas de valores (www.efnarc.org), (GETTU y AGULLÓ, 2004), (GETTU, BARRAGÁN y AGULLÓ, 2004), (GARRIDO, 2004), (FERNÁNDEZ y BURÓN, 2005):

MATERIAL (Kgs/m³)	HAC - Referencias	HAC - Canarias
Cemento	220 - 450 (GETTU y AGULLÓ)	340
Cemento + Filler + Adiciones	380 - 600 (FERNÁNDEZ y BURÓN)	480
Arena	680 - 930 (GETTU y AGULLÓ)	940
Árido	650 - 900 (FERNÁNDEZ y BURÓN)	700
Agua (litros/m³)	150 - 210 (FERNÁNDEZ y BURÓN)	180
Superfluidificante	4 - 10 (GETTU y AGULLÓ)	5,5

<u>OTROS VALORES</u>	<u>HAC - Referencias</u>	<u>HAC - Canarias</u>	
Relación agua/cemento (Kgs/m ³)	0,33 - 0,80 (GETTU y AGULLÓ)	0,54	
Relación agua/finos (Volumen)	0,8 - 1,10 (EFNARC - EFCA)	1,10	
Relación agua/finos (Peso)	0,27 - 0,50 (EFNARC - EFCA)	0,38	
PASTA (Kgs/m ³) (cemento+filler+adición+agua)	530 - 810 (FERNÁNDEZ y BURÓN)	940	
Contenido de finos en volumen (litros)	160 - 240 (EFNARC - EFCA)	170	
Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	<u>HAC</u> 40 - 50 (GETTU...)	<u>HACAR</u> 55 - 80 (GETTU...)	60

Por último, se presenta la curva granulométrica de constituyentes sólidos del autocompactante y la opción con inclusión de Grava 10/20 y microsílíce (véase R130) junto a la teórica aportada por Okamura para áridos naturales y de machaqueo (PUNTKE y MILDNER, 2003).

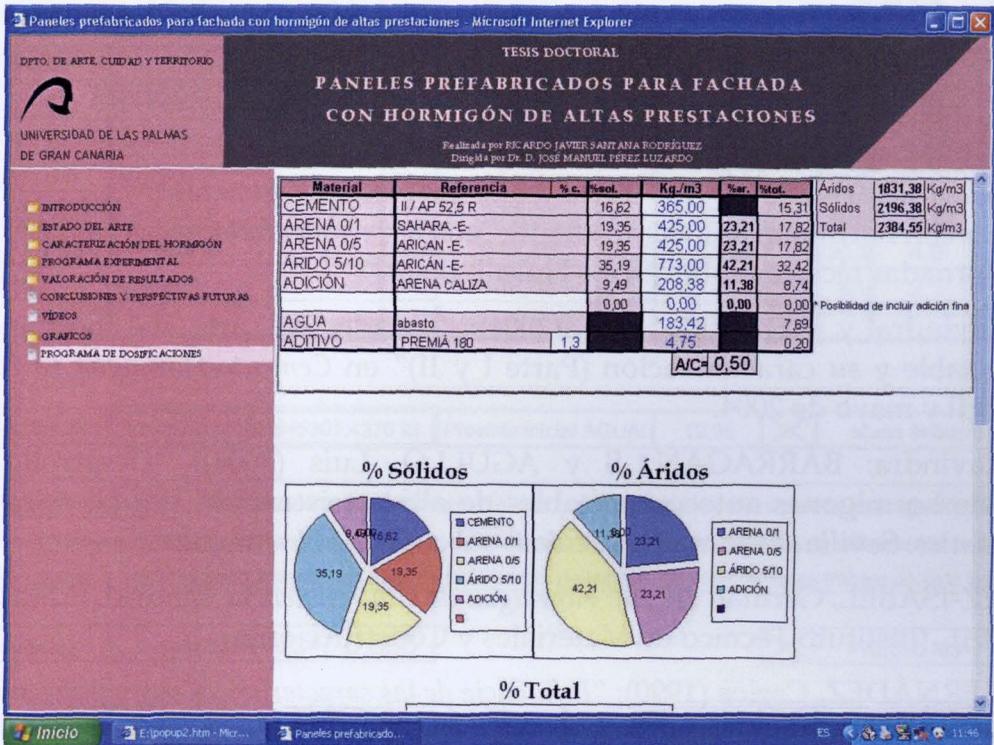


En la gráfica del autocompacto de Canarias (*gráfica color azul*) se observa una fuerte inclinación en el árido grueso de 4/10 mm, resultado del alto contenido en granos de estos tamaños. El aumento en la proporción de éstos es como resultado de la elección de un tamaño máximo de árido de 10 milímetros. Además, compensa la menor cantidad del grupo de arenas 1/4 mm que corresponde al grano fonolítico machaado. Por otra parte, se comprueba también un mayor porcentaje de las arenas de menor tamaño (entre 0,063 y 0,25 mm) como solución factible al disminuir el tamaño 0/5 de machaqueo debido a la irregularidad en el contenido en finos de ésta última.

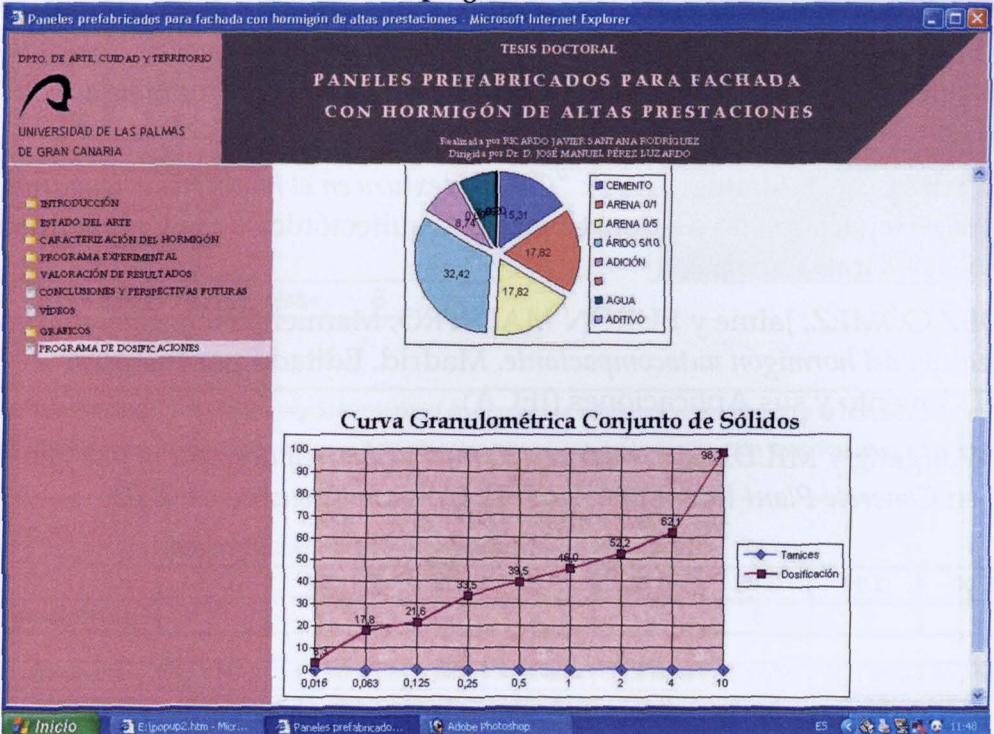
En la propuesta del autocompactante canario con grava 10/20 y humo de sílice (*gráfica color marrón*) la inclusión de un pequeño porcentaje de este árido grueso no produce bloqueo en la mezcla, debido a la despreciable probabilidad de choque entre piedras de este tamaño. Este contenido en áridos gruesos de tamaño 10/20 no debería superar el 10% del total de los constituyentes sólidos para garantizar la resistencia al bloqueo. Por el otro extremo, una adición fina como la microsílíce en cantidades menores al 2,5% del peso de cemento mejora la granulometría en este ámbito de la curva señalada. Por encima de este valor no se puede garantizar una fluidez suficiente de la mezcla. Manteniendo este precepto, la consecuencia positiva será un control de la inoportuna exudación que se produce debido a la variabilidad de finos en la arena de machaqueo. Además mejorará las resistencias, la impermeabilidad y la durabilidad.

Como derivación y a la vista de este conjunto de resultados, estamos en condiciones de elaborar una programación de software para la ejecución de dosificaciones de hormigón autocompactante con materiales constituyentes canarios. Esta herramienta informática nos calculará la composición porcentual de los materiales y propondrá ajustes de mejora en la hipotética mezcla planteada en función de la granulometría inicial. Estas propuestas se formulan en base a las

resoluciones de esta tesis experimental, que se exponen a modo de conclusiones en el próximo capítulo.



Detalle de programa 1: Introducción de datos



Detalle de programa 2: Resultado de proporciones y gráfica

BIBLIOGRAFÍA PARTICULAR DEL CAPÍTULO 5

• VALORACIÓN DE RESULTADOS

ALAEJOS GUTIERREZ, María del Pilar y FERNÁNDEZ CÁNOVAS, Manuel (2000): *Hormigón de alta resistencia: Dosificación y propiedades mecánicas*. Ministerio de Fomento - Centro de estudios y experimentación de obras públicas CEDEX. Madrid.

GARRIDO ROMERO, Luis (2004): "Tecnología, propiedades generales y realizaciones con hormigón autocompactante" en *Hormigones autocompactantes*. Sevilla. XI Jornadas técnicas sobre Otros Hormigones.

GETTU, Ravindra y AGULLÓ, Luis (2004): "Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización (Parte I y II)" en *Cemento-Hormigón* nº 861. Madrid. Abril y mayo de 2004.

GETTU, Ravindra; BARRAGÁN, B y AGULLÓ, Luis (2004): "Desarrollo y aplicación de hormigones autocompactables de altas resistencias" en *Hormigones autocompactantes*. Sevilla. XI Jornadas técnicas sobre Otros Hormigones.

GONZÁLEZ-ISABEL, Germán (1993): *Hormigón de alta resistencia*. Madrid. Editado por INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones).

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (1990): "Influencia de las características petrográficas de los áridos canarios en las propiedades de los hormigones" (Tesis Doctoral). Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Las Palmas.

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (1993): *Dosificación de hormigones con aditivos superfluidificantes*. Colección Temas de Construcción num. 6. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

PÉREZ LUZARDO, José Manuel (1991): "Color y textura en el hormigón estructural" (Tesis Doctoral). Departamento de Construcción Arquitectónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

FERNÁNDEZ GÓMEZ, Jaime y BURÓN MAESTRO, Manuel (2005): *Guía práctica para la utilización del hormigón autocompactante*. Madrid. Editado por Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

PUNTKE, Wolfgang y MILDNER, Markus (2003): "Water requirement of fine grain aggregates" en *Concrete Plant International (CPI)*. Colonia. Octubre de 2003.

PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCION HORMIGÓN CONVENCIONAL BASE DOSIFICACIONES

REFERENCIA: **R.001-021203-HC**

FECHA DE AMASADA: 2-dic-03

Suma áridos: 1804 Kg/m3

Suma sólidos: 2157 Kg/m3

Suma total: 2346 Kg/m3

material	referencia	%sol.	Kg./m3	%ar.	Kg./ 63 lts.	%tot.	€/ Tn	€/m3HAC
CEMENTO	I / 42,5 R (LARSEN)	16,3	352,38	<input checked="" type="checkbox"/>	22,20	15,0	70,0	24,67
ARENA 0/1	SAHARA -E-	15,0	322,70	17,9	20,33	13,8	11,4	3,68
ARENA 0/5	ARICAN -E-	22,5	484,92	26,9	30,55	20,7	6,6	3,19
ÁRIDO 5/10	ARICÁN -E-	17,6	379,37	21,0	23,90	16,2	4,9	1,85
ÁRIDO 10/20	ARICÁN -E-	28,6	617,46	34,2	38,90	26,3	4,0	2,47
AGUA	abasto	<input checked="" type="checkbox"/>	189,05	<input checked="" type="checkbox"/>	11,91	8,1	2,1	0,40

Comprobación: **Volumen probeta=5301,4376 lts** Previsto inicial AGUA: **12,05** suma áridos/63lts= **113,68**

Observación previa: Se realiza una dosificación inicial que nos sustente el comienzo de la investigación. Ésta será la dosificación base sobre la que tomaremos los cambios pertinentes. Cada amasada posterior la utilizaremos para avanzar en nuestro objetivo o volver al paso anterior. Se trata de una mezcla de las que habitualmente se trabaja en este laboratorio.

Resultados: **relación A/C= 0,536** **PRECIO M3= 36,26 EUR**

Ajustes: Volumen= **62,257 lts.** Cem./m3= **357 Kgs.** suma total= **2374 Kg/m3**

material	Kg./m3
CEMENTO	357
ARENA 0/1	327
ARENA 0/5	491
ÁRIDO 5/10	384
ÁRIDO 10/20	625
AGUA	191

Probetas= **11** 11,743
Resto= **22,3** 30 cms



Foto:
(cono abrams)

picar (sin adit.) CONO ABRAMS= **6** cm.

OBSERVACIONES: Se ha corregido la cantidad de agua en la dosificación atendiendo a la humedad de los áridos 5/10 y 10/20. Al realizar los ajustes en el volumen final obtenido se comprueba la dosificación final. Resultan 11 probetas cilíndricas.

RESISTENCIA: PROBETAS (PICADAS Y VIBRADAS)

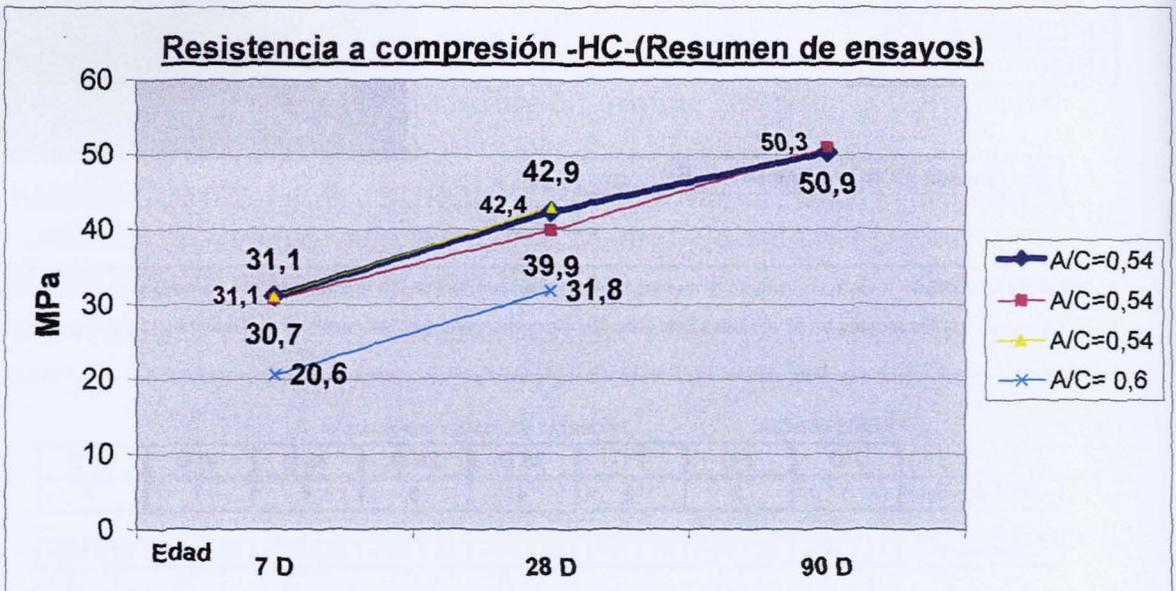
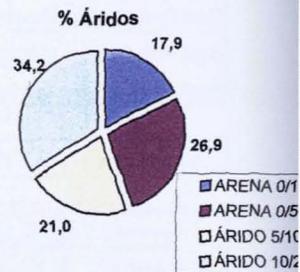
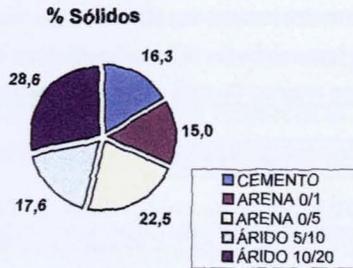
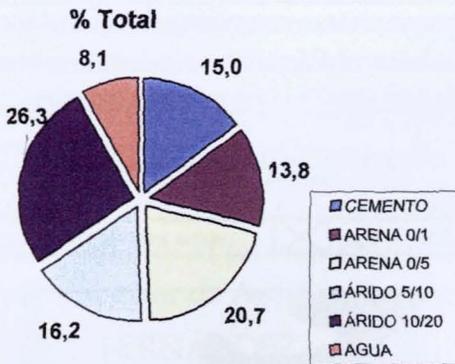
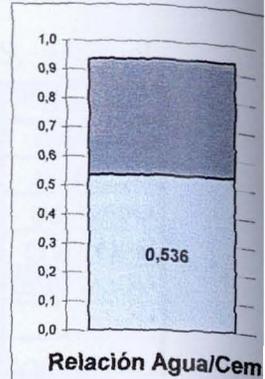
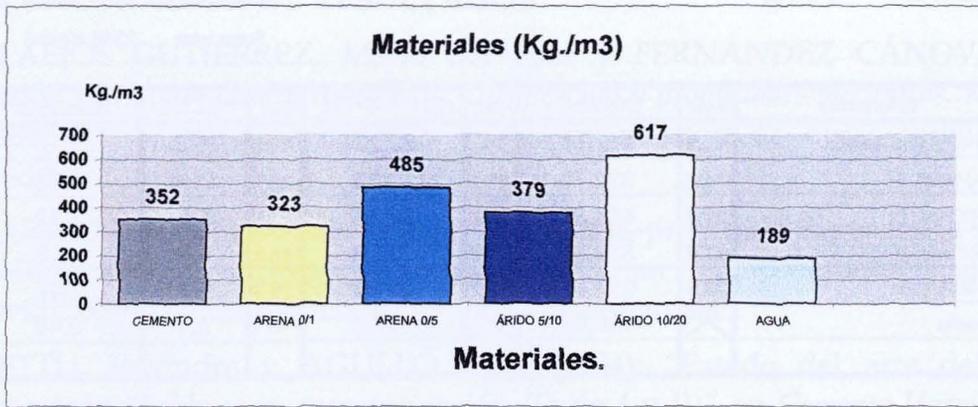
nºreferencia:	7 D	7 D	7 D	28 D	28 D	28 D	90 D	90 D	
	1	2	3	4	5	6	7	8	11
resistencia:	31,1 MPa	30,7 MPa	31,1 MPa	42,4 MPa	39,9 MPa	42,9 MPa	50,3 MPa	50,9 MPa	
	<input checked="" type="checkbox"/>								

¡INICIO!

PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCION
HORMIGÓN CONVENCIONAL BASE
 GRÁFICOS

REFERENCIA: **R.001-021203-HC**



PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCION

HORMIGÓN DE ALTAS RESISTENCIAS

DOSIFICACIONES

REFERENCIA: **R.006-181203-HAR**

FECHA DE AMASADA: 18-dic-03

Suma áridos: 1867 Kg/m3

Suma sólidos: 2217 Kg/m3

Suma total: 2370 Kg/m3

material	referencia	%c.	%sol.	Kg./m3	%ar.	Kg./ 60 lts.	%tot.	€ / Tn	€/m3HAC
CEMENTO	I / AP 42,5 R (IZMIR)		16,2	350,00	<input checked="" type="checkbox"/>	21,00	14,9	70,0	24,50
ARENA 0/1	SAHARA -E-		23,8	514,00	27,5	30,84	21,9	11,4	5,86
ARENA 0/5	ARICAN -E-		24,8	534,00	28,6	32,04	22,8	6,6	3,51
ÁRIDO 5/10	ARICÁN -E-		34,3	739,00	39,6	44,34	31,5	4,9	3,60
ADICIÓN FINA	MARMOLINA		3,7	80	4,28	4,80	3,4	300	24
AGUA	abasto		<input checked="" type="checkbox"/>	148,33	<input checked="" type="checkbox"/>	8,90	6,3	2,1	0,32
ADITIVO	PREMIÁ-180	1,4	<input checked="" type="checkbox"/>	4,90	<input checked="" type="checkbox"/>	0,294	0,2	2000	9,80

Comprobación: Previsto inicial: suma áridos/60lts= 112,02

Observación previa: Se aumenta la proporción de aditivo superfluidificante (1,4% del cemento). Añadimos una adición fina. Proponemos aumentar la fluidez con más aditivo y comprobar la homogeneidad con una adición fina factible de conseguir. La adición es un polvo de mármol que emplea otra empresa en Canarias para fabricar pavimentos.

Resultados: PRECIO M3= 71,59 EUR

Ajustes: Volumen= 59,991 lts. Cem./m3= 350 Kgs. suma total= 2366 Kg/m3

material	Kg./m3
CEMENTO	350
ARENA 0/1	514
ARENA 0/5	534
ÁRIDO 5/10	739
ADICIÓN FINA	80
AGUA	148
ADITIVO	4,90

Probetas= 4
Resto= — 30 cms



Foto:
proceso de compactado
de probetas

picar (sin adit.) CONO ABRAMS= 0 cm.

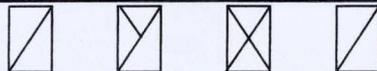
picar (con adit.) CONO ABRAMS= 0,5 cm.

OBSERVACIONES: Continuamos sin conseguir suficiente fluidez, es probable que sea muy poca agua en contraste a la cantidad de arenas y finos (dada la singularidad canaria de arenas). La resistencia mecánica es buena y continuamos obteniendo un HAR.

RESISTENCIA: PROBETAS (SIN PICAR)

nºreferencia:	28 D	28 D	28 D	28 D
	39	40	41	42

resistencia: **54,2 MPa 56,6 MPa 56,7 MPa 56,4 Mpa**



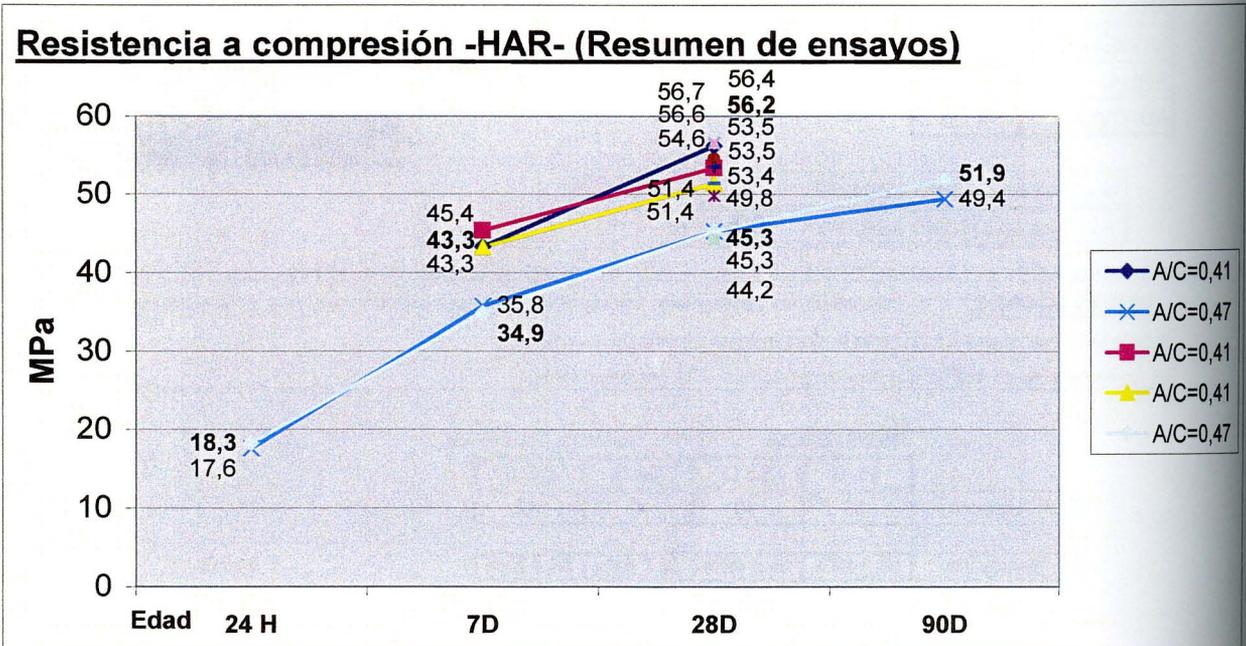
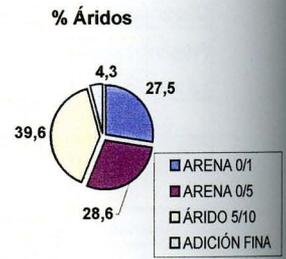
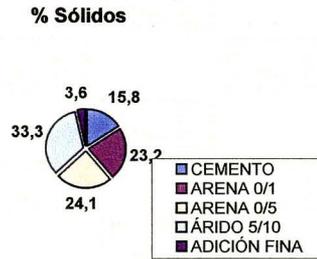
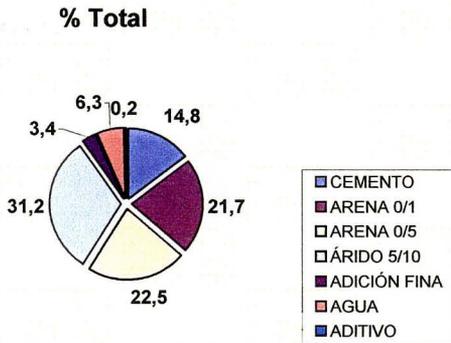
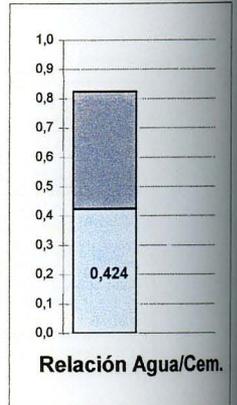
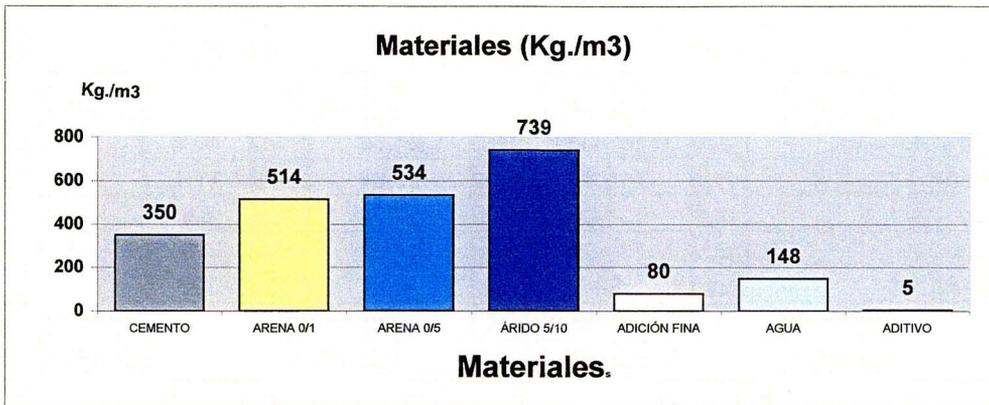
¡AVANCE!

PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCION
HORMIGÓN DE ALTAS RESISTENCIAS

GRÁFICOS

REFERENCIA: **R.006-181203-HAR**



PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCION

HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES

DOSIFICACIONES

REFERENCIA: **R.031-200404-HAP**

tª agua: 17°C

tª sala: 20°C

FECHA DE AMASADA: 20-abr-04

Suma áridos: 1932 Kg/m3

Suma sólidos: 2299 Kg/m3

FECHA DE RECEPCION DE CEMENTO: 8-feb-04

Suma total: 2514 Kg/m3

material	referencia	%c.	%sol.	Kg./m3	%ar.	Kg./ 40 lts.	%tot.	€ / Tn	€/m3HAC
CEMENTO	II / AP 42,5 R		17,0	367,00	<input checked="" type="checkbox"/>	14,680	15,6	70,0	25,69
ARENA 0/1	SAHARA -E-		19,7	425,00	22,0	17,000	18,1	11,4	4,85
ARENA 0/5	ARICAN -E-		19,7	425,00	22,0	17,000	18,1	6,6	2,80
ÁRIDO 5/10	ARICÁN -E-		35,8	773,00	40	30,920	33,0	4,9	3,76
ADICIÓN FINA	FILLER CALIZO		14,3	309,00	16	12,360	13,2	100	30,90
AGUA	abasto		<input checked="" type="checkbox"/>	210,00	<input checked="" type="checkbox"/>	8,400	9,0	2,1	0,45
ADITIVO	PREMIÁ - 180	1,3	<input checked="" type="checkbox"/>	4,78	<input checked="" type="checkbox"/>	0,191	0,2	2000	9,55

Comprobación: Volumen probeta=5301,4376 lts Previsto inicial: OK suma áridos/43lts= 77,28

Observación previa: Continuamos nuestro avance con el aditivo PREMIÁ-180. Recuperamos el hilo de ensayos de las referencias R016 - R019. Hacemos ajustes con el agua.

Resultados: relación A/C= 0,572 PRECIO M3= 78,00 EUR

Ajustes: Volumen= 43,118 lts. Cem./m3= 340 Kgs. suma total= 2328 Kg/m3

material	Kg./m3
CEMENTO	340
ARENA 0/1	394
ARENA 0/5	394
ÁRIDO 5/10	717
ADICIÓN FINA	287
AGUA	195
ADITIVO	4,43

*PROBETAS + LOSAS BICOLOR

Probetas*	8	8,133
Resto=	4	30 cms

Foto:
Lenado de maquetas



picar (sin adit.) CONO ABRAMS= 0,1 cm.

picar (con adit.) CONO ABRAMS= >25 cm.

TORTA= 62 / 71 cms. (t50= 2,5sgs)

ANILLO J= 57 / 60 cms. (t50= 8,5sgs)

OBSERVACIONES: Con este hormigón se fabricaron dos losas bicolor (rojo - gris) y (amarillo - gris) como muestra de paneles de fachada.

RESISTENCIA:

PROBETAS (SIN PICAR)

nºref.	24 H	28 D	24 H	28 D
	260	261	262	263

resist. **11,3 Mpa 44,7 Mpa 11,0 Mpa 44,5 Mpa**



¡AVANCE!

PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCION

HORMIGÓN CONVENCIONAL PIGMENTADO

DOSIFICACIONES

REFERENCIA: **R.081-060704-HCP**

tª agua: 21°C

tª sala: 20°C

FECHA DE AMASADA: 6-jul-04

Suma áridos: 1767 Kg/m³

FECHA DE RECEPCION DE CEMENTO: 30-abr-04

Suma sólidos: 2093 Kg/m³

Suma total: 2318 Kg/m³

material	referencia	%c.	%sol.	Kg./m ³	%ar.	Kg./ 7,0 lts.	%tot.	€ / Tn	€/m ³ HAC
CEMENTO	II AP / 42,5 R (GRANADILLA)		15,1	325,43	<input checked="" type="checkbox"/>	2,278	13,9	70,0	22,78
ARENA 0/1	SAHARA -E-		18,0	388,57	22,0	2,720	16,6	13,0	5,05
ARENA 0/5	ARICAN -E-		27,0	582,86	33,0	4,080	24,8	7,0	4,08
ÁRIDO 5/10	ARICÁN -E-		36,9	795,71	45	5,570	33,9	5,0	3,98
AGUA	abasto		<input checked="" type="checkbox"/>	215,71	<input checked="" type="checkbox"/>	1,510	9,2	2,0	0,43
PIGMENTO	CONESLAND ROJO	3	<input checked="" type="checkbox"/>	9,71	<input checked="" type="checkbox"/>	0,068	0,4	4000	38,86

Nota: Amasado a mano.

Previsto inicial: OK suma áridos/12,5lts= 12,37

Observación previa:

Resultados: relación A/C= 0,663

PRECIO M3= 75,18 EUR

picar (sin adit.) CONO ABRAMS= 7 cm.

RESISTENCIA (28 DIAS): 33,2 Mpa

PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCION HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE DOSIFICACIONES

REFERENCIA: **R.129-220205-HAC**

tª agua: 18°C

tª sala: 18°C

FECHA DE AMASADA: 22-feb-05

Suma áridos: 1777 Kg/m3

FECHA DE RECEPCION DE CEMENTO: 24-ene-05

Suma sólidos: 2115 Kg/m3

Suma total: 2302 Kg/m3

material	referencia	% c.	%sol.	Kg./m3	%ar.	Kg./ 79 lts.	%tot.	€ / Tn	€/m3HAC
CEMENTO	II / AP 52,5 R		14,4	337,59	<input checked="" type="checkbox"/>	26,670	####	70	23,63
ARENA 0/1	SAHARA -E-		20,0	469,11	26,4	37,060	####	13	6,10
ARENA 0/5	ARICAN -E-		13,3	312,78	17,6	24,710	####	7	2,19
ÁRIDO 5/10	ARICÁN -E-		30,3	711,01	40	56,170	####	5	3,56
Adición Fina	Filler Calizo		12,1	284,18	16	22,450	####	100	28,42
AGUA	abasto		<input checked="" type="checkbox"/>	183,42	<input checked="" type="checkbox"/>	14,490	####	2	0,37
ADITIVO	PREMIÁ 180	1,3	<input checked="" type="checkbox"/>	4,39	<input checked="" type="checkbox"/>	0,347	####	1500	6,58

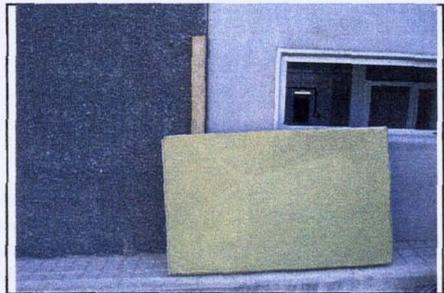
A/C= 0,543

PRECIO M3= 70,84 EUR.

picar (sin adit.) CONO ABRAMS= 0,3 cm.

Observación previa: **HORMIGÓN AUTOCOMPACTO**

Fotos:



1º-CAPACIDAD DE RELLENO:

sin picar Flujo asentamiento= 67 cm. t-50= 2,4 sg.

Embudo V= 8 sg.

Bloqueo: NO

Segregación: NO

2º-CAPACIDAD DE PASO:

Caja L(H2/H1)= 0,87 t-20= 1,07 sg.

t-40= 2,43 sg. Bloqueo: NO



3º-SEGREGACIÓN:

Embudo V(5mts)= 11 sg.

Bloqueo: NO

Segregación: NO

EXHUDACIÓN: NO

Secuencia:

OBSERVACIONES: Tras 18 meses de ensayos en laboratorio y más de 150 mezclas distintas de constituyentes canarios, hemos pasado por los hormigones convencionales - HC -, hormigones de altas resistencias - HAR -, hormigones pigmentados - HCP -, hormigones de altas prestaciones pigmentados - HAPP - para llegar a los hormigones autocompactantes - HAC -.

RESISTENCIA: PROBETAS (SIN PICAR)

nºref.	24h	24h	24h
	569	571	573

resist.	19,69 Mpa	21,31 Mpa	21,27 Mpa
---------	-----------	-----------	-----------

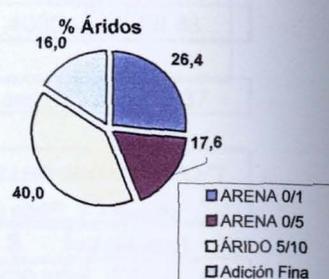
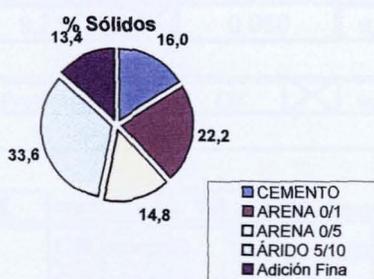
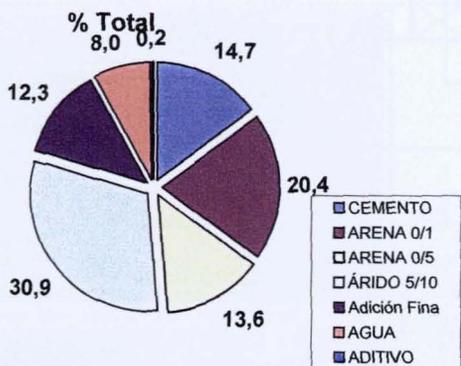
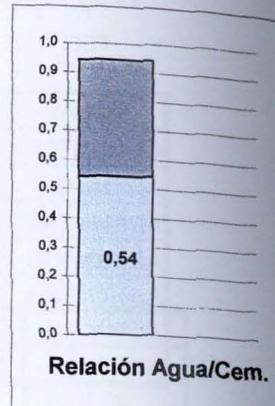
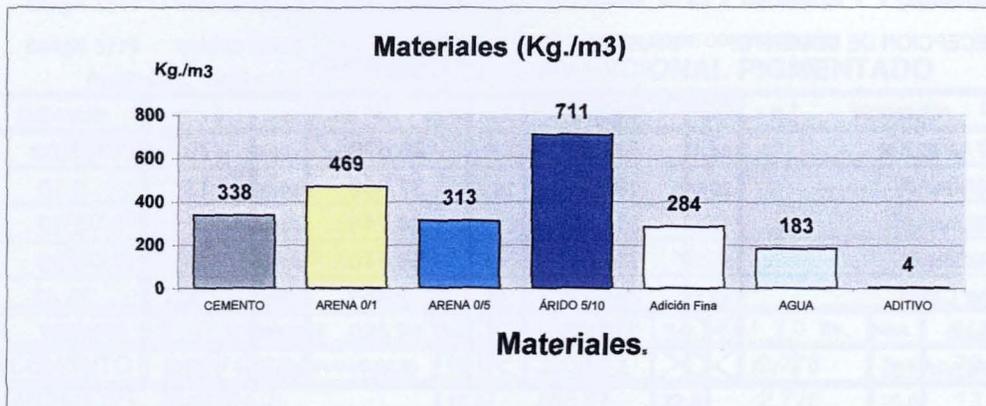


PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

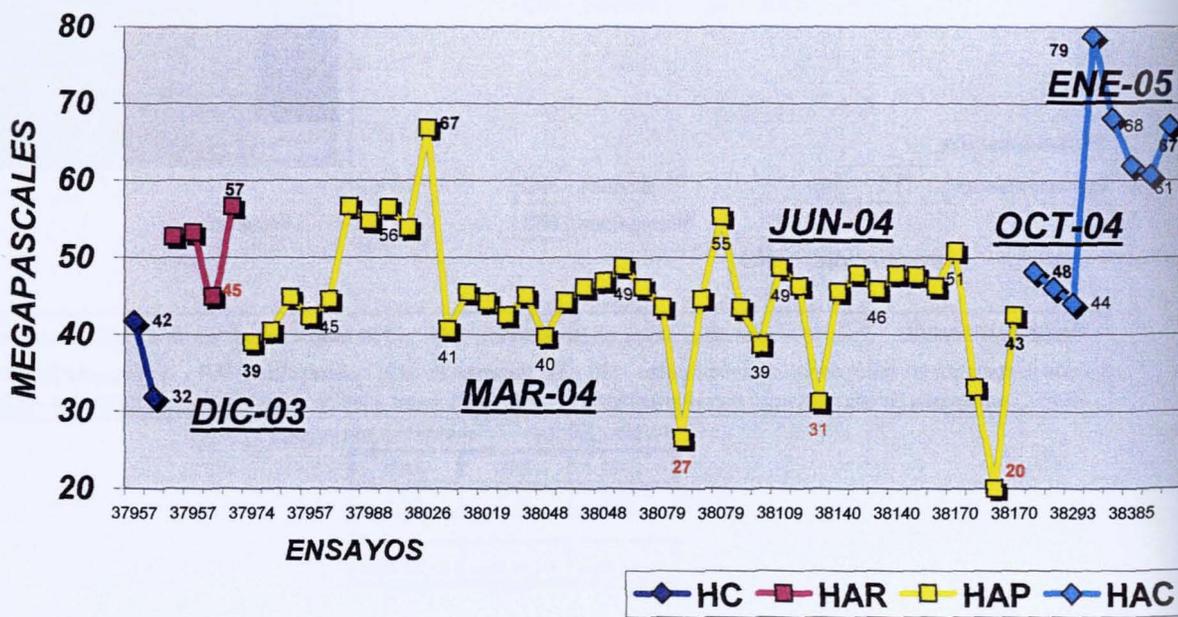
LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCION
HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

GRÁFICOS

REFERENCIA: R.129-220205-HAC



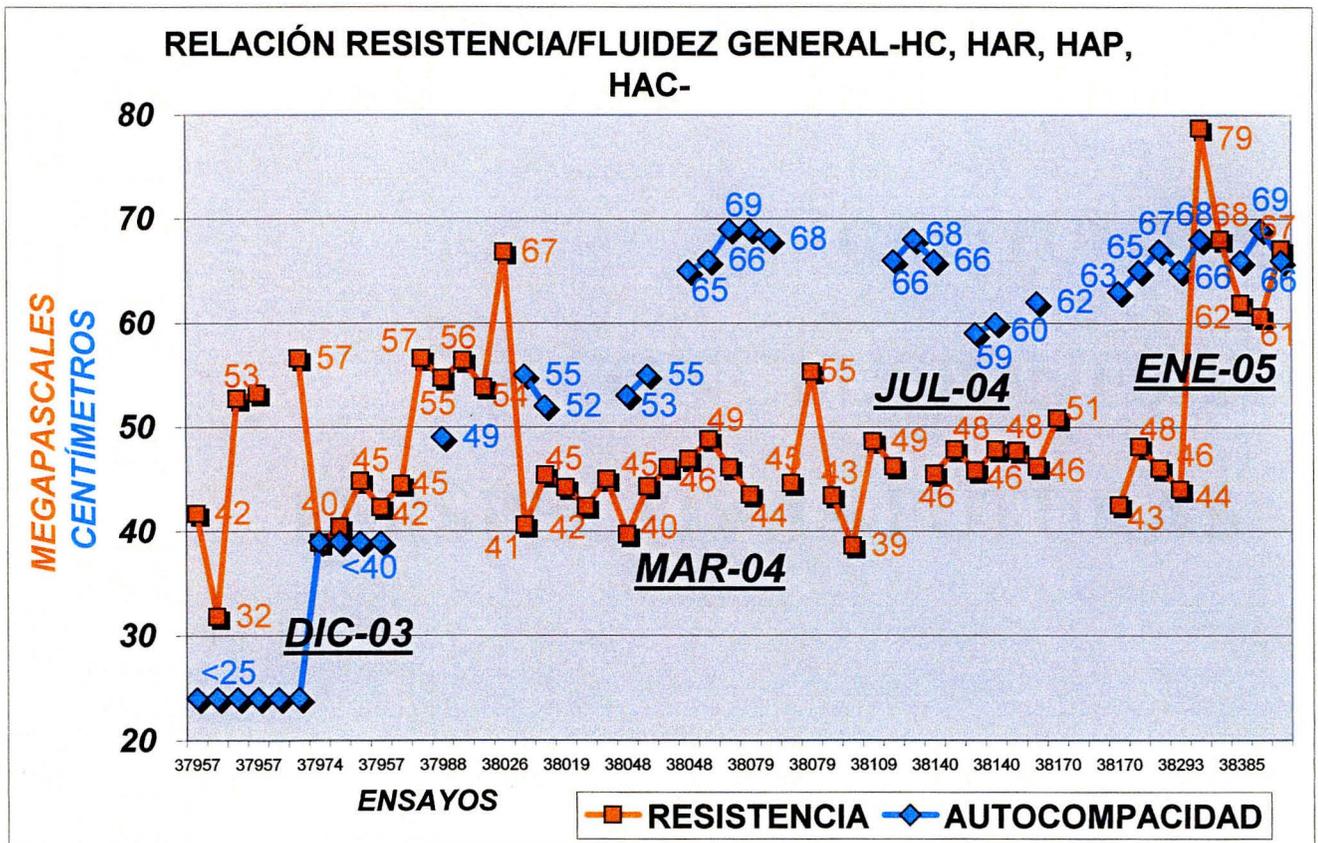
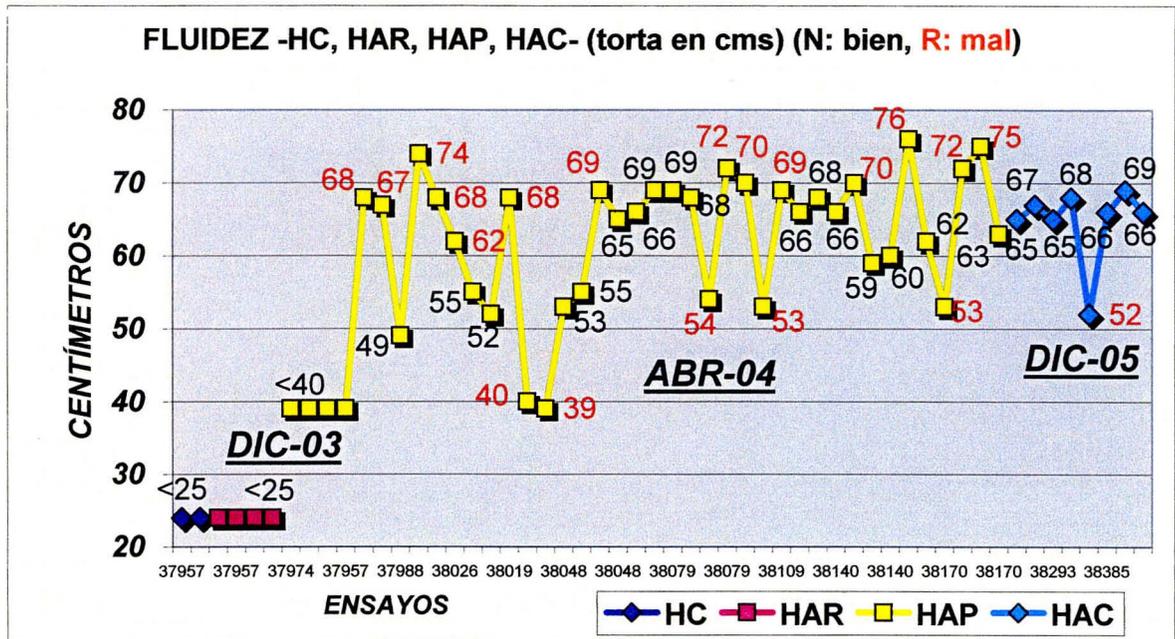
RESISTENCIA A COMPRESIÓN -HC, HAR, HAP, HAC- (28 días)



PANELES CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCION
HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE
 GRÁFICOS

REFERENCIA: **R.129-220205-HAC**



CAPÍTULO 6:

**6. CONCLUSIONES Y
PERSPECTIVAS FUTURAS**

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

El modo de presentación de este último capítulo se ha realizado mediante la división en subapartados que presentan las conclusiones específicas a que dio lugar el desarrollo de esta tesis, según los temas tratados. Estos apartados exponen las determinaciones más significativas derivadas de la presente investigación bibliográfica y experimental. Son presentados en forma de comentarios con el fin de encauzar las diferentes líneas de actuación y las podemos enumerar como:

- 1º. La perspectiva de ejecución de paneles prefabricados en Canarias
- 2º. El análisis de la evolución del hormigón en Canarias
- 3º. La consecución del hormigón autocompactante con constituyentes canarios a partir de la campaña experimental
- 4º. La aplicación del autocompacto en la edificación prefabricada

Finalmente, se presentan las diferentes líneas futuras de investigación que han surgido durante la elaboración y reflexión del presente trabajo.

- Conclusiones relativas a la factibilidad de ejecución de paneles prefabricados para fachada en Canarias:

- La ejecución de paneles prefabricados de hormigón para fachada en Canarias es actualmente una realidad que tiene un alcance de implantación total en los edificios industriales y se prevé su introducción a corto plazo en edificios comerciales, administrativos y otros que recomienden una flexibilidad extensa de uso.

- La historia reciente de la arquitectura con hormigón arquitectónico en Canarias nos ofrece muy buenos ejemplos. Asimismo, la edificación con prefabricados de hormigón también deja actuaciones correctas y durables en función de la calidad que se le demandaba. La prefabricación de fachada para

edificios habitables debe basarse en paneles multicapas que ofrezcan garantías de flexibilidad, impermeabilidad, aislamiento, estética y mantenimiento. Además la ejecución del panel conviene ser tolerante al diseño del proyectista y el montaje debe garantizar la seguridad del trabajador.

- La proporción de suelo urbano que corresponde a uso industrial y la situación estratégica entre aeropuertos, puertos y núcleos de población de estas áreas edificadas, conjuntamente con la asociación a grandes viales de comunicación, generan una gran huella visual. Este impacto se acentúa cuando es negativo. Esto es consecuencia, entre otros factores, por las muchas fachadas de estos edificios industriales sin tratar. En Canarias, esta situación supone un enorme problema debido a nuestro delicado paisaje. Se hace imprescindible un mayor control en la terminación exterior de estas edificaciones.

- Conclusiones relativas a la evolución del hormigón en Canarias:

- La conocida alta demanda de agua de nuestros hormigones convencionales (HC) se ratifica en nuestros experimentos. Los ensayos de fluidez con pasta de cemento, con mortero y posteriormente con hormigón confirman que el principal perjuicio procede de los áridos de machaqueo. En nuestro trabajo de investigación ahondamos especialmente en lo contraproducente que son las arenas fonolíticas. El avance en la maquinaria de extracción y trituración de áridos debe hacernos reflexionar en la conveniencia de seleccionar basalto para la elaboración de arena 0/4 destinada preferentemente a la ejecución de hormigones de última generación. Por lo demás, se debe plantear un sencillo proceso de lavado, posterior secado y control del almacenamiento de las arenas para evitar el alto y variable contenido en finos.

- Se hace imprescindible la adaptación de las industrias canarias, tanto de hormigón elaborado como prefabricado, a los nuevos procesos de producción y control de calidad para la obtención de hormigones capaces de ofrecer prestaciones

al edificio terminado. Además, convendría que los proyectistas trabajasen conjuntamente con las empresas de productos de hormigón, especialmente en el caso de prefabricados.

- Se hace imprescindible el uso de reductores de agua de alto rango para desarrollar el hormigón que se produce en Canarias. La simple agregación de un aditivo superfluidificante a la mezcla habitual origina un claro beneficio. Se permite reducir el agua de amasado y en consecuencia se produce un aumento de las resistencias. En nuestro caso, la adición de un superfluidificante genérico en la cantidad recomendada por el fabricante aumenta en más de un 20% la capacidad mecánica a compresión, obteniendo unas resistencias por encima de los 50 MPa a los 28 días (**HAR**). Además, se consigue mejorar la trabajabilidad pasando de una consistencia blanda (cono 6) hasta una consistencia fluida (cono 18). Este reajuste de agua involucrará una reducción de la porosidad y de los capilares, lo que repercutirá en la impermeabilidad y protección frente a los agentes agresivos. No nos cabe duda del beneficio derivado en la durabilidad del material.

- Cuando además del uso de superfluidificante se ajusta la granulometría de los áridos, se presenta la posibilidad de ofrecer otras prestaciones en el hormigón (**HAP**). En concreto, reducir el tamaño máximo de árido desde el 10/20 hasta el 5/10 y además disminuir desde el 60% hasta por debajo del 45% el contenido de árido grueso con respecto al total ofrece una consistencia totalmente fluida, muy manejable en las tareas de hormigonado y resistencias por encima de los 45 MPa a los 28 días sin necesidad de vibración.

- Algunas prestaciones que ofrece un HAP frente a un hormigón convencional en Canarias son la facilidad y rapidez de ejecución de la pieza hormigonada, la mayor seguridad en la ejecución de los trabajos debido esencialmente a que se requiere menos personal, menor tiempo y se evitan algunas tareas, las que se

refieren al producto de hormigón terminado como resistencia, mejor terminación, impenetrabilidad de agentes agresivos y consecuentemente durabilidad.

- Además los HAP ofrecen para paneles de fachada la posibilidad de trabajar por capas debido a la ausencia de vibrado. El utilizar una capa exterior con altas prestaciones estéticas es una ventaja añadida que nos permite utilizar pigmentos en el recubrimiento exterior. Esta capa superficial nos permite ofrecer color y además estas partículas microscópicas pueden colmatar los intersticios de la pasta de cemento y contribuir más aún a la protección de la pieza.

- En los hormigones de altas prestaciones pigmentados (**HAPP**) se recomienda una dosificación del 6% del pigmento con respecto al peso del conglomerante para el caso de cementos grises y del 2% para cementos blancos. Por encima de estos valores, la tintura comienza a perder su capacidad de incremento del coloreado. En este sentido, el cemento blanco con un 2% de pigmento ofrece muy buenos resultados estéticos y económicos.

- A partir de los resultados obtenidos en los HAP y para la obtención de autocompactantes en Canarias (**HAC**), resaltamos que es necesario cambiar la concepción que tenemos del hormigón en Canarias. A partir de aquí, transformar paulatinamente las plantas de elaboración de hormigón con una adaptación a los mecanismos actualizados de proceso de ejecución. Especialmente conviene destacar la labor de control de recepción de los áridos que deben mantener una regularidad en todas las partidas y de su almacenamiento previo a la elaboración de la mezcla. Además del control de calidad del proceso de elaboración de la pieza hormigonada, corresponde dotar de medios a un laboratorio donde se puedan ejecutar los nuevos ensayos de determinación de autocompacidad.

• Conclusiones relativas a la consecución del HAC a partir de la campaña experimental:

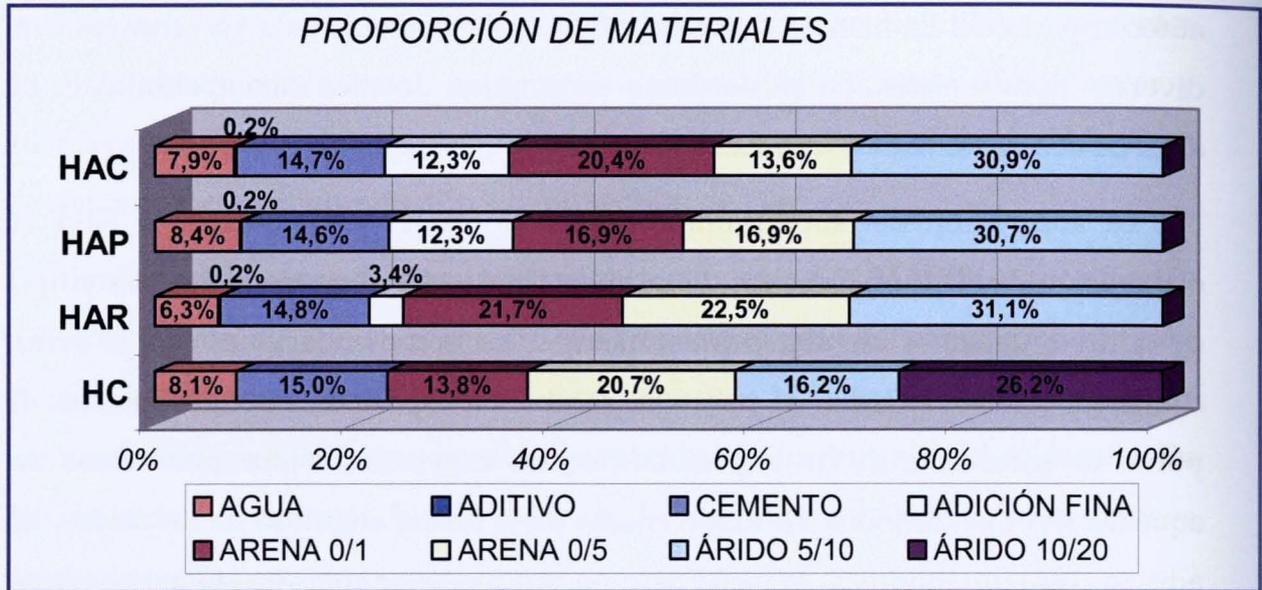
○ No hay ningún inconveniente en emplear los cementos de producción e importación en Canarias ya que éstos no tienen por qué impedir la ejecución de autocompactante. En nuestra campaña experimental hemos realizado ensayos con diversos tipos y clases, no encontrando en ninguno de ellos incompatibilidad. El agua de abasto también es admisible.

○ La aditivación del superfluidificante es el primer paso ineludible para la elaboración de HAC en Canarias. La proporción de éste depende de la clase y tipo de aditivo, debemos atender primeramente a las recomendaciones de la firma comercial y después hallar el punto de saturación específico. En nuestro caso, el punto de saturación de los superfluidificantes ensayados estaba por debajo de aquellas recomendaciones. La razón emana de la forma angulosa de los áridos. El aditivo consigue fluidificar la pasta pero no proporcionar cohesividad a ésta con el conjunto de áridos. El efecto que produce es una exudación de la pasta excesivamente aguada que traspasa los intersticios que dejan los gránulos más grandes. Por debajo del punto de saturación del superfluidificante específico para nuestro caso pierde fluidez y por encima produce segregación.

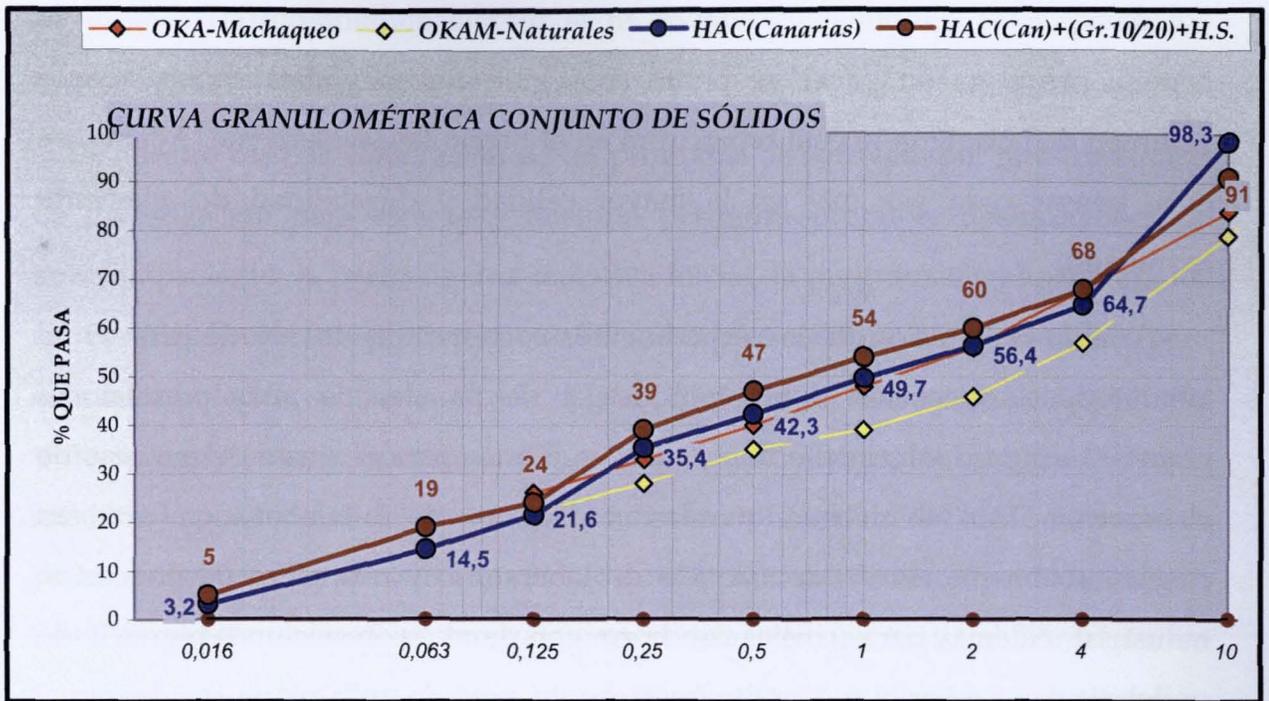
○ Es necesaria la adición de finos en la mezcla ya que éstos infieren la cohesividad necesaria para garantizar una fluidez no segregada. La mejor la hemos encontrado en el *filler* calizo. Un árido importado desde Sevilla con un alto contenido en finos aprovecha la adición microgranular y además aporta una mayor homogeneidad en el intervalo de tamaños de las arenas.

○ La arena fonolítica de machaqueo 0/5 debe representar una proporción menor del 18% con respecto al total de áridos. Por encima de este porcentaje infiere una desestabilidad que hace complicada una dosificación fiable de un hormigón autocompactante. Para compensar se debe incrementar la cantidad de arena 0/1

del Sahara por encima de un 20% del total de áridos y aumentar también el conjunto del árido 5/10. Estas relaciones junto a la incorporación de la arena caliza antes citada presenta un esqueleto granular equilibrado y de máxima densidad aparente.



○ La cantidad del árido 5/10 debe también incrementarse en función de la disminución de la grava 10/20 (véase siguiente gráfico "Gr 10/20"). Este árido mayor produce una alta probabilidad de bloqueo y de choque entre partículas que lleva a la segregación. La solución debe estar dirigida a la eliminación de este tamaño 10/20 o a su reducción hasta por debajo del 10% del total de los constituyentes sólidos. Esta baja relación no debe ocasionar problemas por la despreciable probabilidad de que varios de estos granos se posicionen en el mismo lugar al mismo tiempo y de que choquen entre sí.



○ Una vez ajustada toda esta relación de constituyentes sólidos, es posible la inclusión de la microsílíce. Aunque previamente habíamos comprobado que la opción de adicionar humo de sílice como exclusivo componente fino ocasionaba insuficiente fluidez, ahora con la combinación correcta de todos los materiales y adicionando una cantidad inferior al 2,5% del peso del cemento no reduce el grado de flujo de asentamiento y además da cohesividad a la mezcla (*véase anterior gráfico "H.S."*). Se evita así algún imprevisible problema de ligera exudación derivado del inestable contenido en finos de los áridos canarios. Además se obtienen mejoras en la capacidad resistente de la mezcla.

• Conclusiones relativas a la aplicación del HAC en la industria de prefabricados:

○ Si se utiliza HAC en la elaboración de paneles prefabricados se agilizarán los tiempos, además de mejorarse la capacidad y seguridad del proceso de producción. Sin embargo, será necesario un mayor control de calidad de toda la producción.

○ Aunque los componentes nuevos en la mezcla aumentarán el costo de la materia prima de un panel, se podrá conseguir una mayor esbeltez y menor volumen de hormigón lo cual repercutirá en el precio favorablemente. Además se debe pensar cada vez más en la mayor calidad y durabilidad del elemento terminado.

○ Tras la elaboración de los experimentos correspondientes de decisión en el laboratorio, la ejecución a nivel industrial de paneles de altas prestaciones requerirá un paso intermedio de ensayos en fábrica para el ajuste del proceso de elaboración. Esto se debe a que las condiciones de la elaboración cambian considerablemente entre una maqueta de laboratorio y una pieza de dimensión industrial. Además para paneles con hormigón de altas prestaciones pigmentado se deberá comprobar el índice de absorción de agua de cada pigmento debido al poco espesor (2 cms) frente a la dimensión del panel.

○ El panel de árido volcánico lavado ejecutado con hormigón de altas prestaciones pigmentado ofrece buenos resultados estéticos pero se debe evitar los áridos con un alto contenido de vacuolas. En cualquier caso se debe aumentar el recubrimiento y el contenido en finos de esta capa para proporcionar protección a la armadura.

○ El proyectista de edificios que utiliza estos paneles de altas prestaciones debe diseñar conjuntamente con la oficina técnica de la empresa que vaya a elaborar los paneles. Se hace necesario un ajuste del proyecto a las posibilidades que el elemento prefabricado ofrece. Por otra parte, las empresas de prefabricados deben acercarse al proyectista y flexibilizar la elaboración de algún detalle en función de los requerimientos del proyecto.

○ Las posibilidades de la computerización de la industria nos permite llevar un mejor ajuste en las plantas de prefabricados y también lograr un control estricto de los componentes constituyentes, del proceso de producción y del producto

terminado. Todo ello además combinado inexcusablemente con el diseño de los elementos a partir del proyecto.

En nuestro caso, la elaboración de un programa de software por nuestro equipo de investigación para esta tesis doctoral permitirá proponer dosificaciones de autocompactante. A partir de una tentativa inicial, la programación formulará los ajustes para la correcta proporción de los materiales constituyentes. Las bases para esta reformulación se ajustan desde la granulometría de los constituyentes sólidos y siempre que éstos se aproximen a la peculiaridad de los áridos canarios. Además nos abre la posibilidad de continuar ahondando en la mejora del HAC elaborado y de trasponer esta herramienta de cálculo en el desarrollo de otro tipo de hormigón de altas prestaciones. Este programa se podría adecuar tanto al hormigón en Canarias como a cualquier otro lugar, siempre que se precise la dosificación granulométrica idónea y se ajuste al programa.

Esta tesis doctoral no es un punto y final en nuestra investigación con hormigones de última generación y su aplicación en Canarias. Más bien es el comienzo de una nueva andadura en la que hemos aprendido mucho de la lectura y su análisis, así como de la experiencia práctica y su desarrollo. Exponemos a continuación las líneas de investigación principales que se conciben como perspectivas futuras a partir de este trabajo:

- 1º. Continuación de los trabajos de control y análisis que se están llevando a cabo durante la aplicación real de paneles prefabricados para fachada con hormigón de altas prestaciones en edificaciones que se están ejecutando y se construirán próximamente en Canarias.

2º. Desarrollo de los ensayos de tracción indirecta del hormigón logrado (ensayo brasileño) y de impermeabilidad con el ensayo de medida cuantitativa de penetración del agua.

3º. Perfeccionamiento del programa de software confeccionado para la consiguiente aplicación en autocompactantes con otras materias primas similares.

4º. Ejecución de ensayos específicos para la comprobación del idóneo porcentaje de grava 10/20, así como de humo de sílice en la dosificación apartada como concluyente en esta tesis (*véase* R129 y R130).

5º. Desarrollo específico de una dosificación que logre la mínima relación agua/cemento con estas materias primas características de Canarias y en la misma línea la consecución de una resistencia por encima de los 80 MPa con la adición de microsílice.

6º. Investigación experimental para el desarrollo de los hormigones de altas prestaciones pigmentados, comprobando la autocompacidad en función de las características de cada pigmento. Se trabajará a partir de las conclusiones anteriores en las que se demostraba los diferentes índices de absorción de los pigmentos (PÉREZ LUZARDO, 1990). Además se comprobará la variación del índice de pigmentación (según código Pantone) si se trata de un HC o de un HAC.

7º. Impulso de otros tipos de hormigón de última generación (p.ej: hormigones porosos, hormigones con fibras o con textil...) a partir de los conocimientos generales adquiridos en este trabajo con autocompactos. Nuestro compromiso existente con el Laboratorio de materiales de construcción de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria garantiza la continuación de ensayos encaminados en esta dirección.

8º. Análisis, crítica y propuesta del proceso actual de selección, extracción y elaboración de áridos para construcción en Canarias con el fin de mejorar las cualidades de nuestros constituyentes de hormigón, especialmente las arenas.

CAPÍTULO 7:

7. BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA

AGUADO, A. y OLIVIER, M. (1992): "Hormigones de alta resistencia. Definición y ejemplo de aplicación. *Congreso Intercontinental de Hormigón Preparado*. Madrid. (s.p.)

AGUILA GARCÍA, A. (1974): *La prefabricación aplicada en España*. Madrid, Sindicato Nacional de la Construcción.

AGUILA GARCÍA, A. (1988): *La tecnología de la industrialización de los edificios de vivienda*. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.

AGUILÓ ALONSO, M. (1974): *Prefabricación: teoría y práctica*. Barcelona.

ALAEJOS GUTIERREZ, María del Pilar y FERNÁNDEZ CÁNOVAS, Manuel (2000): *Hormigón de alta resistencia: Dosificación y propiedades mecánicas*. Ministerio de Fomento - Centro de estudios y experimentación de obras públicas CEDEX. Madrid.

ALAEJOS GUTIERREZ, María del Pilar y MARÍ BERNAT, (2000): "Anejo 11º. Recomendaciones para hormigones de alta resistencia", en *La EHE explicada por sus autores*. Madrid. pp. 309-321.

ARQUITECTURA VIVA, número 51. Año 1996. Madrid.

BASSO BIRULES, F; AGUIRRE DE IRAOLA, F; ANABITARTE PRIETO, C; RICART BECHE, J; KRISTENSEN, S; LEWICKI, B; BLACHÉRE, G. y FERNÁNDEZ CASADO, C. (1968): *Prefabricación e industrialización en la construcción de edificios*. Barcelona. Editores técnicos asociados.

BERGER-BÖCKER, Thomas (2002): "Hormigón autocompactante en camión hormigonera: informe de un año de experiencia", en *PHI-Planta de Hormigón Internacional nº 5*. Colonia, Alemania. Octubre de 2002. pp. 56-58.

BERNARDO DE LA PEÑA, R. (2001): "Hormigón autocompactante" en revista *BIT*. Junio de 2001.

BERNDT, K. (1969): *Prefabricación de viviendas en hormigón*. Madrid. Editorial Blume.

BORRALLERAS MAS, P. (2003-a): "Obras y realizaciones con hormigón autocompactable (HAC)" en *Hormigón autocompactable, un hormigón para el siglo XXI*. Valencia. Jornada técnica IECA. Febrero de 2003. pp. 55-70.

BORRALLERAS MAS, P. (2003-b): "Obras y realizaciones con hormigón autocompactable (HAC)" en *Hormigón y Acero nº 228-229*. Madrid. 2º y 3º trimestre de 2003. pp. 149-159.

BRAMESHUBER, Wolfgang (2004): "Hormigones de alto rendimiento" en *Detail nº 1*. 2004, pp. 72-79.

BRUCE, A. y SANDBANK, H. (1972): *A history of prefabrication*. Editado por Arno Press Inc.

BURÓN, Manuel; PELÁEZ, Miguel; GÓMEZ, Luis y VALENTÍN, Javier (2002): "Proyecto y cálculo: Edificios industriales prefabricados", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural). pp. 361-371.

C. C. GOMES, Paulo; GETTU, Ravindra y AGULLÓ, Luis (2001): "El hormigón autocompactable. Propiedades y métodos de caracterización" en *Hormigón y Acero* nº 221-222. Madrid. 3^{er} y 4^o trimestre de 2001. pp. 27-37.

CALAVERA RUIZ, J; ALAEJOS GUTIERREZ, P; GONZÁLEZ VALLE, E; FERNÁNDEZ GÓMEZ, J y RODRÍGUEZ GARCÍA, F. (2004): *Ejecución y control de estructuras de hormigón*. Editado por INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones).

CALAVERA RUIZ, J; LÓPEZ SÁNCHEZ, P; FERNÁNDEZ GÓMEZ, J; GONZÁLEZ ISABEL, G. y PÉREZ LUZARDO, J. M. (1999): *Aspectos Visuales de Hormigón*. Madrid. Monografía nº 3. INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales de Construcción).

CALAVERA RUIZ, José (1991): "Aspectos humanos y psicológicos en la implantación del control de calidad de Construcción". *European Symposium on Management, Quality and Economics in Housing*. Lisboa.

CALAVERA RUIZ, José y FERNÁNDEZ GÓMEZ, Jaime (2001): *Una introducción a la prefabricación de edificios y naves industriales*. Madrid. Monografías INTEMAC nº 4. (Instituto Técnico de Materiales de Construcción).

CALLANDER, I. A; CLARK, H. A. y LEES, T. P. (1992): "Consideraciones internacionales del hormigón de alta resistencia". *Congreso Intercontinental de Hormigón Preparado*. Madrid. (s.p.)

CEB-FIP (eds.), (1990): "High Strength Concrete. State-of-The-Art-Report", en *BULLETIN D INFORMATION* nº 197. Agosto de 1990. (s.p.)

CIMMA, W. (1991): "Composition du Béton à hautes performances et choix di ciment". *Conferencia sobre hormigón y otras prestaciones*. Lausanne. (s.p.)

DE LLORENS DURÁN, José Ignacio (2002): "Prefabricar la casa del príncipe", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural) pp. 301-310.

Desconocido (2005): "Memorial judío en Berlín", en *Arquitectura Viva* nº 101. p. 5.

DIEGUEZ, D (1999): "Aditivos a la carta" en *Hormigón* nº 41. Madrid. Junio de 1999. pp. 48 - 49.

- DOMÍNGUEZ GARCÍA-CUEVAS, Juan (2003-a): "Utilización de los aditivos en el hormigón autocompactable" en *Hormigón autocompactable, un hormigón para el siglo XXI*". IECA Valencia. Jornada técnica IECA. Febrero de 2003. pp. 9-14.
- DOMÍNGUEZ GARCÍA-CUEVAS, Juan (2003-b): "Utilización de los aditivos en el hormigón autocompactable" en *Hormigón* nº59. Madrid. Febrero de 2003. pp. 68-70.
- DOMÍNGUEZ GARCÍA-CUEVAS, Juan (2003-c): "Utilización de los aditivos en el hormigón autocompactable" en *Hormigón y Acero* nº 228-229. Madrid. 2º y 3er trimestre de 2003. pp. 139-142.
- DOMÍNGUEZ SURIA, Sinesio (2005): "Características, puesta en obra y acabado del HAC del museo Oscar Domínguez" en *II Curso de Tecnología del Hormigón en la edificación y la obra pública*. La Laguna. (s.p.)
- ELLIOTT, K. (2002): "European building construction in precast concrete", Conferencia de apertura en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural), pp. I-X.
- Eurocódigo 2: "*Proyecto de Estructuras de Hormigón*". AENOR.
- FAVRE, R. (1991): "Les bétons à hautes performances (BHP): Une chance à saisir", en *Conferencias de las jornadas de estudios de 21 de marzo de 1991*. Lausanne, Francia.
- FERNÁNDEZ GÓMEZ, Jaime (2003): "El control de calidad en los hormigones de alta resistencia" en *Hormigón y Acero* nº 228-229. Madrid. pp. 67-73.
- FERNÁNDEZ GÓMEZ, Jaime y BURÓN MAESTRO, Manuel (2005): *Guía práctica para la utilización del hormigón autocompactante*. Madrid. Editado por Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).
- FERNÁNDEZ ORDOÑEZ, J. A; AGUILÓ ALONSO, M; ARANDES RENÚ, R; ECHEVARRÍA SÁINZ, F; ESPINOSA OCHOA, J. M; LÓPEZ BAILLO, J. F y SALAS SERRANO, J (1974): *Prefabricación; teoría y práctica*. Barcelona. Editores técnicos asociados
- FIP (eds.) (1985): *Design recommendations for multistorey precast concrete*. Recomendaciones de la FIP.
- GARCÍA BALLESTER, L.; AYASTS, C. y CAPUZ, R. (1992): "Los áridos calizos en los hormigones de alta resistencia". *Congreso Intercontinental de Hormigón Preparado*. Madrid. (s.p.)
- GARCÍA SAN MARTÍN, J. M y BORRALLERAS MAS, P (2001): "Hormigón autocompacto y Glenium: un compromiso perfecto" en *Hormigón* nº 52. Madrid. Septiembre de 2001. pp. 54 - 64.

GARRIDO ROMERO, Luis (2004): "Tecnología, propiedades generales y realizaciones con hormigón autocompactante" en *Hormigones autocompactantes*. Sevilla. XI Jornadas técnicas sobre Otros Hormigones. pp. 5 - 37.

GARRIDO ROMERO, Luis (2005): "Comportamiento estructural del HAC. Caracterización de propiedades mecánicas y análisis de durabilidad" en *II Jornadas del hormigón en la construcción y en la obra civil*. La Laguna. (s.p.)

GETTU, Ravindra y AGULLÓ, Luis (2004): "Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización (Parte I y II)" en *Cemento-Hormigón* nº 861. Madrid. Abril y mayo de 2004. pp. 50 - 67 y pp. 32 - 55.

GETTU, Ravindra; BARRAGÁN, B y AGULLÓ, Luis (2004): "Desarrollo y aplicación de hormigones autocompactables de altas resistencias" en *Hormigones autocompactantes*. Sevilla. XI Jornadas técnicas sobre Otros Hormigones. pp. 87 - 97.

GETTU, Ravindra; C. C. GOMES, Paulo; AGULLÓ, Luis y BERNARD, C (2003): "Desarrollo de los hormigones autocompactables de alta resistencia" en *Hormigón autocompactable, un hormigón para el siglo XXI*. Valencia. Jornada técnica IECA. Febrero de 2003. pp. 15 - 26.

GONZÁLEZ-ISABEL, Germán (1993): *Hormigón de Alta Resistencia*. Madrid. Editado por INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones).

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (1990): "Influencia de las características petrográficas de los áridos canarios en las propiedades de los hormigones" (Tesis Doctoral). Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Las Palmas.

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (1993): *Dosificación de hormigones con aditivos superfluidificantes*. Colección Temas de Construcción num. 6. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (1999): "Dosificación del hormigón", en *Materiales y técnicas de Construcción*. Las Palmas de Gran Canaria. (Inédito). pp. 800 - 812.

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (2002): "El hormigón como material de estructura y acabado", en *Temas de Construcción*. Las Palmas de Gran Canaria. (Inédito). (s.p.)

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (2002): "Ideas para la mejora de durabilidad y resistencia de los hormigones confeccionados con componentes de Canarias" en *Tecnología de hormigones de altas prestaciones y su aplicación en Canarias*. Santa Cruz de Tenerife y Las Palmas de Gran Canaria. (s.p.)

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos (2004): "El hormigón fresco como inductor de las propiedades del hormigón endurecido" en *I Curso de Tecnología del Hormigón en la edificación y la obra pública*. Las Palmas de Gran Canaria. (s.p.)

GUIGOU FERNÁNDEZ, Carlos y HERNÁNDEZ DÉNIZ Juan Francisco (1999): "Dosificación del hormigón", en *Construcción I; Materiales y técnicas de construcción*. Las Palmas de Gran Canaria. (Inédito). (s.p.)

HADID, Zaha (2005): "Fenómeno físico. Centro de la Ciencia Phaeno, Wolfsburg" en *Arquitectura Viva* nº 101. pp. 54 - 63.

HANNA, E.; LUKE, K.; PERRATON, D. y AITCIN, P. C. (1989): "Rheological Behavior of Portland Cement Pastes in the Presence of a Superplasticier", en *ACI SP 119*. pp. 171-188.

HERRERO BENEÍTEZ, José Emilio (2005): "El hormigón de alta resistencia en el arco de Los Tilos" en *II Curso de Tecnología del Hormigón en la edificación y la obra pública*. La Laguna. (s.p.)

HUE GARCÍA, Fernando (2002): "Normalización europea de productos prefabricados estructurales", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural) pp. 48-57.

HUE GARCÍA, Fernando (2003): "Los hormigones de alta resistencia y la prefabricación" en *Hormigón y Acero* nº 228-229. Madrid. pp. 45-55.

HURTADO HURTADO, Jose Antonio (2004): "Experiencias en la fabricación y puesta en obra de los hormigones autocompactantes" en *Hormigones autocompactantes*. Sevilla. XI Jornadas técnicas sobre Otros Hormigones. pp. 99 - 118.

IECA LEVANTE (2003): Presentación, en *Hormigón autocompactable, un hormigón para el siglo XXI. Jornadas técnicas*. Valencia, febrero de 2003. pag. inicio.

ISASI, Justo (2005): "Piedra líquida", en *Arquitectura Viva* nº 101. Madrid. Pp. 30-33.

JAMBOR, J. (1976): "Hydraulic cement pastes: Their structure and properties". *Asociación del Cemento y Hormigón*. Wexham Spring, EE.UU.

JIMÉNEZ MONTOYA, Pedro; GARCÍA MESEGUER, Álvaro y MORÁN CABRÉ, Francisco (2000): *Hormigón Armado. 14ª Edición basada en la EHE*. Barcelona.

KONCZ, TIHAMÉR (1968): *Manual de la construcción prefabricada* (tomo I). Editorial Blume.

KONCZ, TIHAMÉR (1977): *Construcción industrializada*. Madrid. Hemann Blume Ediciones.

LEWICKI, BOHDAN (1968): *Edificios de viviendas prefabricadas con elementos de grandes dimensiones*. Madrid. Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento.

MALINOWSKI, R. y GARFINKEL, Y: "Betongens For Historia", en *Nordisk Betong* nº 5.

MARIO OLIVERI, G. (1972): *Prefabbricazione o metaprogetto edilizio*. Barcelona. Editorial Gustavo Gili.

MARTÍN HERNÁNDEZ, Manuel (1997): *La Invención de la Arquitectura*. Madrid. Celeste Ediciones.

MELIÁN MARRERO, Gonzalo y FLORES MEDINA, Nelson (2004): "Mejora de las condiciones físicas y mecánicas de hormigones con fibras de polipropileno" en *I Curso de Tecnología del Hormigón en la edificación y la obra pública*. Las Palmas de Gran Canaria. (s.p.)

MELLAART, James (1981): *The Neolithic of the Near East*. Londres. Thames and Hudson.

MEYER-BOHE, WALTER (1969): *Prefabricación II, análisis de los sistemas*. Barcelona. Editorial Blume.

Ministerio de Fomento (eds.) (1998): *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)*. Madrid. Edita Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.

Ministerio de Fomento (eds.) (2003): *Instrucción para la Recepción del Cementos (RC-03)*. Madrid. Comisión permanente del cemento. Edita Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.

NAVARRO FERRER, F. y ESTEBAN GARCÍA, M. (2003): "Empleo del hormigón autocompactable en la prefabricación" en *Hormigón y Acero* nº 228-229, 2º y 3º trimestre de 2003. Madrid. pp. 161-166.

NAVARRO LÓPEZ, José Manuel y ESCAÑO RODRÍGUEZ, M^a Teresa (2002): "Sistema de construcción de viviendas a base de paneles prefabricados de hormigón de grandes dimensiones", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural) pp. 513-523.

OKAMURA, Hajime (1997): "Self-Compacting High-Performance Concrete", en *Concrete Internacional*, vol. 19, nº 7.

OKAMURA, Hajime y OUCHI, Masahiro (1999): "Self-compacting concrete. Development, present use and future", en *Self Compacting Concrete. Proceedings of the First Internacional RILEM Symposium*. Estocolmo. pp. 3-14.

OKAMURA, Hajime; OZAWA, K; OUCHI, Masahiro (2000): "Self-Compacting Concrete" en *Structural Concrete*, vol. 1, nº 1.

ORMAZABAL, G; ARMENGOU, J; AGUADO DE CEA, A. y RAMOS, G. (2002): "Sistema integrado de toma de decisiones en proyectos de estructuras prefabricadas", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural), pp. 5-15.

ORTIZ BONET, Angel (2002): "Temas claves para el futuro de la prefabricación", en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural) pp. 337-347.

OTERO, Luis y ALONSO, Abraham (2006) "Nueva Arquitectura: Los mejores arquitectos del siglo XXI" en la revista *Muy Interesante*, nº 297. Febrero de 2006. p. 76.

OUCHI, Masahiro; HIBINO, M y OKAMURA, Hajime (1997): "Effect of superplasticier on Self-Compactability of fresh concrete" en *Transportation Research Record* nº 1574. pp. 37-40.

PACIOS ÁLVAREZ, A. (2003): "El hormigón autocompactable: tecnología sostenible para el sector de la construcción" en *Hormigón y Acero* nº 228-229. Madrid. 2º y 3er trimestre de 2003. pp. 143 - 148.

PALACIOS NAVARRETE, Pilar y NAVARRETE DE CÁRCER, Ernesto (2003): "Los hormigones especiales como producto industrial", en *Hormigón y Acero* nº 228-229. Madrid. pp. 39-44.

PALACIOS, A; PACIOS, A y GETTU R. (2004): "Control de calidad y procedimientos de ensayo de los hormigones autocompactables" en *Hormigones autocompactantes*. Sevilla. XI Jornadas técnicas sobre Otros Hormigones. pp. 47 - 58.

PARTHENAY, C. (1992): "Los fabricantes de hormigón preparado encaran el futuro con hormigones de alta resistencia". *Congreso Intercontinental de Hormigón Preparado*. Madrid. (s.p.)

PÉREZ LUZARDO, José Manuel (1991): "Color y textura en el hormigón estructural" (*Tesis Doctoral*). Departamento de Construcción Arquitectónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

PÉREZ, J. L; ORDOÑEZ, J; MENÉNDEZ, A y RUBIO, M. C (2004): "Diseño de encofrados para el hormigón autocompactante" en *Hormigones autocompactantes*. Sevilla. XI Jornadas técnicas sobre Otros Hormigones. pp. 59 - 86.

PÉREZ-FADÓN, Santiago y HERRERO, José Emilio (2002): "El arco de Los Tilos en la isla de La Palma" en *Tecnología de hormigones de altas prestaciones y su aplicación en Canarias*. Santa Cruz de Tenerife y Las Palmas de Gran Canaria. (s.p.)

- PIERANTONI SILVA, Fabiola y PENADÉS MARTÍ, José (2002): “La prefabricación en edificación: prefabricación de estructura y elementos de obras singulares”, en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural), pp. 385-388.
- POPOVICS, Sandor; *Efectos del árido sobre ciertas propiedades del hormigón de cemento Pórtland*. Univ. De Auburn, Alabama. EEUU.
- PUNTKE, Wolfgang y MILDNER, Markus (2003): “Water requirement of fine grain aggregates” en *Concrete Plant International (CPI)*. Colonia. Octubre de 2003. pp. 68 - 81
- REVEL, MAURICE (1966): *La prefabricación en la construcción*. Bilbao. Ediciones Urmo.
- REVUELTA CRESPO, David (2003): “Hormigón autocompactable; Visión general” en *Hormigón autocompactable, un hormigón para el siglo XXI*. Valencia, Jornada técnica IECA. Febrero de 2003. pp. 1 - 7.
- REVUELTA CRESPO, David y FERNÁNDEZ LUCO, L. (2003): “Hormigón autocompactable: Visión general” en *Hormigón y Acero* nº 228-229. Madrid. 2º y 3er trimestre de 2003. pp. 133 - 137.
- SALAS SERRANO, Julián (1987): *Construcción industrializada: Prefabricación*. Madrid. Edita Fundación Escuela de la Edificación (UNED).
- SANTANA RODRÍGUEZ, Ricardo Javier (2004): “Características y propiedades de los hormigones autocompactantes y su aplicación en Canarias” en *I Curso de Tecnología del Hormigón en la edificación y la obra pública*. Las Palmas de Gran Canaria. (s.p.)
- SCHWEIZER, Hermann y PHILIPPS, Dominique (2002): “Racionalización de la producción en la fábrica de paneles”, en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural) pp. 233-241.
- SEDRAN, T. y DE LARRARD, F. -*Laboratoire Central de Ponts et Chaussées, Nantes, France-* (1999): “Optimization of self-compacting concrete thanks to parking model”, en *Self-Compacting Concrete. Proceedings of the First International RILEM Symposium Proceedings PRO 7*. Estocolmo, Suecia. RILEM Publications S.A.R.L. pp. 321-332.
- Self-Compacting Concrete European Project Group -BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC-*, (2005): “The european guidelines for selfcompacting concrete. Specification, production and use.” Mayo de 2005.
- SIGNORILE BIANCHI, G. (1965): “Note sugli aspetti economici della posizione edilizia”, en *Industrializzazione dell'edilizia*. Dédalo. Bari.

SKARENDAHL, Å y PETERSSON Ö. (2000): *Self-Compacting Concrete. State-of-the-Art Report*. en RILEM technical committee 174-SCC, Report nº 23. Cachan, Francia. RILEM Publications S.A.R.L.

SKARENDAHL, Å. y PETERSSON, Ö. (eds.) (1999): *Self-Compacting Concrete – Proceedings of the First Internacional RILEM Symposium*. Estocolmo. Editado por Å. Skarendahl y Ö. Petersson. *Swedish Cement and Concrete Research Institute*. Septiembre de 1999.

UNI 11040, (eds.) (2003): “Ensayos sobre hormigón autocompacto. Especificaciones, características y control”. *Organismo Nacional Italiano de Normalización – UNI 11040*. Italia. Marzo de 2003. (s.p.)

VAN ACKER, A. (1994): *Planning and design handbook on precast building structures*. FIP. Londres. (Traducción española editada por la ATEP, 1996)

VAN ACKER, A. (2002): “State and developments of precast concrete building construction in Europe”, en *Comunicaciones del Primer Congreso Nacional de Prefabricación*. Madrid, mayo de 2002. Edita ACHE (Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural), pp. 679-684.

VAN KHANH BUI y MONTGOMERY, D (1999): “Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume” en *Self-Compacting Concrete. Proceedings of the First Internacional RILEM Symposium* Proceedings PRO 7. Estocolmo, Suecia. pp. 373-384. RILEM Publications S.A.R.L.

VAQUERO, J; CASTRO, T; CONCEJO, F; GONZÁLEZ, J. C; LLEYDA, J. L y VALLE, J. (1996): *Edificación con prefabricados de hormigón: para usos industriales, comerciales, aparcamientos y servicios*. Madrid. IECA y ANDECE.

VITRUBIO POLIÓN, Marco (1987): *Los diez libros de Arquitectura*. Barcelona. Alta Fulla.

ZAITSEV, Y. (1980): “7th Internacional Congreso on the chemistry of cement”. Paris. Vol III, pp. 1-176.

Páginas de internet consultadas:

www.mtas.es (Página Internet) Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales

www.mtas.es (Página Internet): "Accidentes de trabajo. Evolución 1999-2002" Página del Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales - Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Fecha entre mayo de 2004 y febrero de 2006.

www.bettor-mbt.es (Página Internet). Fecha entre mayo de 2004 y febrero de 2006.

www.efca.info (Página Internet): "The european guidelines for self-compacting concrete". Fecha entre mayo de 2005 y febrero de 2006.

www.efnarc.org (Página Internet): "Especificaciones y directrices para el hormigón autocompactable - HAC". EFNARC (eds.). Fecha entre febrero de 2002 y febrero de 2006.

www.hormigonelaborado.com (Página Internet): "Presente y futuro del hormigón". Fecha entre mayo de 2004 y febrero de 2006.