



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ARQUITECTURA TÉCNICA PROYECTO FINAL DE CARRERA

HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE EN COMPONENTES DE EDIFICACIÓN

CARACTERIZACIÓN Y APLICACIÓN PRÁCTICA

Proyectista: AGUSTÍN PINEDO

Directores: JOSÉ MANUEL GÓMEZ SOBERÓN y BRYAN ERICK BARRAGÁN

Convocatoria: Octubre 2009

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo nació hace unos años cuando junto a Bryan Barragán propusimos la aplicación del HAC en componentes de edificación para una vivienda unifamiliar; luego continuó con la experiencia laboral en el LTE-UPC, es por ello que deseo agradecer en particular, a Bryan por su apoyo incondicional y al Laboratorio de Tecnología de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Catalunya por la oportunidad de colaborar laboralmente con los técnicos e investigadores de dicho centro.

Agradezco especialmente a mi director, Prof. José Manuel Gómez Soberón, la dirección conjunta de este trabajo de investigación, también el apoyo y toda su confianza, seguimiento y conocimientos dedicados para llevar a buen término mi PFC.

Agradezco al grupo de técnicos del LTE-UPC, en la figura de Tomás García, por sus conocimientos, sus valiosos consejos y asesorías en el manejo de los equipos de laboratorio y modelación numérica de los resultados experimentales.

También agradecer a la oficina de arquitectura “Barbera Arquitectos”, en la persona de Silvia Barbera Correia, por todos estos años de colaboración profesional.

Por último, agradecer de manera especial a mi familia la motivación que siempre me han dado para continuar con mi formación profesional.

DEDICADO A

Este trabajo está dedicado a Mariana y a mi hijo Facundo, porque ellos saben cuál ha sido el verdadero esfuerzo.

EPÍGRAFE

*Porque yo soy del tamaño de lo que veo,
Y no del tamaño de mi altura.
(Alberto Caeiro)*

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	I
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
A) PRESENTACIÓN	3
A.1) REFERENCIAS	3
A.2) FUENTE DE DATOS PARA LA INVESTIGACIÓN	3
A.3) ELABORACIONES DE INFORMES TÉCNICOS	4
B) INTRODUCCIÓN	4
C) NOTAS METODOLÓGICAS	5
CAPÍTULO I: BASE DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.1 OBJETIVOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN	9
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN	9
1.3 PROPUESTA DE LA ESTRUCTURA DEL TRABAJO	10
CAPÍTULO II: DESARROLLO Y SITUACIÓN ACTUAL DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE	11
2.1 INTRODUCCIÓN	13
2.2 RESEÑA HISTÓRICA DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE	14
2.3 GENERALIDADES Y ASPECTOS CUALITATIVOS DE LOS HAC	15
2.4 VENTAJAS ASOCIADAS AL USO DEL HAC	15
2.5 USOS Y APLICACIONES DE LOS HACS	17
2.5.1 APLICACIONES EN OBRAS CIVILES	17
2.5.2 APLICACIONES DE HORMIGONES ARQUITECTÓNICOS	22
2.5.3 OTROS CASOS DE APLICACIONES EN HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE	30
2.6 EL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS	31
2.6.1 ALGUNAS CONSIDERACIONES GENERALES	32
2.6.2 MECANISMO DE ACCIÓN DE LAS FIBRAS	33
2.7 DIFUSIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE FUTURO EN EL USO DEL HAC	34
CAPÍTULO III: PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE	37
3.1 MATERIALES Y COMPONENTES	39

3.1.1 LOS ÁRIDOS.....	40
3.1.2 FINOS UTILIZADOS COMO "FILLER"	40
3.1.3 LOS CEMENTOS	42
3.1.4 LOS ADITIVOS	43
3.1.5 LAS FIBRAS	45
3.1.6 LOS PIGMENTOS DE COLOR	47
3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS HAC EN ESTADO FRESCO	48
3.2.1 LA REOLOGÍA DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE	49
3.2.2 CAPACIDAD DE RELLENO	50
3.2.3 RESISTENCIA AL BLOQUEO	50
3.2.4 LA ESTABILIDAD	51
3.2.5 TIEMPO ABIERTO.....	52
3.2.6 ROBUSTEZ	53
3.2.7 DOSIFICACIONES	53
3.3 MÉTODOS DE ENSAYO PARA EVALUAR LA AUTOCOMPACTABILIDAD	55
3.3.1 CONSIDERACIONES GENERALES	55
3.3.2 ENSAYO DE ESCURRIMIENTO	56
3.3.3 ENSAYO DEL EMBUDO EN V	58
3.3.4 ENSAYO DE ESCURRIMIENTO CON ANILLO J	61
3.3.5 ENSAYO DE LA CAJA EN L	64
3.3.6 OTROS ENSAYOS UTILIZADOS EN LABORATORIO.....	66
3.3.7 CONTROL DE RECEPCIÓN EN LA OBRA	71
3.4 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO	73
3.4.1 RESISTENCIAS MECÁNICAS	73
3.4.2 MÓDULO DE DEFORMACIÓN	74
3.4.3 RETRACCIÓN	75
3.4.4 FLUENCIA.....	75
3.4.5 DURABILIDAD.....	76
CAPÍTULO IV: CAMPAÑA EXPERIMENTAL	79
4.1 HAC CON DIFERENTES TIPOS DE FILLERS	82
4.1.1 OPTIMIZACIÓN DE MEZCLAS, ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA Y DE DURABILIDAD.	82
4.1.2 MATERIALES Y PROGRAMA DE ENSAYOS.....	83
4.1.3 RESULTADOS	86
4.1.4 CONCLUSIÓN REFERENTE A LA CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE HACs CON DIFERENTES TIPOS DE FILLERS	90
4.2 FLUENCIA DEL HAC REFORZADO CON FIBRAS EN CONDICIÓN FISURADA ...	91
4.2.1 CONSIDERACIONES PRELIMINARES	91
4.2.2 MATERIALES Y PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO	93
4.2.3 PRE-ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN PARA HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS	94
4.2.4 ENSAYO A FLEXIÓN DE LARGA DURACIÓN.....	97
4.2.5 CONCLUSIONES PRELIMINARES REFERENTES AL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HACRF ...	101
4.3 TABIQUES PARA VIVIENDAS INDUSTRIALIZADAS HORMIGONADOS IN-SITU	102
4.3.1 CARACTERÍSTICA DE LOS PANELES	103
4.3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	106
4.3.3 ELECCIÓN DE MATERIALES Y MEZCLAS DE HAC	106
4.3.4 FABRICACIÓN DEL HAC.....	107
4.3.5 CONTROL DE RECEPCIÓN	108
4.3.6 FABRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS	108
4.3.7 MEDICIÓN DE PRESIONES SOBRE LOS ENCOFRADOS	110

4.3.8 MODELO Y ENSAYO DE PROBETAS	112
4.3.9 EVALUACIÓN DEL ACABADO SUPERFICIAL	112
4.3.10 CONCLUSIONES DE LA APLICACIÓN DEL HAC EN ELEMENTOS ESBELTOS	118
4.4 APLICACIÓN DE HAC EN LA CONSTRUCCIÓN DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR EN BARCELONA	119
4.4.1 ORGANIZACIÓN DE LOS TRABAJOS Y CAMPAÑA EXPERIMENTAL	119
4.4.2 DISEÑO Y JUSTIFICACIÓN DE LA VIVIENDA	119
4.4.3 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO PARA LOS COMPONENTES DE LA VIVIENDA	121
4.4.4 MUROS SÓTANO Y SOLERA DE HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE	122
4.4.5 CONCLUSIONES PRELIMINARES DE LA APLICACIÓN EN VIVIENDA	132
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN	135
A) CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO FINAL DE CARRERA	137
B) CONCLUSIONES ESPECÍFICAS DEL PROYECTO FINAL DE CARRERA	138
VOCABULARIO BÁSICO	143
BIBLIOGRAFÍA	151
ANEXOS	157

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. VISTA GENERAL DEL PUENTE (FCCCO.ES)	17
FIGURA 2. IMAGEN VIRTUAL DEL PUENTE EN LA EXPO 2008 (MARTÍNEZ Y SEGURA; 2008)	18
FIGURA 3. VISTA AÉREA DEL VIADUCTO Y DETALLE DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL.....	19
FIGURA 4. ENCOFRADO DEL HASTIAL (IZQ.) Y SECCIÓN TIPO DEL TÚNEL (DER.)	20
FIGURA 5. RELLENO PROGRESIVO DEL TÚNEL (MASÓ, 2008).....	21
FIGURA 6. VISTA DEL PUENTE DEL DRAGÓN (BLOGZHUQUE.COM)	22
FIGURA 7. DETALLE DEL SISTEMA DE HORMIGONADO (MASÓ, 2008)	23
FIGURA 8. VISTA EXTERIOR DE LOS EDIFICIOS DE LOS JUZGADOS (WWW.PANORAMIO.COM/PHOTO/18942338).....	24
FIGURA 9. PLAZA DE LA ENCARNACIÓN (GOOGLE EARTH 2009)	25
FIGURA 10. TORRE DE CRISTAL (2DA. IZQ.) (20MINUTOS.COM, 2008).....	26
FIGURA 11. TORRE DE CONTROL DEL AEROPUERTO DE BARCELONA (AENA)	26
FIGURA 12. VISTA INTERIOR DEL CLAUSTRO DE LA IGLESIA (WWW.PEDROPEGNAUTE.ES).....	27
FIGURA 13. CENTRO DAS ARTES (WWW.CLICARQ.COM)	28
FIGURA 14. DETALLE DE ENCOFRADO (BASF 2008).....	29
FIGURA 15. MURO HORMIGONADO CON HAC (BASF 2008).....	29
FIGURA 16. REFUERZO CON HAC DE LOS ARCOS DE UN PUENTE (VELASCO, 2008).....	31
FIGURA 17. DIAGRAMA DE FLEXOTRACCIÓN DE UN HRF Y FIBRA DE ACERO TÍPICA.....	33
FIGURA 18. ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN SEGÚN EN 14651, MECANISMO DE ACCIÓN DE LAS FIBRAS Y DETALLE DEL PLANO DE FISURACIÓN.	34
FIGURA 19. FILLER CALIZO.	41
FIGURA 20. RE-DOSIFICACIÓN DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE A PIE DE OBRA.....	43
FIGURA 21. FIBRAS DE ACERO (IZQ.) Y FIBRAS POLIMÉRICAS (DER.)	45
FIGURA 22. DETALLE DE DISTRIBUCIÓN DE LAS FIBRAS.....	46
FIGURA 23. PIGMENTOS DE COLOR (LÓPEZ ET AL., 2008)	48
FIGURA 24. REÓMETRO Y CURVAS DE FLUJO DE UN HAC, UN HORMIGÓN CONVENCIONAL (HC) Y UN HORMIGÓN FLUIDO DE ALTA RESISTENCIA (HAR) (ZERBINO, ET AL.; 2006).....	49
FIGURA 25. ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL HAC.	51
FIGURA 26. EJEMPLO DE ENSAYO DEL TUBO EN U (GOMES ET AL.; 2002)	52
FIGURA 27. MÉTODO DE DOSIFICACIÓN UPC (GETTU Y AGULLÓ; 2003)	54
FIGURA 28. ENSAYO DE ESCURRIMIENTO.	57
FIGURA 29. ENSAYO DE ESCURRIMIENTO	57
FIGURA 30. ENSAYO EMBUDO-V	60
FIGURA 31. ESQUEMA GRÁFICO DEL ANILLO J.....	62
FIGURA 32. PROCESO DE ENSAYO DEL ANILLO J.	63
FIGURA 33. CONCENTRACIÓN DE ÁRIDO, ENSAYO ANILLO J.	63
FIGURA 34. CAJA EN L.	64
FIGURA 35. CAJA EN U (IZQ.) Y VISTA INTERIOR (DER.).....	66
FIGURA 36. RECIPIENTE PARA EL ENSAYO DE HABILIDAD DE RELLENO.	68
FIGURA 37. VISTA GENERAL DEL TUBO-U	70
FIGURA 38. ÍNDICE VISUAL DE ESTABILIDAD.	71
FIGURA 39. ENSAYO DEL CONTROL DE RECEPCIÓN.	72
FIGURA 40. INSTRUMENTAL DE MEDICIÓN.	74
FIGURA 41. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO.....	75
FIGURA 42. MÉTODO DE TEÑIDO CON FENOLFALÉINA.....	77
FIGURA 43. ENSAYO DE ESCURRIMIENTO.	84
FIGURA 44. LLENADO DE PROBETAS DE LA ETAPA EXPERIMENTAL.	85
FIGURA 45. PROBETAS CON PUNTOS DEMEC Y MICRÓMETRO MECÁNICO.....	85
FIGURA 46. PROBETAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN.	86
FIGURA 47. ACABADO SUPERFICIAL DE LOS DIFERENTES HAC.	87
FIGURA 48. EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA EN EL TIEMPO DE PROBETAS ENSAYADAS EN LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.	88
FIGURA 49. EVOLUCIÓN DE LA RETRACCIÓN EN EL TIEMPO.	89
FIGURA 50. PERFILES DE CARBONATACIÓN DE LAS PROBETAS ENSAYADAS.	90
FIGURA 51. INCIDENCIA DE LAS FIBRAS EN EL COMPORTAMIENTO A FLEXOTRACCIÓN.....	92
FIGURA 52. TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO TIPO CLIP.....	95
FIGURA 53. PRE-ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN EN EL SISTEMA INSTRON.	96

FIGURA 54. RESPUESTA COMPLETA DEL ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN SEGÚN EN 14651 (A) Y RESPUESTA DEL ENSAYO INTERRUMPIDO A 1.0 MM, VIGA I (B) Y 0.5 MM, VIGA M (C)	97
FIGURA 55. VIGA ENTALLADA (IZQ.) Y LVDT (DER.)	98
FIGURA 56. ESQUEMA GENERAL DE LOS PÓRTICOS UTILIZADOS PARA EL ENSAYO A FLEXIÓN DE LARGA DURACIÓN.....	98
FIGURA 57. DISEÑO DEL PÓRTICO Y SITUACIÓN DE LAS VIGAS.	99
FIGURA 58. DETALLES DE LVDT Y CELDAS DE CARGA.	99
FIGURA 59. VARIACIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTE.	100
FIGURA 60. RESPUESTA APERTURA DE FISURA VS. TIEMPO DE PROBETAS SOMETIDAS A SOLICITACIONES DE FLEXIÓN CONSTANTE.	101
FIGURA 61. ASPECTO INTERIOR Y EXTERIOR DE LOS ENCOFRADOS.....	104
FIGURA 62. DIMENSIONES DE LOS TABIQUES HORMIGONADOS.....	105
FIGURA 63. AGUA CON ADITIVO INCORPORADO PREPARADA PARA SER INCORPORADA EN LABORATORIO A LA CUBA DEL CAMIÓN HORMIGONERA.	107
FIGURA 64. ASPECTO TÍPICO DEL ENSAYO DE ESCURRIMIENTO Y ESCURRIMIENTO CON ANILLO J (PANEL 2), EJECUCIÓN DEL ENSAYO DEL EMBUDO EN V	109
FIGURA 65. APLICACIÓN DEL HAC EN PANELES DE VIVIENDA, FASE EXPERIMENTAL.....	110
FIGURA 66. CELDA DE CARGA UTILIZADA PARA EL ENSAYO.....	110
FIGURA 67. ESQUEMA GENERAL DE LOS EQUIPOS E INSTRUMENTOS (IZQ.).....	111
FIGURA 68. EVOLUCIÓN DE LA FUERZA REGISTRADA POR LA CÉLULA DE CARGA	111
FIGURA 69. ASPECTO DE LOS PANELES DESPUÉS DE DESENCOFRAR.	113
FIGURA 70. EJEMPLO DE ALGUNOS DE LOS DEFECTOS IDENTIFICADOS.....	113
FIGURA 71. ACABADO SUPERFICIAL DE UN TABIQUE HORMIGONADO CON HAC.....	114
FIGURA 72. MAPEO DE LOS DEFECTOS DE SUPERFICIE EN PANELES	115
FIGURA 73. ASPECTO EXTERIOR DE LA VIVIENDA.	120
FIGURA 74. PLANTA Y DIMENSIONES DE LOS MUROS HORMIGONADOS.....	122
FIGURA 75. SISTEMA DE ENCOFRADO NO RECUPERABLE Y DETALLE DE LOS SENOS HORMIGONADOS CON HACRF.	123
FIGURA 76. ENSAYO DE ESCURRIMIENTO REALIZADO A PIE DE OBRA.....	125
FIGURA 77. FASE 1ª DEL HORMIGONADO DE LOS MUROS.....	126
FIGURA 78. ENCOFRADO DE LOS MUROS DE LA FASE 2ª.....	126
FIGURA 79. DETALLES DE LA PUESTA EN OBRA MEDIANTE CUBILOTE.....	127
FIGURA 80. PUESTA EN OBRA DEL HACRF EN LA SOLERA ESTUDIADA.....	128
FIGURA 81. ASPECTO SUPERFICIAL DEL HORMIGÓN EN MURO.	129
FIGURA 82. MUROS DE SÓTANO, VISTA DEL PLANO DE CORTE	130
FIGURA 83. EXTRACCIÓN DE TESTIGOS DE LOS MUROS CORTADOS.....	130
FIGURA 84. ASPECTO FINAL DE LOS MUROS HORMIGONADOS CON HAC.	133

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CRONOLOGÍA DEL HAC.....	14
TABLA 2. DOSIFICACIÓN DE UN HAC SEGÚN EHE.....	54
TABLA 3. ENSAYOS PARA MEDIR LAS PROPIEDADES DE AUTOCOMPACTABILIDAD DEL HAC.....	73
TABLA 4. MATERIALES Y COMPONENTES UTILIZADOS EN LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	84
TABLA 5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE AUTOCOMPACTABILIDAD.....	87
TABLA 6. PROPORCIONES Y RESULTADOS DEL ESTADO FRESCO DEL HACRF UTILIZADO EN LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	94
TABLA 7. VALORES MEDIOS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.....	97
TABLA 8. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LARGA DURACIÓN.....	100
TABLA 9. DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES EN PANELES PREFABRICADOS.....	107
TABLA 10. CARACTERÍSTICAS AUTOCOMPACTANTES DEL HORMIGÓN APLICADO EN TABIQUES.....	109
TABLA 11. CLASIFICACIÓN DE LOS DEFECTOS CUANTIFICADOS DE LOS PANELES EJECUTADOS (PACIOS Y BARRAGÁN; 2009).....	116
TABLA 12. TIPOS DE DEFECTOS DE UN HAC (PACIOS ET AL., 2008).....	117
TABLA 13. MATERIALES COMPONENTES UTILIZADOS EN LA VIVIENDA.....	123
TABLA 14. MEDIDAS DE AUTOCOMPACTABILIDAD DE LOS HORMIGONES UTILIZADOS EN OBRA.....	124
TABLA 15. ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 28 DÍAS.....	129
TABLA 16. RESULTADOS A COMPRESIÓN DE LOS TESTIGOS ENSAYADOS A 750 DÍAS.....	131

Resumen

El desarrollo y aplicación del hormigón autocompactante (HAC) constituye sin duda uno de los temas que suscita mayor interés en el campo de la tecnología del hormigón. Un HAC posee la capacidad de llenar el interior de los encofrados y pasar a través de las barras de armaduras, logrando la compactación por la acción de su propio peso sin presentar signos de segregación (Gettu y Agulló, 2003) Con este hormigón se elimina el trabajo de compactación con las reducciones en ruido y mano de obra que esto conlleva, y se obtiene una mejora en el tiempo y la facilidad de construcción, facilitando asimismo una mejor apariencia superficial y una mejora en las características en estado endurecido.

El presente trabajo de investigación describe las características, analiza los resultados de la fase experimental y finalmente, desarrolla la aplicación in situ del hormigón autocompactante en componentes de edificación para la ejecución de una obra en el ámbito de la ciudad de Barcelona. Abarcando desde la optimización de las mezclas y ensayos a escala real en laboratorio para los hormigones autocompactantes, hasta la aplicación final del material en muros de contención y forjados sanitarios, para este último caso, se ha desarrollado un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero.

En primer término se describen aplicaciones del HAC en España, luego se exponen los diferentes métodos de evaluación de la autocompactabilidad y se presentan, para los hormigones estudiados, las medidas de autocompactabilidad de los diferentes HACs, valores de resistencia y durabilidad a distintas edades, módulos de elasticidad y respuesta carga-apertura de fisura en flexotracción en el caso del HAC reforzado con fibras, etc.

En el caso práctico de aplicación en componentes de edificación se ha valorado, además de lo ya mencionado, la homogeneidad en altura a través de métodos destructivos de extracción de testigos y también se han realizado cortes en el muro en el sentido vertical y horizontal, lo que ha permitido verificar la distribución uniforme del árido grueso con la variación de la altura. Debido a que los muros sótano estaban concebidos en acabado visto, se ha llevado a cabo una evaluación cualitativa de las características del acabado superficial de los elementos.

Los resultados de la investigación se pueden resumir de la siguiente manera; se han analizado las características físicas y mecánicas de diferentes hormigones autocompactantes, para que de esta forma, presentar aquellos parámetros más significativos para su aplicación, para los métodos de su diseño y control, medidas cuantitativas y cualitativas sobre los incrementos de productividad, calidad de los acabados superficiales y recomendaciones pertinentes para su puesta en obra.

Palabras clave: hormigón autocompactante, hormigón autocompactante reforzado con fibras, hormigón autocompactante en edificación, fillers para hormigón autocompactante.

Abstract

The development and application of self-compact concrete (SCC) constitutes, without a doubt, one of the most interesting themes within the concrete technology subject. SCC has the capacity to fill the formwork and pass through the reinforcement bars, achieving its compaction by the action of its own weight, without segregation (Gettu and Agulló, 2003). Using this concrete, the compaction work is eliminated. Besides the reductions in noise and labor that these facts involve, the use of SCC increases productivity, i.e. by reducing construction time, allows an easier construction process, a better superficial appearance and facilitates the achievement of superior hardened state performance.

This work describes the characteristics, analyzes experimental test results, and finally develops an in situ application of self-compacting concrete for a building element of a residential construction in the city of Barcelona. The study covers all stages from the mix optimization and laboratory trials, to the real-scale SCC application; specifically, the cases of retaining walls and sanitary slabs. In this last case, a steel fiber reinforced SCC was developed and introduced on site.

Firstly, the work reviews SCC applications in Spain, followed by general overview of its component materials, mix characteristics and test methods for the fresh-state evaluation, together with the usual self-compactability measures and ranges. The evaluation of the hardened-state characteristics includes compressive strength, modulus of elasticity, shrinkage deformation, durability measures and load- crack opening response in flexural tension, in the case of fiber reinforced SCC.

Moreover, specific evaluations were carried out in the case of the application of SCC in building components; besides the previously mentioned properties, the homogeneity of the material along the height of the basement walls was measured through not destructive and destructive techniques, ultrasonic pulse velocity and core extraction, respectively. Also, cuts were performed along horizontal and vertical directions, allowing the verification of a uniform aggregate distribution in all directions. As the basement walls were conceived to be left uncovered (exposed concrete), a qualitative evaluation of the characteristics of the surface finish of these elements was carried out.

The results of the study could be summarized as follows; the physical and mechanical characteristics of SCC have been evaluated in order to provide significant parameters for the material application, its design and control. Also, qualitative and quantitative measures of productivity increments, quality of the surface finish, and recommendations, are provided, to contribute to the widening of the use of such a promising material.

Keywords: Self-compacting concrete, fiber reinforced self-compacting concrete, self-compacting concrete building construction, fillers for self-compacting concrete

A) PRESENTACIÓN

En este trabajo se presentan los resultados de una investigación sobre las características del hormigón autocompactante en estado fresco y endurecido, sus aplicaciones y los alcances obtenidos. La información aquí analizada ha sido obtenida a partir de trabajos experimentales que corresponden a programas desarrollados en el marco de diversos proyectos ejecutados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Catalunya (LTE-UPC), durante la etapa de colaboración del autor en dicho centro de investigación.

El periodo de datos que han sido utilizados para esta investigación, fue el comprendido entre los años 2006 y 2008; en los cuales el trabajo de laboratorio y en campo para la puesta en obra fue desarrollado.

El trabajo se presenta desarrollado en cuatro grandes capítulos o bloques; siendo el primero, el que explicará la base de esta investigación. A partir de segundo capítulo, se expone una reseña histórica del hormigón autocompactante, sus aspectos cualitativos y sus posibles usos y aplicaciones, las generalidades del material y sus aplicaciones más relevantes en el ámbito nacional. En el tercer capítulo, se presentarán las características en estado fresco y en estado endurecido, los métodos utilizados para la evaluación de la autocompactabilidad, etc. Por último, en el cuarto capítulo, se describen y analizan todas aquellas aplicaciones realizadas en laboratorio y en la aplicación in situ en una vivienda unifamiliar, de igual forma se presentan los resultados obtenidos en base a los apartados y criterios seleccionados. Siendo de esta forma, que al final de este capítulo, se presentan las conclusiones alcanzadas a partir de todo el trabajo.

Para finalizar, se ha incluido un vocabulario básico de la terminología empleada, así como anexos, que aportan información específica sobre las aplicaciones y la bibliografía temática referenciada.

A.1) Referencias

En la redacción de este trabajo el autor ha contado con la valiosa contribución y dirección del Profesor Dr. José Manuel Gómez Soberón y del Dr. Bryan Erick Barragán, en calidad de director y codirector del Proyecto Final de Carrera (PFC), respectivamente. El presente PFC, será sometido a defensa para la obtención de la titulación de Arquitectura Técnica de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

A.2) Fuente de datos para la investigación

Como se mencionara con anterioridad, la información experimental generada y analizada en este trabajo de investigación, tiene en su mayoría su origen en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción, de la Universidad Politécnica de Catalunya.

A. 3) Elaboraciones de informes técnicos

La realización de los trabajos de laboratorio ha estado a cargo del Dr. Bryan Barragán y del equipo técnico del LTE-UPC; de igual forma han participado los becarios adjuntos de este laboratorio. Por otra parte, en la realización de los trabajos de obra, ha participado personal de la empresa constructora Uscayo S.A, como director de obra el Sr. Enrique Rego Marful y como responsable del proyecto y la dirección facultativa, la arquitecta Silvia Barbera Correia de la oficina de arquitectura “Barbera Arquitectos”.

A. 4) Coordinación y dirección técnica de la investigación

Dr. Ingeniero, José Manuel Gómez Soberón y Dr. Ingeniero, Bryan Erick Barragán.

B) INTRODUCCIÓN

El presente Proyecto Final de Carrera, desarrollará una revisión de las distintas facetas del hormigón autocompactante y en lo concerniente a su comportamiento en estado fresco y endurecido, centrándose fundamentalmente en el diseño de estos hormigones y la evaluación de los resultados propios de su autocompactabilidad, con el fin de proponer y analizar una aplicación real de su puesta en obra mediante la documentación de un caso práctico real.

En lo referente al apartado final del Capítulo IV, la investigación ha sido posible gracias a la colaboración conjunta entre la oficina de arquitectura “Barbera Arquitectos” y el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Universidad Politécnica de Cataluña. De esta manera, la información obtenida y analizada durante el proceso de diseño y aplicación del hormigón autocompactante surge de la etapa de colaboración del autor entre ambas entidades.

Con el resultado final de la aplicación in situ, el trabajo se organizó en dos etapas; la primera comprende la campaña experimental, la optimización de las mezclas, los ensayos en estado fresco y endurecido a escala material y real, y el posterior análisis de los resultados que se realizó en el LTE como fase previa a la aplicación final. La segunda etapa, de carácter práctico, significó la aplicación in situ del material en muros de contención y en forjados sanitarios, para lo cual, se diseñó un hormigón autocompactante reforzado con fibras.

Es importante mencionar que parte de la documentación analizada y los ensayos realizados para esta investigación, han sido posibles gracias a la experiencia que el cuerpo docente y técnico del laboratorio posee en la temática del hormigón autocompactante. Lo anterior quiere decir que, la información utilizada permite confirmar su correcta validez, su elevada cobertura, y su gran interés en poder aproximar estos hormigones a la edificación.

La investigación se ha desarrollado a lo largo de los siguientes capítulos, que serán expuestos más adelante de forma detallada:

- Capítulo I: Base de la investigación.
- Capítulo II: Desarrollo y situación actual del hormigón autocompactante.
- Capítulo III: Propiedades y características del hormigón autocompactante.
- Capítulo IV: Campaña experimental.

Y por último, el Capítulo V, presenta las Conclusiones de la Investigación.

C) NOTAS METODOLÓGICAS

C.1) Definición del objetivo

Ámbito geográfico

El ámbito geográfico al cual se ciñe la investigación es el territorio de Barcelona, España.

Periodo de la investigación

El periodo de investigación que incluye este trabajo ha abarcado el ciclo comprendido entre los años 2006 al 2008, en los cuales se desarrollaron las etapas prácticas, y de puesta en obra de los muros de contención y forjado sanitario.

Unidad a investigar

Aplicación práctica en edificación de hormigones autocompactantes, mediante análisis de laboratorio y propuesta para edificación de viviendas.

CAPÍTULO I: BASE DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 OBJETIVOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN

El hormigón autocompactante se puede definir como aquel hormigón que es capaz de fluir en el interior del encofrado, rellenando de forma natural el volumen del mismo, pasando entre las barras de la armadura y consolidándose únicamente bajo la acción de su peso propio sin compactación interna o externa.

El diseño de estos hormigones, conlleva el desarrollo de planteamientos y técnicas de ensayo muy alejados de los usualmente utilizados para el hormigón convencional, y que suponen un cambio en el sector de la construcción respecto a los procesos de diseño y control utilizados de manera tradicional para el hormigón vibrado convencional.

Es por todo ello, que el objetivo principal de este Proyecto Final de Carrera, es el de desarrollar una revisión de los distintos aspectos que intervienen en la elaboración del hormigón autocompactante, centrándose fundamentalmente, en el diseño de estos hormigones y en la evaluación de los resultados propios que definen la autocompactabilidad. Asimismo atendiendo a sus propiedades físicas y mecánicas, con el fin de proponer y analizar una aplicación in situ real y su correspondiente documentación.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN

En el marco del proceso constructivo de obras de hormigón son numerosas las ventajas derivadas de la posibilidad de eliminar la compactación como etapa del proceso. Por lo cual, entre los objetivos específicos propuestos de este trabajo, podemos mencionar los siguientes:

- a) Revisión documental de la temática y ámbito de investigación.
- b) Propuesta documentada mediante pruebas de laboratorio de la optimización de una mezcla de hormigón autocompactante.
- c) Análisis de resultados de laboratorio, tanto de los resultados del comportamiento del hormigón autocompactante en estado fresco como endurecido.
- d) Indagar acerca de la respuesta bajo cargas de larga duración de un hormigón autocompactante reforzado con fibras.
- e) Análisis y aplicación de HAC con y sin fibras en tabiques de edificación industrializada hormigonados in situ.
- f) Práctica real de un caso documentado de aplicación de elementos estructurales en una vivienda mediante el uso de hormigón autocompactante.

1.3 PROPUESTA DE LA ESTRUCTURA DEL TRABAJO

A continuación, se presentan los diferentes capítulos que comprenden este estudio y las variables con las cuales fueron analizados cada uno de los mismos; esta subdivisión del trabajo, ha respondido a dos criterios diferenciados; por una parte responde a una secuencia lógica de actuación en el análisis de la investigación, y por otra, facilita al lector un orden y proceso de especificidad del conocimiento aportado.

Capítulo I:

El Capítulo I está reservado a la base de esta investigación, la descripción de los objetivos generales y específicos de la misma, y la estructura que constituyen el presente trabajo.

Capítulo II:

En el Capítulo II y en primer lugar, se recoge la reseña histórica del hormigón autocompactante, incluyendo sus principales características, sus aspectos cualitativos y sus posibles usos y aplicaciones; a continuación se explican las generalidades del material, las ventajas asociadas al uso del mismo y algunas de las aplicaciones prácticas más relevantes en el ámbito nacional.

Capítulo III:

En el Capítulo III se revisan los materiales componentes del hormigón autocompactante, incluyendo sus características y se recopilan los métodos de ensayo más utilizados para la evaluación de la autocompactabilidad en estado fresco. Junto a los ensayos se argumentan algunas observaciones útiles para su aplicación. Finalmente se describen las propiedades físicas, mecánicas y estructurales de los hormigones autocompactantes.

Capítulo IV:

En el Capítulo IV, se describen y analizan todos aquellos estudios realizados durante la campaña experimental. En primer lugar aquellas ejecutadas en el laboratorio; optimización de mezclas, ensayos en HAC reforzados con fibras y tabiques para viviendas industrializadas hormigonados in situ; y por último, la aplicación en obra para componentes de vivienda. En todos los casos se describe la motivación, la solución adoptada en cada caso y los materiales empleados, de igual forma se presentan los resultados obtenidos en base a los apartados y criterios seleccionados. Al final de este capítulo, se presentan las conclusiones preliminares alcanzadas en cada apartado.

Capítulo V:

En este apartado se recogen las principales conclusiones obtenidas en el presente trabajo.

Capítulo II: DESARROLLO Y SITUACIÓN ACTUAL DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

2.1 INTRODUCCIÓN

Se tiene constancia que desde la época antigua ya se utilizaba un material constructivo mineral que contaba con propiedades de fraguado; esto es, que poseía un cierto nivel de actividad hidráulica. Según el conocimiento documental actual, los primeros aglomerantes hidráulicos estaban compuestos de cal y puzolana, ambos con origen de un polvo volcánico. Así mismo, los romanos ya utilizaban materiales mezclados a los cuales se les conoce con el nombre de *opus caementicium*; como ejemplo de esta aplicación y de su uso, podríamos mencionar la obra, sin duda muy conocida, del Panteón o Templo de Agripa en Roma; su singular cúpula, está construida con una mezcla de hormigón ligero que sin duda cuenta con los anteriores componentes (Mambrini et al., 1998)

La anterior técnica de construcción romana se pierde tras la caída del imperio, dando paso a la incipiente y posterior técnica moderna del hormigón armado del siglo XIX. Los primeros cementos industriales comienzan a desarrollarse a principios del siglo XVIII, aunado a los cuales la inclusión con el acero supuso un avance cualitativo en el uso de lo que actualmente conocemos como hormigón armado. A finales del XIX y comienzo del siglo XX encontramos ejemplos de edificios construidos con hormigón armado a ambos lados del Atlántico.

La posibilidad a finales del siglo XIX de poder analizar en términos numéricos los esfuerzos y las tensiones a las que estaban sometidos los edificios construidos con estos materiales permitió un rápido desarrollo de la construcción en hormigón armado y su implantación en todo el planeta. Las nuevas posibilidades técnicas, su versatilidad, economía y disposición factible que ofrecía este material, provocaron y fueron origen de la inspiración y uso por parte de los ingenieros y arquitectos del siglo XX. Con la mundialización del uso y de las técnicas de aplicación del hormigón, la profundización en su estudio y aplicación se ha convertido en objetivo de múltiples investigaciones y estudios científicos. De igual forma, como consecuencia de esta especialización en el conocimiento, el método constructivo se extendió por el planeta.

A raíz de todo lo anterior, es necesario destacar las habilidades plásticas aplicadas en la utilización de hormigones por algunos arquitectos e ingenieros tales como Le Corbusier, Eduardo Torroja, Pier Luigi Nervi, Félix Candela, Louis Khan o Frank Lloyd Wright entre otros muchos, que integraron el uso del hormigón visto al diseño arquitectónico.

En el instante en que Le Corbusier anuncia en el año de 1924 la separación de la estructura resistente y del cerramiento gracias a las técnicas modernas del hormigón armado, no sólo está anunciando una innovación constructiva, sino que presenta la característica más innovadora de la arquitectura del Movimiento Moderno; para ser más precisos, de la arquitectura del siglo XX, dicha innovación constructiva, marcará un punto de inflexión en la conceptualización del espacio arquitectónico actual (Soriano, 1998)

Se podría así afirmar con toda veracidad, que el hormigón ha conseguido como ningún otro material constructivo, su uso habitual en toda la arquitectura y la ingeniería; sobre todo, atendiendo a sus propiedades de plasticidad, a su

posibilidad en la adaptación a la forma ideal y a su sentido estático. En resumen, a su correspondencia con la estética y funcionalidad adecuadas.

2.2 RESEÑA HISTÓRICA DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

Las primeras investigaciones en hormigón autocompactante (HAC) se realizaron en Japón. En 1986 el profesor Okamura de la Universidad de Tokio define inicialmente a este tipo de hormigones como “*High Performance Concrete*” para utilizar años más tarde el nombre por el cual lo conocemos hoy en día, Hormigón Autocompactante, “*Self Compacting Concrete*” (SCC) en inglés.

En 1988 el profesor Ozawa logra el primer prototipo de HAC. La comunidad científica internacional se hace eco de este nuevo tipo de hormigón, comenzándose a publicarse los primeros estudios que podemos resumir en la siguiente cronología:

	A nivel internacional:
1989	Primera publicación en la Conferencia de Ingeniería Estructural del Este de Asia y Pacífico.
1992	Presentación en el meeting del American Concrete Institute
1997	La Asociación Técnica Internacional (RILEM) forma un comité para estudiar el HAC.
1997	Inicio del proyecto “Brite Euram” dentro del programa Marco Europeo I+D.
2002	La Federación Europea de Fabricantes de Productos Especiales para Estructuras (EFNARC) publica una primera guía sobre el empleo del HAC.
2005	Grupo de Proyecto Europeo (GPE) de Hormigón Autocompactante, “The European Guidelines for Self Compacting Concrete. Specification, Production and Use”. BIMB, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO.
	A nivel español:
2006	En España, la Junta de Andalucía y la Consejería de Obras Públicas y Transportes, redacta los Pliegos de Especificaciones Técnicas Generales para Hormigones Autocompactantes.
2007	Se publican las primeras normas UNE para la evaluación de la autocompactabilidad.
2008	Se realiza en Valencia, el Primer Congreso Español de Hormigón Autocompactante organizado conjuntamente por las universidades UPC, UPM y UPV.
2008	Se publica en la Instrucción Española de Hormigón Estructural el Anejo 17, referente al hormigón autocompactante.

Tabla 1. Cronología del HAC.

Las primeras aplicaciones se utilizaron en el año 1992 para los bloques de anclaje del puente colgante Akashi Kaikyo, en donde se vertieron 250.000m³ y se redujo

el tiempo de obra en seis meses. En Japón para el año 2000 la producción del HAC se dividía entre la industria de prefabricados y hormigón preparado.

Actualmente en Europa se utiliza de manera mayoritaria en el sector de los prefabricados por sobre las aplicaciones in situ. Para la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE, 2008) esta diferencia se debe a que las ventajas del trabajo y la producción del HAC son más favorables en un entorno industrial. Si bien en España, para el año 2007 su aplicación no llegaba al 2% (Borralleras, 2008) en otros países de la Comunidad Europea para el año 2005 representaba el 20% de la producción del hormigón empleado.

Para dar un ejemplo, en USA representa el 75% del hormigón prefabricado y siendo aceptado su uso en carreteras y puentes. Asimismo, hoy en día podremos encontrar aplicaciones de este hormigón en países como Argentina o Brasil.

2.3 GENERALIDADES Y ASPECTOS CUALITATIVOS DE LOS HAC

El hormigón autocompactante es el avance más relevante en los últimos años en la tecnología del Hormigón (ACHE, 2008)

El hormigón autocompactante se define como un hormigón cuya principal característica es la capacidad de fluir y rellenar correctamente el interior del encofrado por la acción de su propio peso; es decir, sin ayuda de ningún método de compactación.

El desarrollo del hormigón autocompactante se basa en la mejor selección y control de los materiales componentes en el proceso de fabricación y, fundamentalmente, en la química de los aditivos.

Se ha ido incorporando, en primer lugar, en aquellas obras en las que la colocación del hormigón era más compleja y luego, poco a poco, en obras más comunes. El diseño, fabricación y puesta en obra del hormigón autocompactante requiere conocer en profundidad las características de los materiales componentes del hormigón y en especial los áridos en su parte más fina. Por otro lado, la compactabilidad entre componentes es fundamental, en particular entre el cemento y los productos químicos plastificantes.

2.4 VENTAJAS ASOCIADAS AL USO DEL HAC

Las ventajas de los hormigones autocompactantes en lo que respecta a la fluidez para la puesta en obra, la facilidad de construir las estructuras o las piezas con formas cada vez más complejas, la posibilidad de realizar armados de ferralla extremadamente densos, la ventaja de tener un resultado final sin depender del proceso de vibración o las ventajas desde el punto de vista de la seguridad en la puesta en obra y la repercusión en la salud de los trabajadores, son tan evidentes que se está extendiendo su uso de forma muy acelerada.

La ventajosa propiedad de autocompactabilidad se consigue mediante una formulación especial que le confiere la fluidez y cohesión adecuadas para evitar segregación de la mezcla, favorecer su movilidad y permitir así una compactación adecuada. La diferencia frente al hormigón convencional se basa en el empleo de aditivos superplastificantes, una mayor proporción de arena y cierta cantidad de finos, partículas inferiores a las 125 micras.

En el marco del proceso constructivo de obras de hormigón son numerosas las ventajas derivadas de la posibilidad de eliminar la compactación como etapa del proceso. Estas inciden, entre otros, en aspectos económicos (disminución de los costes de personal y equipos asociados a la compactación, reducción de plazos de ejecución), en aspectos medioambientales (eliminación de ruidos, tanto en plantas de prefabricación como en construcción in situ), en aspectos relativos a la seguridad y salud laboral (eliminación de riesgos de accidentes laborales imputables a la compactación) y en aspectos cualitativos en lo referente a las calidades de los acabados y al diseño de hormigón arquitectónico.

El HAC se emplea donde por requerimientos productivos o técnicos la ausencia de métodos de compactación sea una necesidad o una ventaja buscada, como por ejemplo obras o piezas con elevada densidad de armaduras, moldes complejos o zonas de difícil acceso y aplicación de vibradores. La elevada trabajabilidad que posee permite reducir de manera sustancial la mano de obra necesaria durante su colocación.

En estos momentos es posible diferenciar una serie de ventajas asociadas al uso de los hormigones autocompactantes, entre las cuales podemos señalar las siguientes:

- Reducción de la mano de obra y equipos necesarios.
- Asegurar la compactación independientemente de la capacidad de los operarios.
- Permite alta productividad y reducción de los plazos de ejecución.
- Posibilita y facilita el hormigonado de elementos densamente armados.
- Permite una mayor flexibilidad en la disposición de los puntos de hormigonado.
- Reduce la necesidad de mover frecuentemente las bombas y camiones.
- Reduce el ruido en la obra o planta de fabricación.
- Reduce los riesgos de trabajo.
- Permite una mayor flexibilidad en el diseño de elementos estructurales y su armadura, que serían difíciles o poco viables de construir mediante una vibración convencional.
- Mejora la calidad de los acabados.

El diseño de estos hormigones, asociado a la evaluación y validación de los requisitos de autocompactabilidad, conlleva el desarrollo de planteamientos y técnicas de ensayo muy alejados de los usualmente utilizados para el hormigón convencional, y que suponen un cambio de mentalidad en el sector respecto a los

procesos de diseño y control utilizados para el hormigón vibrado convencional (Gettu y Agulló; 2003)

2.5 USOS Y APLICACIONES DE LOS HACs

2.5.1 Aplicaciones en obras civiles

2.5.1.1 Puente de la Ronda de la Hispanidad

El relleno del arco del puente sobre el río Ebro en la ciudad de Zaragoza, construido en 2001, se considera la primera obra de hormigón autocompactante realizada en España.

La obra consistió en el relleno del arco parabólico del puente; dicho elemento, consta de tres partes, una central de 120 metros de luz y dos laterales de 92 metros cada una. El arco parabólico de 18 metros de alzada es de sección triangular variable y achaflanada en las esquinas.

El arco (Figura 1) se construyó con una chapa de acero de 60 mm de espesor relleno de hormigón autocompactante. La imposibilidad del vibrado en todas las zonas del arco fue decisiva para adoptar el HAC como solución definitiva. Se realizó el relleno sin la necesidad de aplicar vibración externa ni interna. Para su fabricación, se utilizó un hormigón HA-50/AC/12 y se aplicaron 300 m³ (ACHE, 2008)



Figura 1. Vista general del puente (FCCCO.es)

2.5.1.2 Puente del Milenio de la Expo Zaragoza 2008

El puente (Figura 2) tiene unas dimensiones de 270 m de longitud y 42 m de ancho. El tablero es de planta rectangular y está soportado por un arco central de 216 m de luz. Todos los elementos visibles de hormigón, se construyeron en hormigón blanco.

Para el arco, los capiteles y el tablero se utilizó un hormigón armado de resistencia de 60 y 70 MPa densamente armado. Esto sumado a la geometría de las piezas y al deseo de un acabado de calidad obligó el empleo del HAC. El ajuste del diseño de la mezcla se realizó mediante pruebas en obra a escala real. (Martínez y Segura; 2008)

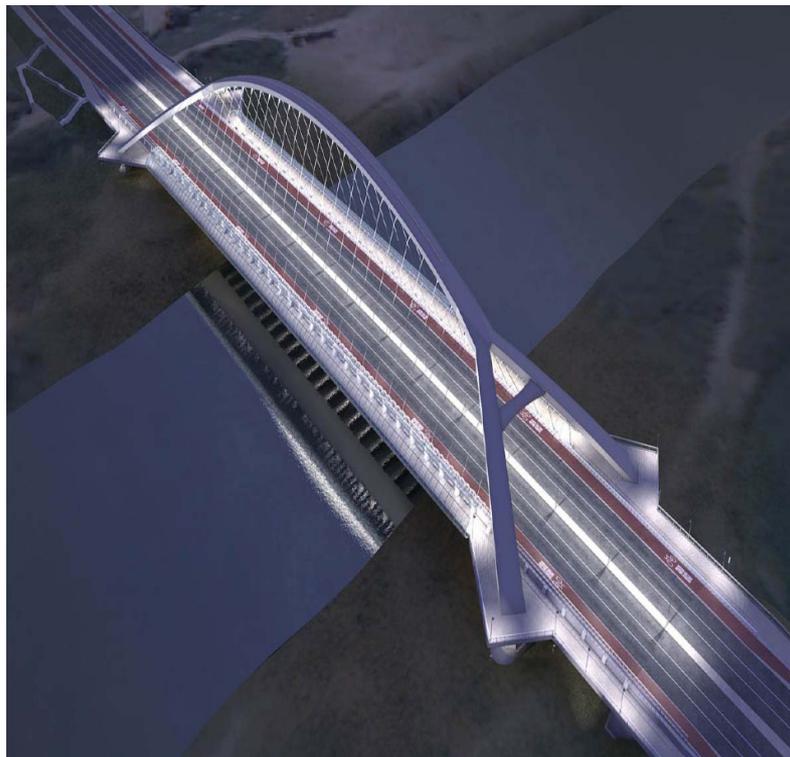


Figura 2. Imagen virtual del puente en la Expo 2008 (Martínez y Segura; 2008)

2.5.1.3 Viaducto de Navia (Asturias)

La estructura del viaducto tiene una longitud de 905 metros divididos en once tramos, de los cuales los dos centrales son de 160 m de luz cada uno y un ancho de 27 m. Los vanos principales están sostenidos por dos arcos mixtos. Cada arco atirantado tiene una altura de 35 metros y son de una estructura mixta compuesta por un cajón metálico de chapa de acero de 40 mm en la zona central y 60 mm en los arranques, relleno de 1000 m³ de hormigón autocompactante de resistencia característica de 45 MPa. El arco es de sección triangular de 3,5 x 2,5 metros.

Salvo en los tramos centrales, como se indica en la Figura 3, la estructura del tablero es una única viga continua de sección constante. En éstos, los vanos cuelgan de dos arcos mediante péndolas. En el arranque de los arcos las dovelas

están macizadas en HAC. Estos elementos sirvieron, además, para capacitar al personal en la fabricación, transporte y colocación del hormigón autocompactante antes de ejecutar los arcos (ACHE, 2008)

Las 425 dovelas prefabricadas se montaron por avance en voladizo con una cimbra autolanzable de 140 metros de longitud que avanzaba por encima del tablero. Los voladizos laterales que completan el ancho total del puente se hormigonaron mediante un carro que se trasladaba sobre las dovelas (Navarro y Puerta; 2008)

Para la construcción de los arcos metálicos se dividió en 11 secciones en las que se dejaron bocas de vertido para realizar el hormigonado. El tiempo de hormigonado de los arcos fue de 44 y 34 horas respectivamente.

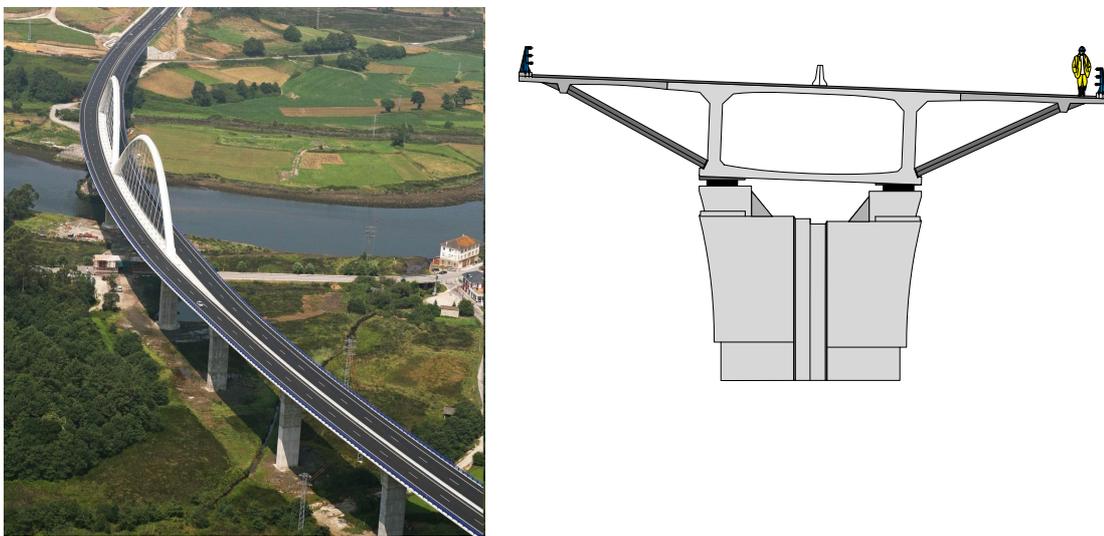


Figura 3. Vista aérea del viaducto y detalle de la sección transversal (Navarro, 2008)

2.5.1.4 Refuerzos en los Túneles del AVE en Montblanc

En el año 2002 las soleras de los túneles de Montblanc, en Tarragona, del tren de alta velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa, sufrieron una serie de levantamientos, debido a los empujes expansivos característicos en el terreno de esta zona.

Como solución se propuso un anillo de refuerzo densamente armado, unos 10.000 Kg de acero por metro lineal, que fuera capaz de soportar dichas presiones y colocado dentro de la sección existente. Para garantizar el completo llenado y debido a que la densidad de armado imposibilitaba la compactación externa por vibrado, se proyectó el empleo de hormigón autocompactante.

Se emplearon 124.000 m³ de un HAC de 80 MPa, con una resistencia inicial a las 24 horas de 12,5 MPa para poder cumplir con el ciclo encofrado-hormigonado-desencofrado de 24 horas, evitando la presión del HAC sobre los encofrados (Pintado y Barragán; 2008) En la Figura 4, se aprecia el encofrado metálico que

se utilizó y que se desplazaba sobre raíles. El hormigón se fabricó a un ritmo continuo desde las cuatro centrales ubicadas dentro de la propia obra.

En marzo de 2005, en los dos túneles de la línea de alta velocidad de Córdoba a Málaga aparecieron grandes caudales de agua de infiltración, el avance de las tuneladoras se vio seriamente afectado, lo que obligó a adoptar medidas correctoras inmediatas. El ADIF eligió la misma solución basada en la construcción de anillos de refuerzo con hormigones autocompactantes de alta resistencia (Hurtado, 2008).

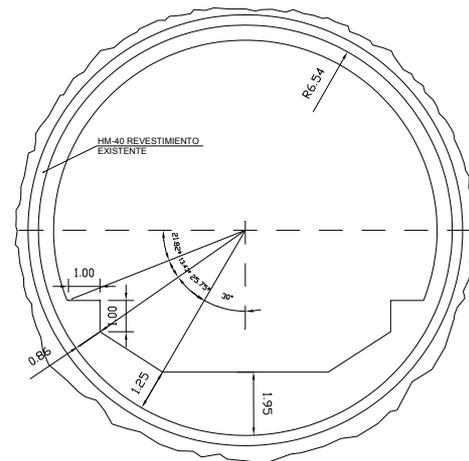


Figura 4. Encofrado del hastial (izq.) y sección tipo del túnel (der.)
(Pintado y Barragán; 2008)

2.5.1.5 Túnel del Carmel

En febrero de 2005 se colapsó el túnel en construcción de la línea 5 del metro, situado en el barrio del Carmel en Barcelona. La solución adoptada, debido a la necesidad de consolidar el terreno ante posibles hundimientos de los edificios vecinos, fue la de rellenar de manera urgente con hormigón.

La aplicación debía cumplir con tres requisitos fundamentales: en primer término la colocación debía emplear el mínimo tiempo; el material de relleno debía ser colocado desde la superficie ante el peligro de trabajar dentro de una galería colapsada; y por último; el relleno debía ser completo y efectivo para evitar nuevos hundimientos (ACHE, 2008) El hormigón autocompactante se vislumbró como la única solución a estos requisitos.

La longitud del túnel era de unos 145 m y se colocaron unos 15.000 m³ de HAC por medio de 7 taladros de perforación, 2 en la zona de derrumbe y 4 en superficie. La puesta en obra se realizó por bombeo y la fabricación se produjo en dos centrales hormigoneras externas.

Antes de comenzar los trabajos se procedió a realizar ensayos para asegurar que la solución fuese la correcta. Para ello, se eligió una zona de túnel de un ancho de 22 m., la bomba de hormigonado estaba situada a unos 60 m. del lugar y el transporte del hormigón se realizó mediante una tubería de 125 mm de diámetro y

con una caïda lliure aproximada de 5 m. Con los resultados satisfactorios se inició la puesta en obra a través de taladros a diferentes alturas (Figura 5), estos estaban separados unos 30 m. Ante la posibilidad de asentamientos del hormigón se inyectó, por último, un mortero autonivelante. La ejecución de la obra se realizó en 10 días (Masó, 2008)

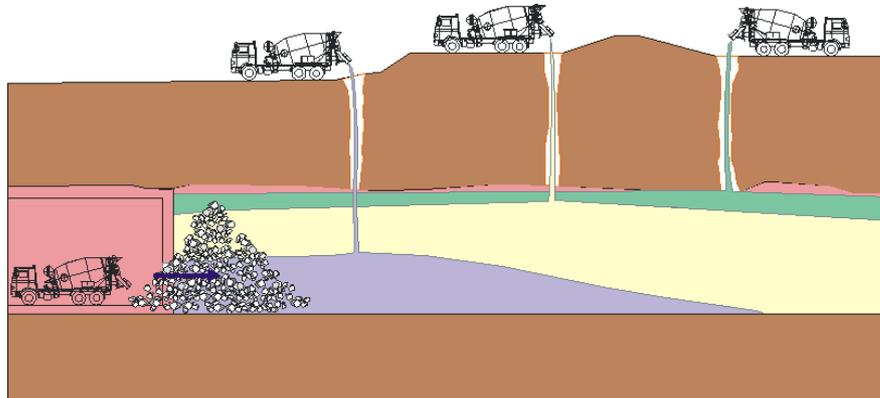


Figura 5. Relleno progresivo del túnel (Masó, 2008)

2.5.1.6 Losas de transición en la línea AVE

En la ciudad de Gelida, en el tramo de la línea del AVE entre Madrid y Barcelona, se hormigonaron losas de transición en algunos de los viaductos de la carretera que cruzan la vía del tren. Se suministró desde una central externa un HAC de resistencia 40 MPa fabricado con áridos y arenas calizas. La colocación se realizó a ritmo constante y directamente del camión sin ayuda de ningún operario. La reducción del plazo y costo de la puesta en obra hizo viable su aplicación.

2.5.1.7 Pasarelas peatonales en Madrid

La construcción en el año 2006 de las pilas, en donde se apoyan los cables de atirantado, de las pasarelas peatonales sobre la autopista R-3 y M-40, se realizaron con un hormigón autocompactante con la finalidad de lograr un óptimo acabado de la superficie del hormigón visto.

2.5.1.8 Pilas del puente en la ronda norte de Valencia

Se construyeron 6 pilas para el puente de la Ronda Norte de Valencia con un volumen de 50 m³ y una altura aproximada de 12 metros cada una. La decisión de colocar los 3000 m³ de HAC se tomó a raíz de la urgencia de los plazos de ejecución, de la necesidad de vertido al ritmo de cada pila en una sola puesta cada 6 días, del fuerte armado estructural que imposibilitaba el compactado y de la puesta en obra por bombeo (Rigueira y Serna; 2008)

Especial atención requirió la resistencia a presión de los encofrados, para ello se propuso hormigonar con una velocidad de vertido de 1,5 metros por hora que corresponden a los 6 m³ de capacidad de un camión, alcanzando una presión hidrostática admisible hasta el fraguado.

2.5.1.9 Puente del Dragón

El puente de hormigón autocompactante construido en la comunidad de Andalucía en el año 2007, tiene una longitud de 123 metros con dos arcos circulares de 43 metros de luz y dos medios arcos de 18,5 metros. La sección estructural está formada por una viga central con dos laterales de 3,5 metros más acerados de 2,5 metros y una parte central de 3 metros. Cuatro vanos apoyados en tres pilas y dos estribos, cimentados mediante 42 pilotes de 1,5 metros de diámetro y 20 metros de profundidad forman la estructura de este puente.

En la Figura 6, se observa que el puente representa el cuerpo de un dragón de unos 4 metros de altura y 2 metros de anchura construido mediante el uso de un hormigón autocompactante armado. La figura ha sido revestida de trencadís con 4.500 m² de mosaico de azulejo.



Figura 6. Vista del Puente del dragón (blogzhuque.com)

2.5.2 Aplicaciones de hormigones arquitectónicos

2.5.2.1 Edificio del Ayuntamiento de Mollet del Vallès

Es la primera aplicación en España del HAC en una estructura postensada. El edificio, de hormigón visto, es de planta cuadrada, la cuarta planta está formada por 8 jácenas; 4 jácenas perimetrales de hormigón armado de 30 m de longitud, 28 m de alzada y 40 cm de espesor, las 4 restantes son jácenas centrales postensadas de similares dimensiones.

La sección de las piezas, la densidad de las armaduras y la presencia de vainas para el postesado, todo esto sumado a las 20 horas de hormigonado ininterrumpido que evitaría la formación de juntas frías en el caso de un hormigón

convencional llevó a que la dirección de obra optara por un hormigón autocompactante.

Esta solución debía evitar los problemas acústicos del vibrado, reducir los plazos de ejecución y ofrecer las garantías de calidad en cuanto al llenado y los acabados.

Se emplearon en la aplicación 250 m³ de un HAC HP-35/AC/12 fabricado en central externa y de los que se controlaron la totalidad de los suministros. Como se puede apreciar en la Figura 7, se diseñó un sistema de hormigonado para el vertido, que evita la caída libre del hormigón, mediante una serie de aberturas en el encofrado a una altura de 1 y 2 metros respectivamente, que pudieran evitar la segregación al atravesar las densas armaduras y que se hubiera ocasionado si se vertía solo por la parte superior de las piezas. De las 20 horas estimadas en un principio, el tiempo de hormigonado se redujo a 6. A los tres días la resistencia mecánica era de 31 MPa (Masó, 2008)



Figura 7. Detalle del sistema de hormigonado (Masó, 2008)

2.5.2.2 Ciudad de la Justicia de Barcelona

Son ocho edificios ubicados en la ciudad de la Justicia de Barcelona, los que documentan el uso del HAC. Los edificios fueron diseñados con fachadas de hormigón visto estructural en diferentes colores (Figura 8) La fachada se concibe como una piel con aberturas verticales de una planta de altura. Entre cada módulo de ventanas se configura un entramado de pilares de 50x25 cm de sección y con una elevada cuantía de acero.

La superficie de los paramentos es de 16.000m², pero la elección del HAC se decidió por la densidad de las armaduras de los pilares. Los colores elegidos para los hormigones coloreados en su masa, y que representan cada uno de los edificios, son; verdes, grises, rojos, naranja, marrones, negro, amarillo y blancos.



Figura 8. Vista exterior de los edificios de los juzgados
(www.panoramio.com/photo/18942338)

2.5.2.3 Plaza de la Encarnación en Sevilla

El proyecto de 2007, pretende transformar la plaza de la Encarnación en una plaza abierta con parasoles de 30 metros de altura, mercado de abastos, museo arqueológico, restaurante, locales comerciales y terraza mirador a 24 metros de altura. Para ello, se propusieron una serie de pérgolas, que a modo de un gigante parasol, transformarán el enclave del centro histórico de Sevilla.

Seis pilares de hormigón autocompactante, caracterizados como “setas”, sustentan la estructura de madera de los parasoles. Para su aplicación se han utilizado unos encofrados trepantes que se han adaptado para el uso del HAC, ya que en un principio los pilares se concibieron en hormigón convencional, pero, debido a la densidad de las armaduras y al deseo de obtener acabados de calidad, se decidió cambiar la tipología del hormigón (Pous de la Flor, et. al.; 2008)

En la Figura 9 se puede observar, la situación urbana de la Plaza de la Encarnación, el emplazamiento de la propuesta y el detalle de dos “setas”.



Figura 9. Plaza de la Encarnación (Google Earth 2009)

2.5.2.4 Torre de Cristal en Madrid

La “Torre de Cristal” del arquitecto Cesar Pelli, es un edificio situado en la antigua ciudad deportiva del Real Madrid en Madrid, hoy llamada Cuatro Torres Business Area (Figura 10), con una planta de 100 x 75 m, una altura de 249 m y seis plantas sótanos. Su cimentación consiste en una retícula de pantallas que varían entre 1,20 m. y 0,60 m. de espesor y 20 m. de profundidad. Sobre las pantallas se coloca una losa de encepado con un canto de 1,50 m y un volumen de 2.500 m³.

La estructura del edificio se divide en tres elementos diferenciados, el núcleo central, los forjados interiores del núcleo y por último, los forjados exteriores.

Se colocó hormigón autocompactante de relleno bajo las placas de los pilares con una resistencia característica de 100 MPa y con unos espesores variables de entre 5 y 20 cm. En los pilares mixtos de los forjados exteriores se utilizó un HAC de 45 MPa con la particularidad que han sido bombeados hasta una altura de 250 metros.



Figura 10. Torre de Cristal (2da. izq.) (20minutos.com, 2008)

2.5.2.7 Torre de control del Aeropuerto de Barcelona

La nueva torre de control del Aeropuerto de Barcelona tiene una altura 62 metros (Figura 11). Diseñada por el arquitecto Bruce Fairbanks, la torre es un edificio circular formado por dos niveles, en el que el fuste está compuesto por una estructura de aluminio de forma octogonal y se apoya en unos pilares de sección irregular prefabricados de hormigón autocompactante blanco. Debido a la proximidad al mar y la necesidad de incrementar la durabilidad del material, con la aplicación del HAC es posible lograr un acabado de calidad sin coqueras ni nidos de grava con una permeabilidad muy baja.



Figura 11. Torre de control del aeropuerto de Barcelona (AENA)

2.5.2.8 Iglesia de San Jorge en Navarra

Los requisitos de acabado fueron determinantes para la utilización del HAC. La totalidad de los muros exteriores para el hormigón visto fueron construidos mediante un sistema de encofrados de tablas de madera (Figura 12) colocadas formando un relieve.



Figura 12. Vista interior del claustro de la iglesia (www.pedropegenaute.es)

2.5.2.9 Centro das Artes, A Coruña

Dadas las especiales exigencias de acabado superficial, compacidad y relleno correcto del encofrado en zonas altamente armadas, en las que se haría casi imposible introducir un vibrador para compactar un hormigón convencional se utilizó un HAC.

Se trata de una estructura mixta de acero y muros de hormigón visto con acabado superficial de tablas de madera de líneas muy regulares. El tipo de hormigón empleado ha sido un HA-25 con un acabado de calidad que permitiese dibujar en su superficie las vetas de la madera, minimizase las juntas y permitiese hormigonar tramos de elevada longitud a cuatro metros de altura, además de cumplir con su misión estructural rellenando zonas de alta densidad de armado.

Para la colocación del hormigón se dispuso un sistema de bombeo de hormigón desde la base de los encofrados que permitió eliminar los defectos producidos por el aire atrapado durante el vertido. Este sistema es utilizado por primera vez en Galicia en esta obra, siendo también una de las primeras aplicaciones en España. (ACHE, 2008)



Figura 13. Centro das Artes (www.clicarq.com)

2.5.2.10 Centro de Arte y Cultura Contemporánea en Santa Cruz de Tenerife

Una de los aspectos más destacables de la construcción del edificio es la ejecución y acabado de sus muros, que como se muestra en la Figura 15, son de una estructura de muros pixelados de hormigón visto, coloreado y abujardado, que pretende imitar la tonalidad del material volcánico característico de la zona.

Los muros pixelados consisten en muros de hormigón con aperturas a modo de ventana, de formas y distribuciones no repetitivas y complejas. Estos muros con píxeles se construyen a partir del montaje en el molde del negativo de las aperturas (píxeles), además del armado correspondiente. Dada estas especiales características, se le requiere al hormigón aplicado una alta *capacidad de relleno* para transmitir las distintas formas de cada píxel.

Para ofrecer el aspecto arquitectónico deseado, la terminación de estos muros vistos presenta varias exigencias, aparte de las relativas a las propiedades mecánicas: por un lado, el acabado alrededor de los píxeles debe ser perfecto y por lo tanto el hormigón debe ser capaz de rellenar toda esta complejidad de formas y armaduras (Figura 14) sin sufrir bloqueo del árido grueso, que originaría nidos de grava que alterarían la regularidad del acabado abujardado. Por otro lado, en el acabado del muro no pueden aparecer coqueras ni zonas de mal relleno que distorsionarían su acabado.

El hormigón autocompactante se ejecuta por vertido directo del cubilote, en una primera fase, se hormigona la parte baja del muro a través de unas aberturas donde se han acoplado canaletas para la conducción del hormigón vertido. La

parte superior se hormigona por vertido directo desde la parte más alta del muro (BASF, 2008)



Figura 14. Detalle de encofrado (BASF 2008)



Figura 15. Muro hormigonado con HAC (BASF 2008)

2.5.2.11 Viviendas plurifamiliares en Barcelona

La motivación para realizar esta edificación convencional con un hormigón del tipo autocompactante fue la de conseguir rellenar los encofrados con la mayor rapidez posible sin necesidad de vibrado, y alcanzar unos buenos acabados del hormigón

visto del mismo. La obra en cuestión se trata de un edificio de 97 viviendas de protección oficial que se empezó a construir en el mes de abril del 2008 y se suministraron casi 1500 m³ de HAC para la ejecución de aproximadamente 6000 m² de forjados y unos 2500 m² de muros.

2.5.3 Otros casos de aplicaciones en hormigón autocompactante

A los anteriores ejemplos de aplicación del hormigón autocompactante debemos sumar otras realizaciones, como por ejemplo, la construcción de una viga de 10 metros de longitud bajo el Canal de Aragón y a la cual no se podía acceder para su hormigonado por lo que se confió la aplicación del HAC desde un extremo, llenado completamente la pieza y saliendo por el extremo opuesto. Otro ejemplo de aplicación es el realizado para la rehabilitación de viviendas en Madrid, en este caso se debían reforzar unas cimentaciones a las que se podía acceder para su hormigonado a través de canaletas desde la calle hasta la planta subterránea.

Por mencionar otras aplicaciones, diremos que otra aplicación documentada se realizó en una vivienda unifamiliar en Menorca, ésta estaba construida en hormigón blanco autocompactante ya que se exigía una óptima calidad en los acabados. En el caso de la reparación del colector el Barranco de Alamín, la sección a hormigonar era de 22 cm, la dificultad de acceso y la reducida sección con una elevada densidad de armado imposibilitaba la utilización de un hormigón convencional.

Sin duda, las prestaciones del hormigón autocompactante fueron indispensables para hormigonar el paso inferior bajo las vías del tren en Roda de Bará (Tarragona), las pantallas de 10 metros de altura se hormigonaron desde un solo punto de vertido cubriendo una distancia de 27 metros sin presentar disgregación, bloqueo o pérdida de cohesión. Además en los túneles de la Línea 9 de Hospitalet y en el Puerto de Badalona.

Las aplicaciones del HAC en elementos prefabricados, entre otros casos, permitió la construcción de dovelas prefabricadas en el viaducto de Huera, Almería, con una longitud entre vanos intermedios estableciendo un record en las dimensiones de este tipo de infraestructura en España (ACHE, 2008).



Figura 16. Refuerzo con HAC de los arcos de un puente (Velasco, 2008)

Recientemente se realizaron aplicaciones de micro hormigón autocompactante en el refuerzo de los arcos para la rehabilitación estructural del puente sobre el río Lumbar en la A-4, provincia de Jaén (Figura 16), el motivo de esta aplicación fue el dotar de mayor durabilidad al conjunto de elementos de la estructura del mismo, pudiendo así ser eliminadas las restricciones al tráfico de vehículos pesados (Velasco, 2008)

Una de las infraestructuras en donde el uso del hormigón autocompactante se ha acentuado es en la fabricación de los viaductos, entre otros por ejemplo, el Viaducto de Ríomayor en Asturias, de Santiurde en Cantabria, de Marín, Mazmela, Zarimutz y Uztarreta en Guipúzcoa.

2.6 EL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS

Los beneficios que brindan las fibras al hormigón reduciendo su fragilidad, otorgando capacidad resistente residual, controlando el desarrollo de la fisuración y aumentando la tenacidad, han sido documentados a lo largo de los últimos años (Zerbino, 2000; Barragán, 2002; Tobes, 2007). Las fibras actúan interceptando las fisuras y retardando así su propagación, si hay suficiente cantidad y están uniformemente distribuidas evitan la unión de las microfisuras aumentando la resistencia aparente de la *matriz del hormigón*. Por otra parte también, disminuyen el ancho de las fisuras lo cual es muy favorable para la durabilidad del hormigón en términos generales.

Además de disminuir la fragilidad del hormigón, también se las utiliza en el control de la fisuración por retracción, para aumentar la resistencia ante el impacto y la fatiga, y para aumentar la resistencia al fuego en hormigones de alta resistencia. En función del uso que la fibra deba prestar, se elige la fibra más adecuada en cuanto a su dimensión, su geometría y el material del que está fabricada.

Aunque las fibras de acero han sido las más utilizadas para reforzar el hormigón, como se especificará en el próximo capítulo, existen distintos tipos de fibras que se diferencian en función de su naturaleza y de sus dimensiones.

2.6.1 Algunas consideraciones generales

La incorporación de fibras cortas dispersas en la *matriz del hormigón*, confiere al material una mayor capacidad para controlar el desarrollo de la fisuración con beneficios directos en las propiedades del estado endurecido (Barragán y Zerbino, 2002)

Entre las aplicaciones tradicionales del hormigón reforzado con fibras (HRF), se destaca el uso en revestimientos de túneles, la fabricación de elementos premoldeados y la construcción o reparación de pavimentos o tableros de puentes, a las que se suma la utilización de fibras sintéticas para el control de la fisuración por contracción plástica.

El empleo de HRF a nivel estructural es más limitado, sin embargo, se reconoce que es posible sustituir o combinar las barras de armaduras transversales con el refuerzo de fibras, con el fin de mejorar la capacidad de resistencia a cortante y lograr un comportamiento más dúctil. Beneficioso en elementos estructurales de sección delgada en donde la colocación de estribos puede resultar poco práctico.

En la Figura 17 se visualiza, por una parte, el diagrama resultante de un ensayo a flexotracción y, por otra, el aspecto característico de una fibra de acero tipo "hooked end" de 50 mm de longitud. Además, en el diagrama se observa la diferencia entre la curva de resistencia a flexotracción de un hormigón convencional (HN) y un hormigón reforzado con fibras (HRF) Como resultado, se puede determinar que una pieza de hormigón reforzado con fibras podrá resistir una carga aplicada hasta mayores flechas o aperturas de fisura.

En un principio la mayoría de las aplicaciones se realizaron empleando fibras de acero, pero más recientemente han aparecido en el mercado fibras sintéticas estructurales que pueden competir con las primeras, y en los últimos años se han podido obtener hormigones autocompactantes reforzados con fibras (HACRF)

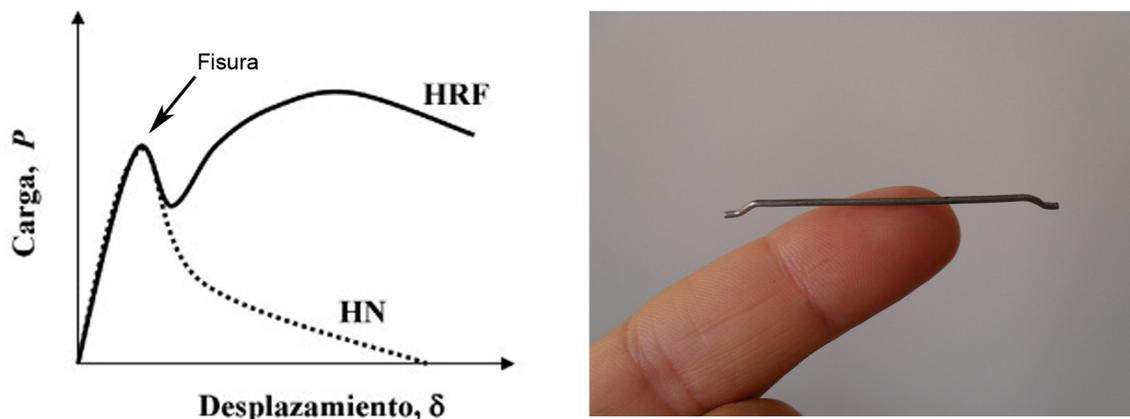


Figura 17. Diagrama de flexotracción de un HRF y fibra de acero típica.

Según trabajos especializados en el tema (Zerbino et al., 2000, Tobes et al, 2007) las fibras poseen la facultad de provocar un aumento de la resistencia residual luego de una primera fisura respecto de un hormigón convencional. También se ha demostrado un aumento de la *deformabilidad* en los hormigones reforzados con fibras, o lo que es lo mismo, una mayor ductilidad e integridad durante el proceso de rotura.

En el caso de hormigones reforzados con fibras de acero, se experimenta una capacidad portante durante el régimen de post-pico (comportamiento posterior a la fisuración), adquiriendo relevancia, por ejemplo, en pavimentos o refuerzos estructurales, aplicaciones donde se evidencia un significativo uso del hormigón reforzado con fibras.

Dependiendo de las características de las fibras (material, dimensiones, forma) y de la dosis incorporada, se pueden conseguir resistencias residuales en amplio rango; aunque normalmente las fibras deben aportar resistencias residuales iniciales del orden del 40% de la carga de fisuración para ser considerada su contribución estructural, elevados contenidos de fibras pueden redundar en resistencias residuales muy superiores a la carga de fisuración del hormigón. Un ejemplo en este sentido son los hormigones de ultra altas prestaciones ($f_c > 150$ MPa), donde contenidos de fibras de acero por encima de 100 kg/m^3 permiten obtener resistencias a flexotracción del orden de 30 MPa.

Más adelante, en el capítulo IV de este trabajo, se describen las investigaciones realizadas por el autor durante la campaña experimental en el LTE-UPC con el objetivo de indagar acerca de la respuesta bajo cargas de larga duración de un HACRF previamente fisurado.

2.6.2 Mecanismo de acción de las fibras

La resistencia residual a tracción en un HRF es una acción conjunta entre la resistencia de la *matriz* y la de las fibras que atraviesan las fisuras. La adherencia

entre las fibras y la *matriz* posee varios componentes: a) la adhesión física y química entre ambas, b) la resistencia friccional, c) el componente mecánico asociado con la geometría de la fibra, y d) la trabazón (o *interlock* en inglés) entre sí de las fibras.

Si se toma como ejemplo una fisura originada en una viga sometida a flexión (ver Figura 18), en las cercanías de la fisura se pueden distinguir tres sectores. En primer lugar la zona de compresión, seguido de una zona de tracción sin fisuración, y por último, la zona fisurada. A su vez la zona fisurada puede ser representada por tres subzonas; una zona de trabazón de agregados, debida a la *microfisuración de la matriz* que se inicia con la falla en la adherencia entre la *matriz* y las fibras, la zona de puenteo de la fisura, donde la fibras se encuentran parcialmente desprendidas de la matriz y por último la zona de “tracción libre” donde las fibras están totalmente desprendidas de la matriz (Torrijos, 2008)

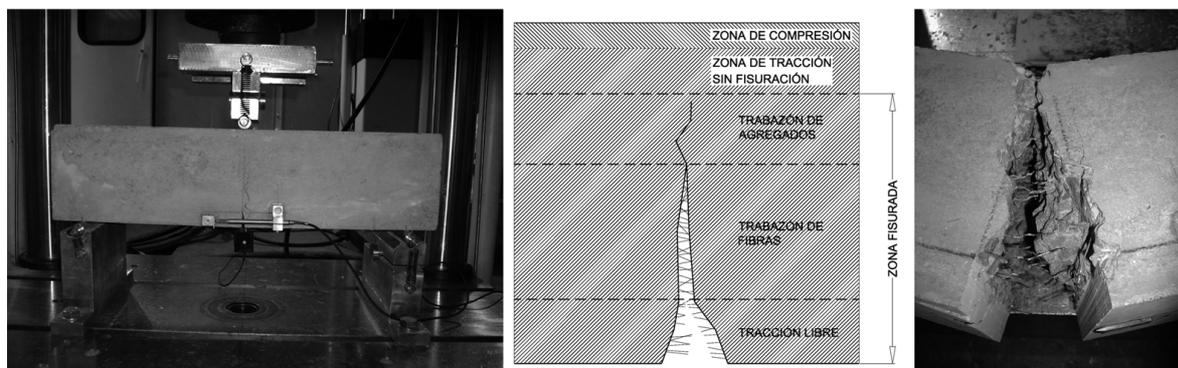


Figura 18. Ensayo de flexotracción según EN 14651, mecanismo de acción de las fibras y detalle del plano de fisuración.

En la mayoría de los casos las fibras son arrancadas, en lugar de romperse, una vez que perdieron la adherencia con la matriz. Por lo tanto, cuanto más largas sean las fibras mayor será la capacidad de resistir las fuerzas de arrancamiento.

Existe un límite en la relación de aspecto entre la longitud y el diámetro de las fibras que está asociado con el mezclado (a menor relación de aspecto mayor trabajabilidad), la distribución de las fibras y que su incorporación sea económicamente competente. El tipo de fibra, la composición de la mezcla, el proceso de mezclado y la técnica de compactación utilizada, determinan el máximo contenido de fibras que es posible incorporar en el hormigón.

En España el mayor campo de aplicación de hormigones reforzados con fibras corresponde al hormigón proyectado y a pavimentos.

2.7 DIFUSIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE FUTURO EN EL USO DEL HAC

Como se ha comentado con anterioridad, en el sector del hormigón colocado in situ se han realizado numerosas obras donde los requisitos técnicos o de diseño

han hecho del HAC una alternativa favorable, sin embargo en España el empleo predominante de este material es en el sector de la industria del prefabricado.

Pese a ello, diversos autores coinciden en que dos de las propiedades características de la autocompactabilidad; la facilidad de puesta en obra y la uniformidad del acabado superficial, harán que este material adquiera más protagonismo en la construcción.

La primera, impulsa a unir las prestaciones específicas de determinados hormigones, como por ejemplo, de alta resistencia, reforzados con fibras, o con áridos reciclados, a la autocompactabilidad.

La segunda de las propiedades, debido a que el hormigón autocompactante no necesita vibrado durante su proceso de puesta en obra, permite una superficie más uniforme. En este sentido la utilización de pigmentos para colorear el hormigón hace que el HAC sea adecuado para obtener hormigones arquitectónicos. La posibilidad de llenar los encofrados desde abajo facilitando la salida del aire atrapado entre el encofrado y la masa del hormigón; y la capacidad de llenar encofrados de formas geométricas complejas, hacen que el hormigón autocompactante sea especialmente adecuado para obtener superficies vistas con diferentes texturas, coloridos y uniformidad; propias del hormigón arquitectónico (ACHE, 2008)

En cuanto al uso del HAC puede influir en la disminución del impacto ambiental de la construcción. En primer lugar y al igual que un hormigón convencional, puede ser fabricado con productos obtenidos de reciclado. Además, y como se describirá más adelante, los finos minerales adicionales necesarios para alcanzar el volumen necesario de pasta para conseguir la autocompactabilidad, se pueden conseguir a partir del uso de subproductos sin necesidad de aumentar el contenido de cemento, por ejemplo, lodos de corte de mármol, finos subproductos del machaqueo de áridos, cenizas volantes, etc.

Por otra parte, al eliminar los equipos de compactación, el uso del HAC puede contribuir a una reducción en el consumo de energía y permitir alargar la vida útil de los encofrados.

El aumento de durabilidad de las estructuras construidas con HAC ofrece importantes ventajas medioambientales, retrasando la necesidad de intervenciones de mantenimiento y reparación y alargando la vida útil de las construcciones (ACHE; 2008)

De las ventajas asociadas a la eliminación de la compactación resultantes del uso del HAC, también debemos agregar la mejora en el entorno de trabajo y la reducción de accidentes laborales derivados de la disminución del ruido y la eliminación de equipos eléctricos.

Capítulo III: PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

3.1 MATERIALES Y COMPONENTES

La mayoría de los componentes utilizados en la fabricación del hormigón autocompactante son los que también se usan para la fabricación de los hormigones llamados “convencionales”. El cemento y los áridos (a excepción del *Tamaño Máximo de los Áridos*, TMA) no requieren el tener que cumplir requisitos específicos adicionales; pero sin embargo, debe cuidarse la calidad de los mismos de la misma forma que se exigen para hormigones convencionales de buena calidad.

Los únicos componentes atípicos de los hormigones autocompactantes en relación a los hormigones convencionales son los materiales llamados minerales finos (*filler*) y los agentes modificadores de la viscosidad (AMV), que se utilizan para conseguir un nivel adecuado de cohesión en la mezcla, para evitar la *segregación*, y para evitar la *exudación* durante la colocación del hormigón.

Según las principales recomendaciones nacionales e internacionales (EHE, 2007; EPG, 2005) para la dosificación de un HAC es necesario proveer a la mezcla de un mayor contenido de pasta (agua + material granular con tamaño de partícula $< 125 \mu\text{m}$ + aditivos químicos) que permita reducir la fricción entre partículas, lo que se conoce con el nombre de “efecto lubricante”, y así conseguir la capacidad de fluir del material. En sus principios, esta mayor cantidad de pasta se conseguía en base a un aumento del contenido de cemento, lo que redundaba en HACs de altos niveles resistentes, muchas veces innecesarios para la aplicación a la que el material iba dirigido y con los mismos problemas que el hormigón convencional asociados al elevado contenido de cemento; por ejemplo, fisuración por retracción térmica, elevada retracción endógena, etc.

Otra vía para conseguir HAC sin altos contenidos de cemento y sin hacer uso de fillers, es mediante el empleo de nuevos aditivos químicos modificadores de la viscosidad (Magarotto y Roncero, 2008), que permiten dotar a las mezclas de HAC de una mayor cohesión y, por tanto, de una mayor *resistencia a la segregación*.

La habilidad del HAC de poder pasar a través de zonas de alto contenido de armaduras viene regida principalmente por el volumen del mortero y por la proporción de los áridos gruesos presentes en la mezcla. Asimismo, los materiales finos mantienen la cohesión de la mezcla evitando la segregación y, de igual forma, arrastrando las partículas de mayor tamaño; esto es lo que se conoce como “poniendo al hormigón en movimiento” (ACHE, 2008)

Por otra parte, es necesario decir, que los aditivos químicos son un componente más de los HAC que tienen una función fundamental dentro de su comportamiento; sin su incorporación, no sería posible la elaboración de los hormigones autocompactantes, puesto que gracias a los aditivos *superplastificantes* del tipo *policarboxilato*, se nos permite el poder ser capaces de reducir el contenido de agua presente en la pasta de estos hormigones.

A continuación, se presentarán de forma individualizada los componentes que deben ser considerados para la fabricación de un HAC; subdividiéndolos en: los

áridos, el filler mineral, el cemento y los aditivos. Luego, se presentarán conceptos básicos de los hormigones autocompactantes especiales, tales como los que utilizan refuerzo mediante el uso de fibras o a los cuales se les pigmenta para su uso como hormigones con color en masa.

3.1.1 Los áridos

El hormigón autocompactante presentan un comportamiento diferenciador de los hormigones convencionales por su comportamiento en el estado fresco, por lo cual, la distribución de los tamaños de sus partículas (en específico de los áridos) influye en sus propiedades y en este estado de consistencia.

Los áridos que usualmente son utilizados en la fabricación de los hormigones convencionales tienen igual aplicación para ser usados en los HAC; por lo que como en todos los hormigones de buena calidad, es preferible el emplear arenas y gravas limpias con granulometrías continuas y sin lajas.

El TMA grueso recomendado por la Instrucción del Hormigón Armado Español (EHE, 2008) es de 25 mm, aunque en la práctica no suele sobrepasar de los 20 mm en los casos específicos de un HAC, siendo usuales tamaños máximos comprendidos entre 12 y 16 mm. La anterior limitación se establece como límite para poder obtener mayor uniformidad en el movimiento y menor riesgo de bloqueo en el flujo de estos hormigones. Lo anterior se explica por el hecho de que una reducción en la proporción de las partículas gruesas, implica que aumente la distancia entre ellas en la mezcla, y por tanto, se reduce la probabilidad del bloqueo.

Desde un punto de vista medioambiental, existen investigaciones publicadas en las que se ha conseguido con éxito hormigones autocompactantes, en los cuales, se han logrado incorporar *áridos extremos* con deficiencias en su forma; así como con porcentajes de absorción de agua variable (Santana Rodríguez; Tobes et al.; 2008)

3.1.2 Finos utilizados como “filler”

Por razones de económicas en el diseño de los hormigones convencionales se intenta reducir al máximo el volumen de áridos finos y aumentar la proporción de partículas de mayor tamaño. Sin embargo, y como se expuso con anterioridad, en los HAC estas partículas finas son las que generan las características de la autocompactabilidad de estos hormigones. A estas partículas finas se las ha denominado como “filler” (partículas con tamaño $\leq 0,063$ mm). En España, como uso de material filler, se utiliza el polvo derivado del machaqueo de la rocas calizas; siendo este material, el que más se utiliza para la fabricación de HAC (Pajares et al.; 2008)

Son distintos los tipos de finos “filler” utilizados en los HAC con el objetivo principal de aportar, la apropiada cohesión y el incremento en el volumen de la pasta, que den la trabajabilidad necesaria para evitar la *segregación* de los áridos gruesos y evitar la *exudación* del agua durante la colocación del hormigón. Por lo cual, la selección del filler debe ser cuidadosa, ya que de sus características

dependerá el deseado comportamiento en estado fresco de los HAC. Por otra parte, la finura del filler incide de forma desfavorable sobre la no deseada demanda de agua o de aditivos superplastificantes. En la Figura 19 se aprecia el aspecto visual, en este caso, del filler calizo.



Figura 19. Filler calizo.

Debido a la forma en que se obtiene, prácticamente de residuo, es habitual que el filler calizo presente una importante variabilidad de sus características físicas y mineralógicas, lo que inevitablemente producirá variaciones en las características reológicas del HAC, exigiendo los correspondientes ajustes a la dosificación, con las pérdidas de tiempo y desviaciones que ello implica.

La especificación de la EHE recomienda que la cantidad máxima de finos menores a un tamaño de 0,063 mm deba ser de 250 kg/m³, la anterior cifra resulta de sumar la cantidad de finos procedentes de los propios áridos finos y gruesos más la cantidad añadida del propio filler.

Se podría mencionar como variantes de posibles materiales aplicables como filler al polvo calizo ya comentado y de igual forma al polvo de cuarzo; otros materiales posibles de aplicar con la tesitura de material filler podrían ser por ejemplo, el *humo de sílice*, la *escoria granulada* y las *cenizas volantes*, que reciben el tratamiento de adiciones, pero que poseen el mismo efecto que se busca al incorporar el filler.

Las posibles actuaciones de los antes mencionados materiales tipos filler, pueden ser clasificadas de la siguiente forma:

- a. Aumentando la capacidad de retención del agua de la mezcla provocado por su elevada *superficie específica*, lo anterior se produce cuando se incorporan finos como las llamadas *bentonitas*, *humo de sílice condensado* y materiales fibrosos como el *asbesto molido*.
- b. Aumentando en la *tixotropía de la mezcla*, esto quiere decir la capacidad de recuperar fluidez al aplicarle energía. El anterior efecto se produce entre los finos como las *cenizas volantes*, la *cal hidratada*, el *caolín*, las *diatomeas* y otros *materiales puzolánicos calcinados*, así como con los *polvos de rocas*.

Además de ayudar a conseguir la cohesión necesaria en el HAC, los finos filler permiten al mismo tiempo reducir el contenido de cemento en la propia pasta, evitando los problemas relacionados con el exceso de *calor de hidratación* y con el efecto mecánico de la *retracción*.

Otro aspecto a considerar es que, si bien el diseño de estos hormigones requieren de este elevado contenido de finos que hace incidir en el aumento en el coste del hormigón autocompactante; existen estudios recientes que aplican adición de residuos (Baronetto, et al.; 2008) de bajo coste y con procedencia de procesos de trituración de rocas que poseen un elevado porcentaje de finos, permitiendo así la posibilidad de ser utilizados como filler en el hormigón autocompactante sin presentar una desventaja económica.

Para conferir un mayor valor añadido al HAC desde la vertiente medioambiental, en investigaciones realizadas en Japón, se han utilizado como filler el polvo obtenido de la trituración de hormigón de demolición. Por otra parte, es necesario comentar, que el desarrollo de hormigones con incorporación de residuos industriales, por ejemplo el lodo de corte de mármol, está contribuyendo a la reducción del uso de los recursos no renovables.

La incorporación de estos materiales finos para la producción de hormigones es económicamente rentable si se toma en cuenta su menor valor de comercialización, siendo de esta forma tecnológicamente más ventajosa. Su uso general, contribuiría a lograr un ambiente sustentable y saludable, dado que se disminuiría la degradación del medio ambiente (Baronetto, et al.; 2008)

Más adelante, se detalla la experiencia realizada en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Politécnica de Cataluña en la optimización de mezclas de hormigón autocompactante, y sus características físico-mecánicas analizadas, para lo cual, se han empleando dos tipos diferentes de filler.

3.1.3 Los cementos

No existen requisitos específicos en cuanto el tipo de cemento a utilizar en la aplicación de HAC, siendo habitual el utilizar aquellos que cumplan con la vigente Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-03) Los criterios de elección, en cuanto a la tipología de cemento a utilizar, son similares para obtener un hormigón convencional (bajo calor de hidratación, resistente a los sulfatos, etc.), en general, se suelen utilizar los cementos *CEM I 42,5* y *I 52,5*; con *evoluciones de resistencia* normal o rápida, dependiendo de las necesidades estructurales impuestas en cada aplicación o uso. Es necesario decir, que los cementos sin adición emplean menos cantidad de aditivo que los cementos que sí incluyen adiciones, o los que cuentan con un fraguado rápido.

Por otra parte, en la literatura técnica sobre el HAC existen referencias sobre el uso de varios cementos no convencionales, y que se han dado su origen por la idoneidad de sus características especiales. Uno de ellos es el *cemento con alto contenido de velita* (40-70%), que provoca menor calor de hidratación y mayores resistencias a largo plazo. El empleo de este tipo de cemento podría ser útil en

elementos masivos, donde un hormigón con un alto contenido de cemento convencional puede inducir fisuraciones por efectos térmicos.

3.1.4 Los aditivos

Son componentes fundamentales porque sin su incorporación no es posible la fabricación de los HAC. En este caso, clasificaremos los aditivos aplicables a los HAC en dos tipologías con características diferentes: los *aditivos superplastificantes* (SP) de capacidad reductora de agua, duración de la autocompactabilidad en el tiempo, resistencias a edades tempranas y posibilidad en el retraso del tiempo de fraguado; y los *aditivos moduladores de la viscosidad* (AMV), que mejoran la estabilidad del hormigón frente a la *segregación* y *exudación*, en especial cuando el contenido de finos no es excesivamente alto.

3.1.4.1 Aditivos Superplastificantes (SP)

Los *aditivos superplastificantes* son uno de los componentes básicos del HAC, aportan la factibilidad de una alta fluidez de la pasta del cemento y mejoran la trabajabilidad del hormigón durante las primeras horas del amasado.

Los superplastificantes suelen definirse como aditivos químicos que permiten mantener una adecuada trabajabilidad del hormigón en el estado fresco con bajas relaciones de agua/cemento durante un periodo de tiempo razonable; dicho procedimiento no afecta al comportamiento del curado y del endurecimiento de los mismos.



Figura 20. Re-dosificación de aditivo superplastificante a pie de obra.

La dosificación del aditivo superplastificante se realiza en obra, lo que permite finalmente adecuar las características de autocompactabilidad en función del hormigón que llega de planta. Por ejemplo en la

Figura 20 se observa el color característico del superplastificante, en este caso del tipo Glenium C303. En la imagen se muestra la re-dosificación realizada en la cuba de un camión hormigonera.

La utilización de aditivos superplastificantes de última generación, ha revolucionado la tecnología del hormigón, debido fundamentalmente a que proporcionan una alta trabajabilidad manteniendo una baja relación agua-cemento; ya que por una parte, inducen una disminución del contenido de agua del hormigón de hasta el 40%, lo que produce una reducción de la su porosidad y un incremento consecuente de sus propiedades mecánicas y durables.

Asimismo, estos aditivos producen una mejora en términos de trabajabilidad y de las *propiedades reológicas de los hormigones*, lo que posibilita la puesta en obra en zonas de difícil acceso y un mejor recubrimiento de las armaduras.

Por otra parte, el uso excedente de aditivos superplastificantes, pueden generar problemas relacionados con la pérdida de fluidez, tiempos de fraguados no controlados, segregaciones del hormigón, etc.; ocasionando en su mayoría problemas de compatibilidad entre el cemento y el propio aditivo (Alonso, et al.; 2008)

3.1.4.2 Los agentes modificadores de la viscosidad (AMV)

Los *agentes modificadores de la viscosidad* son aditivos químicos que mejoran sustancialmente la cohesión del hormigón y, por tanto, limitan la pérdida de agua por *exudación* y minimizan la tendencia a la *segregación del hormigón*. Desde el punto de vista reológico, estos aditivos inducen en el hormigón una viscosidad moderada-alta junto con un *comportamiento pseudoplástico*, es decir, su *viscosidad plástica* disminuye al aumentar el gradiente de velocidad aplicado. Lo anterior da lugar a un hormigón con una elevada estabilidad (es decir, mínima tendencia a la *segregación* y *exudación*). Su empleo junto con superplastificantes de última generación permite obtener hormigones estables a pesar de tener una gran fluidez y, por tanto, gran facilidad de mezclado, bombeo y colocación (Gettu y Agulló; 2003)

Sin embargo, su empleo no siempre es imprescindible para obtener un hormigón autocompactante; puesto que únicamente se requerirán, en el caso en que los finos por sí solos no sean capaces de aportar suficiente cohesión a la mezcla. Aunque, si se tiene en cuenta que el uso de AMVs permite que el hormigón sea menos sensible a pequeños cambios del contenido de agua, del módulo de finura de la arena y de la dosis de superplastificante, su empleo puede contribuir a homogeneizar la calidad de estos hormigones y facilitar su producción. Además, la presencia del AMV en el hormigón minimiza el riesgo de *segregación* al aumentar accidentalmente el contenido de agua o por la caída libre del hormigón a una altura excesiva; así mismo por exceso de vibración durante el proceso del hormigonado.

La clave para obtener un hormigón caracterizado por una alta cohesión y con propiedades autocompactantes radica en la correcta optimización de la composición de la pasta de cemento en general, y de la combinación agua-

superplastificante-AMV en particular. La incorporación de AMV afecta negativamente a la fluidez del hormigón y, por tanto, para obtener una determinada trabajabilidad se deberá incrementar la cantidad de agua o de la dosis de superplastificante (Gettu y Agulló; 2003)

3.1.5 Las fibras

Las fibras son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan en la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades (Figura 21). Según el Anejo 14 de la Instrucción EHE, los hormigones reforzados con fibras (HRF), se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas y aleatoriamente distribuidas en su masa. En la actualidad, el mercado ofrece tres tipos de fibras, y que se recogen en la EHE, según su naturaleza:

- Fibras de acero (UNE-EN 14889-1)
- Fibras poliméricas (UNE-EN 14889-2)
- Otras fibras inorgánicas

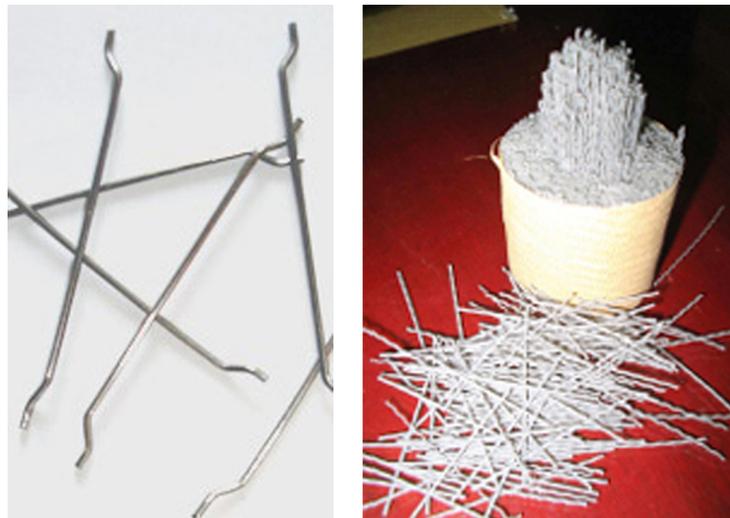


Figura 21. Fibras de acero (izq.) y fibras poliméricas (der.)

Según el proceso de fabricación, las fibras de acero se clasifican, entre otras, en trefiladas, cortadas en láminas, virutas de acero o fibras de acero fundidas. La forma tiene una incidencia importante en la adherencia del hormigón por lo que este tipo de fibras pueden variar en la forma y en el diámetro. La longitud es de 6 a 60 mm, recomendándose que la longitud sea de 2 veces del tamaño del árido máximo.

Las fibras del tipo sintéticas son las poliméricas y según el proceso constructivo se clasifican en monofilamentos extruidos y láminas fibriladas, con un diámetro que varía entre <0,30 mm (microfibras) y >0,30 mm (macrofibras)

Otro aspecto a considerar es que las fibras pueden actuar dentro de la pasta del hormigón de dos modos diferentes, por un lado de manera estructural y por otro, no estructural. Las primeras, y de manera general, son las que aportan mayor energía de rotura al hormigón en masa y, que según el caso, pueden sustituir de

manera parcial o total la armadura convencional, contribuyendo en los cálculos de los estados límites últimos o de servicio, proporcionando una mayor resistencia pos-fisuración, control de fisuración, aumento de tenacidad, resistencia al corte y lograr un comportamiento más dúctil que resulta de interés en elementos estructurales de alma delgada.

Las fibras no estructurales son aquellas que sin considerar en el cálculo su resistencia pos-fisuración, mejoran determinadas propiedades, como por ejemplo, el control de la fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión o impacto.

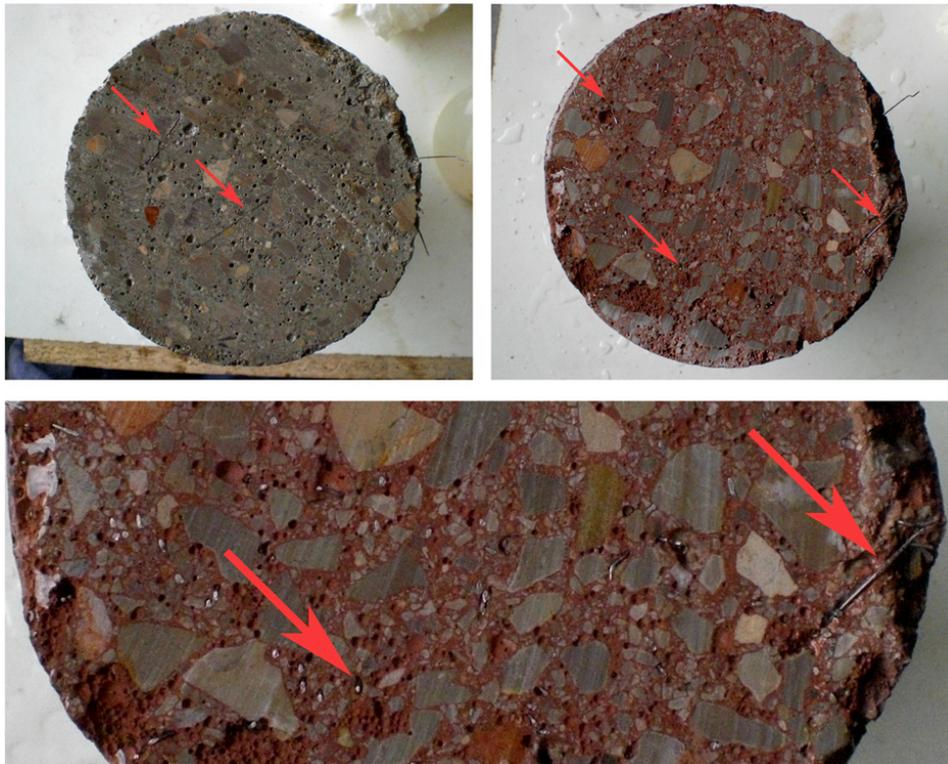


Figura 22. Detalle de distribución de las fibras.

En la Figura 22, se puede apreciar el aspecto de las fibras de acero tipo “hooked end” incorporadas en un hormigón sin y con pigmento de color. En este caso en particular, se trata de probetas cilíndricas de 150x300 mm que han sido aserradas para evaluar la distribución uniforme de los áridos y las fibras.

Las fibras se incorporan al hormigón con el fin de controlar los procesos de fisuración en estado fresco o endurecido. En estado fresco actuarán controlando la fisuración por retracción plástica, y, en estado endurecido, debido a su distribución espacial, las fibras son capaces de absorber las tensiones de tracción, controlando el desarrollo de la fisuración.

Como se dijo anteriormente, la forma tiene una incidencia importante en las características adherentes de la fibra con el hormigón existiendo de geometría recta, ondulada, corrugada, conformada en extremos con diferente forma, etc. Normalmente en la elaboración de hormigones reforzados con fibras es usual el

empleo de longitudes de 2,5 a 3 veces el tamaño máximo de árido, y para el bombeo se exige que la longitud de la fibra sea menor a 2/3 partes del diámetro del tubo, pero la longitud debe ser lo suficiente para dar adherencia y evitar que sean arrancadas con facilidad. Cuanto más fina es la fibra, menor es el distanciamiento entre ellas, siendo más eficiente y permitiendo una mejor redistribución de la carga o los esfuerzos.

Sin embargo, para la utilización de hormigones autocompactantes reforzados con fibras, debe considerarse que la incorporación de fibras trae aparejada la disminución en la *capacidad de relleno* y de la resistencia al bloqueo. Si bien la EHE no especifica el contenido mínimo en fibras, se recomienda que en el caso de ser de acero con función estructural, su contenido no sea inferior a 20 kg/m³ de hormigón, restringiéndose el contenido en 1,5 % en volumen del hormigón.

De todas maneras, los beneficios que brindan las fibras al hormigón reduciendo su fragilidad, otorgando capacidad resistente residual y controlando el desarrollo de la fisuración adquieren relevancia en el diseño y predicción de respuesta de los elementos estructurales.

Si bien el tema aquí tratado escapa a los objetivos específicos de este Proyecto Final de Carrera, en el capítulo IV se describen los trabajos realizados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC, para el estudio de la respuesta de los hormigones autocompactantes reforzados con fibras sometidos a cargas de larga duración y la aplicación de un HACRF en un forjado sanitario en el que se eliminó completamente el armado convencional.

3.1.6 Los pigmentos de color

La incorporación de color al HAC abre nuevas alternativas de aplicación arquitectónica. El Hormigón Autocompactante Coloreado (HACC) combina las ventajas de mayor fluidez y capacidad de llenado con los aportes estéticos del hormigón de color y en algunos casos resultan opciones satisfactorias para lograr la integración del edificio con el medio.

Entre los agentes colorantes que se utilizan se destacan los pigmentos sintéticos. En la Figura 23 se visualiza distintas pruebas de HACC, entre otros, óxidos de hierro de color amarillo (A), rojo (R) y negro (N), otro tipo de pigmento negro (negro de humo Nh) y pigmentos verde (V) y azul (ftalocianina cúprica, Az).

Las características de los materiales componentes del hormigón son determinantes en el color final, por ejemplo, cuanto más hierro contenga el clinker más grises serán los cementos. Los cambios en el tipo de cemento (gris, blanco) y la incorporación de agentes colorantes influyen en distinto grado sobre las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido. En morteros elaborados con pigmentos amarillo y rojo, se observa una rápida disminución de la fluidez a medida que se incrementaba la proporción de pigmento.



Figura 23. Pigmentos de color (López et al., 2008)

En relación a la influencia de los pigmentos en HAC, si bien son pocas las investigaciones sobre el tema, algunos estudios muestran que su uso permite reducir el contenido de filler calcáreo. En mediciones de los parámetros reológicos sobre HACC los resultados evidencian un aumento de la viscosidad al incorporar de pigmentos (López et al., 2008)

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS HAC EN ESTADO FRESCO

Como hemos anunciado con anterioridad, el hormigón autocompactante se diferencia del convencional principalmente por su comportamiento en el estado fresco. En este ámbito, son tres las propiedades primordiales, y de manera simultánea, que se deben cumplir o satisfacer:

1. **Capacidad de fluir** y llenar el encofrado sin energía de vibración o ayuda externa.
2. **Resistencia al bloqueo**, es decir, capacidad de pasar entre las barras del armado.
3. **Resistencia a la segregación** o estabilidad dinámica y estática, que significa lograr una distribución uniforme del árido en toda su masa.

Las tres anteriores propiedades básicas, se evalúan por medio del estudio de los parámetros reológicos del hormigón o a través de métodos ingenieriles sencillos y simples. A continuación, se detallan las características de los hormigones autocompactantes en estado fresco.

3.2.1 La reología del hormigón autocompactante

La reología estudia la deformación y flujo de los materiales, enlazando las relaciones entre el esfuerzo aplicado, las deformaciones sufridas o presentadas y el tiempo de actuación de ambas.

Los estudios reológicos han permitido comprender el comportamiento del HAC y de ese modo han contribuido a un diseño más racional como nuevo hormigón. En términos reológicos, un HAC se caracteriza por poseer *tensión umbral* (τ_0) muy baja (resistencia inicial que hay que vencer para poner en movimiento el hormigón), y una *viscosidad plástica* (μ), es decir una resistencia a fluir una vez que el flujo a comenzado, capaz de garantizar el transporte, llenado y posterior endurecimiento del material sin segregación (Zerbino, et al; 2008)

El comportamiento reológico se representa por medio de un diagrama denominado, "*curva de flujo*" (Figura 24) en donde la *tensión umbral* se representa en el eje de las ordenadas, y la velocidad de deformación, en el eje de las abscisas.

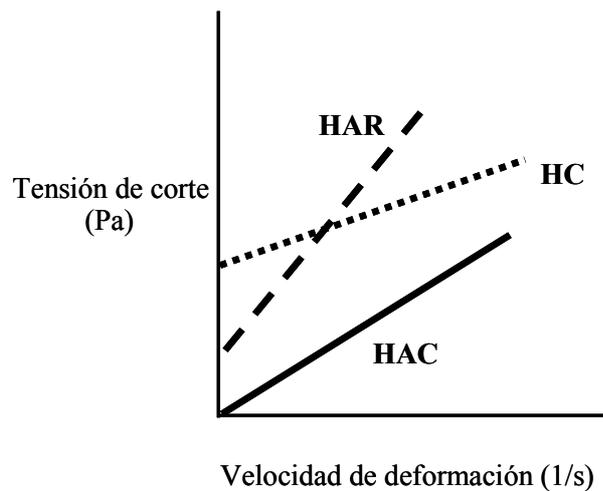


Figura 24. Reómetro y curvas de flujo de un HAC, un hormigón convencional (HC) y un hormigón fluido de alta resistencia (HAR) (Zerbino, et al.; 2006)

Como se desprende de la definición, las propiedades en estado fresco son determinantes en un HAC pues de ellas depende la calidad final de los elementos estructurales; la fluidez, la *capacidad de paso* y la resistencia a la segregación, que para este tipo de hormigones son todas ellas fundamentales; pero sin embargo, en términos general las dos primeras propiedades son contradictorias u oponentes a la última.

Un HAC requiere una adecuada combinación entre la *tensión umbral* y la *viscosidad plástica* para lograr movilidad sin riesgos de segregación; en mezclas muy viscosas se requiere una *tensión umbral* prácticamente nula, mientras que en un HAC de baja viscosidad es conveniente que dicho parámetro se vea aumentado. Una combinación donde ambos parámetros (τ_0 y μ) fuesen extremadamente bajos, podría implicar riesgos de segregación en un hormigón (Zerbino, op. cit.)

Si bien el tema aquí tratado escapa al objeto principal de este Trabajo Final de Carrera (TFC), y como ya se ha demostrado en otros estudios afines al tema, se hace necesario tan solo el mencionar que los cambios en la composición de un hormigón modificarán su respuesta en términos reológicos. En este sentido, el contenido del agua afecta la *viscosidad plástica* y la resistencia al flujo; ésto es, a mayor contenido de agua ambos parámetros se reducirán en términos significativos.

Los aditivos reductores de agua, y en especial los superplastificantes, reducen ligeramente la *viscosidad plástica*, pero disminuyen en gran medida la resistencia al flujo. De igual forma, también influye en este comportamiento el tipo de cemento utilizado y las adiciones minerales anexionadas.

Por otra parte, para el mismo conjunto de materiales existen además otros factores que modifican la respuesta reológica; entre ellos, se debe destacar el propio paso del tiempo y los cambios de la temperatura. Los dos anteriores factores, poseen una gran importancia desde el punto de vista de las aplicaciones; puesto que las condiciones ambientales podrían contribuir a la variabilidad en las propias propiedades y a afectar la calidad durante la producción del mismo HAC.

Para terminar, diremos que de acuerdo con las características del elemento a hormigonar, se recomiendan diferentes clases de HAC; que en la práctica se definen en base a ensayos de tipo ingenieril como el ensayo de *escurrimiento*, *escurrimiento con anillo J*, *embudo en V* o la *caja en L*.

3.2.2 Capacidad de relleno

Como *capacidad de relleno*, se entiende a la capacidad que tienen los hormigones autocompactantes de fluir y rellenar un molde o encofrado sin ayuda externa y sin que queden coqueas o nidos de grava. Esta capacidad de fluir o de relleno de un hormigón, se evalúa por medio de los llamados “*ensayo de escurrimiento*” y el “*ensayo del embudo en V*”.

3.2.3 Resistencia al bloqueo

La *capacidad de paso*, o también llamada *resistencia al bloqueo*, es la característica de un hormigón autocompactante de pasar entre las barras de la armadura, obstáculo o huecos sin producirse bloqueo por parte de los áridos gruesos.

Los ensayos para evaluar la *resistencia al bloqueo*, se evalúa por medio del “*ensayo de la caja en L*”, “*ensayo de escurrimiento con anillo J*” o, “*ensayo del embudo en V*”.

La Figura 25 muestra los cuatro ensayos principales para evaluar la capacidad de relleno y la resistencia al bloqueo de un hormigón autocompactante. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo los ensayos de, *escurrimiento*, *embudo en V*, *caja en L* y *anillo J*.



Figura 25. Ensayos para la caracterización del HAC.

3.2.4 La estabilidad

La *estabilidad o resistencia a la segregación*, se refiere a la característica del hormigón autocompactante de presentar durante y después de la puesta en obra una distribución uniforme del árido grueso. A esta homogeneidad durante el flujo o una vez en reposo, se las denomina respectivamente *estabilidad dinámica* y

estabilidad estática. Dos posibles ensayos de evaluación de estas propiedades son: el “*ensayo del tubo en U*” (Gomes, 2002) o el “*ensayo de la columna*” (ASTM C1610)



Figura 26. Ejemplo de ensayo del tubo en U (Gomes et al.; 2002)

3.2.5 Tiempo abierto

Como se ha mencionado con anterioridad, la trabajabilidad de un hormigón autocompactante se ve afectada por el transcurso del tiempo; por lo cual, la EHE ha especificado un lapso de tiempo, que se define como *tiempo abierto* o *tiempo de uso*; en el cual se contabiliza desde la fabricación hasta la puesta en obra del hormigón. En dicho lapso de tiempo, se considera que no se alteran las características de autocompactabilidad.

En referente a lo anterior, existen algunos trabajos en los cuales (Zerbino op. cit.) se menciona que a partir de los 30 minutos después de finalizado el amasado las características de autocompactabilidad empiezan a verse afectadas. Apuntando en estos trabajos, que la temperatura es uno de los factores más influyentes en esta propiedad; al igual que pasa con los hormigones convencionales.

Las mejores respuestas reológicas de los HAC, según investigaciones al respecto, se produce en temperaturas del entorno de los 20°C; siendo los HAC más sensibles a temperaturas superiores a los 30°C.

Una forma de aumentar el *tiempo abierto* en un hormigón, puede lograrse mediante la re-incorporación de un aditivo superplastificante o un aditivo retardador del fraguado (ACHE, 2008)

Por otra parte, para la determinación del *tiempo abierto*, de un HAC la EHE recomienda utilizar los ensayos indicados anteriormente, comparando los resultados en diversas repeticiones efectuadas de forma consecutiva con la misma muestra.

3.2.6 Robustez

Por último, la *robustez* es la capacidad de una dosificación del hormigón autocompactante, de asegurar las condiciones de autocompactabilidad ante pequeñas variaciones de sus componentes, de sus proporciones, de la variación de propia temperatura o de la combinación de todos ellos.

Las fluctuaciones en la distribución granulométrica o en el contenido de agua pueden igualmente influir de forma notable sobre la resistencia a la segregación de los HAC. Algunos trabajos al respecto, han demostrado que las desviaciones normales en el pesaje de los áridos no afectan notablemente las características del estado fresco del hormigón resultante, siendo adecuadas las tolerancias referenciadas en la EHE para evitar este efecto no deseable; de igual forma, las variaciones del agua o de los finos pueden afectar la capacidad de autocompactabilidad de los hormigones.

3.2.7 Dosificaciones

Debido a la importancia del estado fresco en los HAC con respecto a un hormigón convencional, la dosificación del hormigón autocompactante requiere de un mayor control específico que permitan asegurar el deseado comportamiento de ellos. Según las recomendaciones de la Instrucción del Hormigón Estructural, cuando se deba dosificar un hormigón autocompactante, se deberán contemplar las exigencias propias relacionadas con el proyecto en cuestión; y que se agrupan en los siguientes apartados:

- **Estructurales:** espaciado entre barras de la armaduras, dimensiones del propio elemento, complejidad arquitectónica del encofrado, caras vistas posibles, particularidades del proyecto que puedan influir en el escurrimiento del hormigón, tales como las variaciones de los espesores, los abultamientos, etc.
- **Operativas:** modalidad de llenado (bomba, cubilote, canaleta, etc.), velocidad y duración del llenado, características del encofrado, visibilidad del hormigón durante el llenado, distancia a la que ha de llegar el escurrimiento, altura de caída, accesibilidad del camión hormigonera, posicionamiento de los equipos de bombeo, etc.
- **Ambientales:** clima y temperatura ambiente en el momento del llenado, temperatura de los materiales, duración del transporte, eventuales situaciones críticas de tráfico, etc.
- **Prestaciones:** clase de exposición ambiental, resistencia característica del hormigón, y demás requisitos de proyecto.

A continuación, en la Tabla 2, se indican los rangos típicos de los componentes de un HAC por metro cúbico de hormigón según la EHE.

Material	Contenido
Filler (<0,063 mm)	$\leq 250 \text{ kg/m}^3$
Cemento	$250\text{-}500 \text{ kg/m}^3$
Finos totales (cemento+filler+adiciones)	$450\text{-}600 \text{ kg/m}^3$
Pasta (cemento+filler+adiciones+agua)	$>350 \text{ l/m}^3$
Árido grueso (<25 mm tamaño máximo)	$\leq 50\%$

Tabla 2. Dosificación de un HAC según EHE.

El método de dosificación del HAC difiere del utilizado para los hormigones convencionales, según la bibliografía especializada, existen diversos métodos de dosificación utilizados en la fabricación de las mezclas del hormigón autocompactante. En este apartado solo mencionaremos el método utilizado en el LTE para la optimización de las mezclas de HAC.

Investigadores de la Universidad Politécnica de Cataluña (Laboratorio de Tecnología de Estructuras, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos) han desarrollado una metodología de dosificación de HAC basada en utilizar componentes localmente disponibles y empleando técnicas de ensayo sencillas (Gómez et al., 2002; Gettu y Agulló, 2003).

En la Figura 27, método de dosificación UPC, el procedimiento se fundamenta en una optimización separada de la composición de la pasta y del esqueleto granular del árido. La pasta está constituida por cemento, filler, agua y superplastificante, mientras que el esqueleto granular se define por la relación óptima entre arena y grava que proporciona la estructura de máxima compacidad en seco y sin compactar.

En la misma figura, se designan a las relaciones, en peso, de agua-cemento, superplastificante sólido-cemento y filler-cemento por w/c , sp/c y f/c , respectivamente.

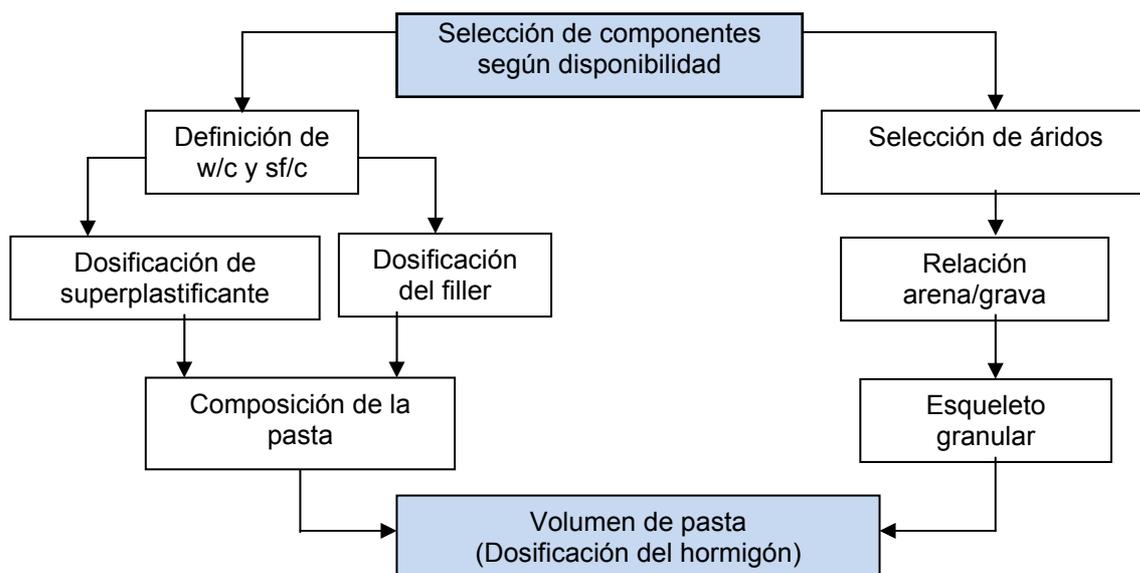


Figura 27. Método de dosificación UPC (Gettu y Agulló; 2003)

Para determinar la composición del árido se mezclan diferentes combinaciones de las fracciones de árido seco utilizado, en este caso dos, arena y gravilla, determinando la densidad de la mezcla y calculando su contenido de vacíos. Para ello, las combinaciones de árido se introducen sin compactar en un recipiente de 5 litros, enrasándose el material y mediante pesada se obtiene la densidad. Asimismo, a partir de los pesos específicos del árido se determina el contenido de vacíos. Se considera como combinación óptima de referencia arena/grava para el hormigón aquella con menor cantidad de vacíos.

Una vez determinada la composición de la pasta y la relación arena/grava del hormigón se determina el contenido óptimo de pasta (en volumen) necesario para satisfacer los requisitos de resistencia y autocompactabilidad exigidos al hormigón. En función de estos requisitos se fabrican hormigones con diferentes contenidos de pasta, determinándose el contenido óptimo de la misma frente a cada aplicación; en este sentido, el contenido mínimo de pasta debe rellenar los huecos que hay en el esqueleto granular, proporcionando la autocompactabilidad en el estado fresco y la resistencia a compresión en estado endurecido impuestas por las condiciones de contorno de cada aplicación.

3.3 MÉTODOS DE ENSAYO PARA EVALUAR LA AUTOCOMPACTABILIDAD

3.3.1 Consideraciones generales

El adecuado comportamiento del HAC en estado fresco o su autocompactabilidad exigen que de las mezclas de éstos, cuenten con una alta fluidez, así como con suficiente viscosidad y cohesión entre los componentes, con el fin de garantizar la capacidad de fluir; evitando de esta forma la posibilidad de segregación y el bloqueo del hormigón entre las armaduras.

Como se ha mencionado, las tres propiedades características del hormigón en estado fresco, o los tres requisitos principales de autocompactabilidad, son: la *capacidad de relleno* o habilidad para fluir dentro del encofrado y rellenarlo bajo su propio peso (*filling ability* o *flowability*, en inglés), la *resistencia al bloqueo* o habilidad de pasar a través del espacio entre las barras de armadura (*passing ability*, en inglés), y la *resistencia frente a la segregación* de sus componentes o estabilidad (*segregation resistance* o *stability*, en inglés).

Todos estos parámetros, son ajenos a la caracterización convencional de un hormigón en estado fresco; la cual, en el mejor de los casos, está fundamentada esencialmente en la medida del asiento en el cono de Abrams.

Para evaluar la autocompactabilidad, investigadores y otros usuarios del material han tenido que desarrollar ensayos específicos o modificar ensayos convencionales, que permitan tomar en consideración estos requisitos específicos. Hoy en día, existe una gran variedad de ensayos para la caracterización del HAC en el estado fresco y que más adelante serán motivo de explicación para algunos casos en particular.

Los procedimientos que se exponen a continuación, se refieren, en primer término a los ensayos aceptados por la Instrucción Española de Hormigón Estructural, Anejo 17 (EHE, 2008) para la evaluación del comportamiento en estado fresco de los hormigones autocompactantes; de forma seguida, se presentan igualmente, diversos ensayos utilizados en laboratorio y validados en la literatura científico-técnica consultada de este trabajo.

3.3.2 Ensayo de escurrimiento

El *ensayo de escurrimiento* (UNE 83361), *slump flow* en inglés (Figura 28), es el método más simple y el más utilizado en nuestro medio, lo anterior, responde a la sencillez del equipo que se precisa para su realización. Está basado en el equipo y procedimiento del ensayo del cono de Abrams, el cual es probablemente el ensayo más universal para la determinación de la *docilidad* o trabajabilidad del hormigón fresco. El ensayo de escurrimiento es adecuado tanto para ensayos en laboratorio como para la caracterización del hormigón en la propia obra.

El *ensayo de escurrimiento*, tiene por objeto evaluar cuantitativamente la *habilidad o facilidad de fluir* del hormigón bajo efecto de su propio peso, sin la presencia de obstáculos que le impidan el movimiento; este ensayo permite valorar cualitativamente y en términos visuales, si se está en presencia de una mezcla que presente *segregación*.

Como se puede identificar en la Figura 28, el instrumento básico para este ensayo es el cono de Abrams (con las características definidas en las normas EN 12350-2), que tiene diámetros inferior y superior a 200 y 100 mm, respectivamente, y una altura de 300 mm. Dicho equipo, se complementa con una base plana y un embudo para verter el hormigón dentro del propio cono.

Para la base de ensayo, se recomienda disponer de una superficie plana de acero (con dimensiones mínimas de 850 × 800 mm de lado y 2 mm de espesor), en el centro de la bandeja, se debe de contar con una cruz gravada con sus ejes paralelos a las aristas de la base, y con las circunferencias de 200 y 500 mm de diámetro centradas y marcadas en la superficie. Por último, se utilizan los aparatos de medidas básicas necesarias, tales como un cronómetro y una cinta métrica.



Figura 28. Ensayo de escurrimiento.

Para realizar el ensayo, como primer punto, es necesario asegurarse de que la superficie plana o base de ensayo esté dispuesta de forma horizontal, y que los círculos de 200 mm y 500 mm de diámetro estén claramente marcados. Antes de verter el hormigón, también será necesario humedecer la base con un paño húmedo, de forma que no se deje agua libre. De igual forma, se deberá humedecer el interior del cono y del embudo, colocándose el cono sobre el círculo con diámetro de 200 mm.

Una vez que está todo el material preparado, se vierte el hormigón rellenando el cono de una sola vez (sin ningún tipo de compactación), se enrasa con una llana el hormigón sobrante de la superficie con el borde superior del cono y, antes de que pasen 2 minutos, se deberá levantar verticalmente el cono de forma cuidadosa y continua (empleando de 2 a 3 segundos), dejando que el hormigón se extienda de forma natural y forme un círculo casi perfecto. A continuación, se determina en primer lugar, el tiempo que tarda el hormigón en alcanzar el círculo con diámetro de 500 mm (T_{50}) y, en segundo lugar, se determina igualmente el diámetro final alcanzado por el hormigón una vez finalizado el movimiento (D_F), para lo cual, se obtiene como la media aritmética de dos diámetros perpendiculares entre sí (Figura 29)



Figura 29. Ensayo de escurrimiento

En algunos casos, se ha realizado este ensayo con el cono de Abrams invertido, es decir, con la apertura de menor diámetro sobre la base; de esta forma, se evita la necesidad de tener una persona sujetando el cono para que no se levante por la presión del propio hormigón; puesto que con el cono invertido, el propio peso del hormigón lo mantiene estable. En esta variante del ensayo, se determinan los mismos parámetros de control que en el ensayo de extensión con el cono apoyado en su base mayor.

Los resultados principales obtenidos de este ensayo son: el tiempo (T_{50}) que tarda el hormigón en alcanzar el círculo de 500 mm de diámetro, medido desde el inicio del levantamiento del cono, y el diámetro final de la extensión (D_F)

Por último, se recomienda observar detenidamente si se produce segregación del hormigón autocompactante, porque los áridos gruesos tienden a quedarse en el centro durante la extensión cuando la resistencia a la segregación no es la suficiente. Por tanto, se examina también el aspecto final del hormigón para determinar la presencia de signos de segregación o exudación, que se manifestarían por la presencia de una aureola de pasta o mortero alrededor del perímetro de la extensión del flujo; la presencia de áridos gruesos acumulados en el centro o irregularidad en la distribución de estos áridos son claros indicios de segregación del hormigón.

También puede medirse el tiempo final de extensión de flujo (T_{final}), desde el inicio del levantamiento del cono hasta que la muestra deja de extenderse.

Como requisitos generales, la EHE establece unos rangos admisibles $T_{50} \leq 8$ segundos y un diámetro final, $550 \text{ mm} \leq D_F \leq 850 \text{ mm}$. En este ensayo, la altura del asentamiento no constituye una medida representativa para evaluar la mezcla del hormigón ensayado. Los valores de T_{50} y el T_{final} se emplean para representar la viscosidad y cohesión del hormigón; y en general, a mayor tiempo se relaciona una mayor viscosidad y cohesión del hormigón.

La sencillez de este ensayo, permite su fácil práctica de ejecución tanto en laboratorio, con un control exhaustivo, como para control en obra con menores niveles de exactitud.

3.3.3 Ensayo del embudo en V

El *ensayo del embudo en V* (UNE 83.364), denominado *V-funnel* en inglés, tiene como objetivo evaluar la *habilidad de fluir o capacidad de relleno del hormigón*; así como también, determina su *capacidad de paso* en áreas restringidas en dirección vertical (aberturas estrechas), y bajo su propio peso. Este ensayo cualifica la tendencia a la segregación y al bloqueo mediante la observación de la variación de la velocidad del flujo.

El embudo-V, normalmente está fabricado de acero, tiene forma de V y cuenta con una apertura en el fondo de él. La geometría de la sección transversal puede ser de forma circular o rectangular, siendo la segunda la que más se suele utilizar. Las dimensiones y geometría típicas de este equipo, se pueden apreciar en la

Figura 30. El equipo, dispone de unos soportes que le permiten el mantenerse en su eje vertical, y el conducto de salida, está dotado de una compuerta provista de un cierre de apertura rápida.

Las dimensiones de la sección del canal de salida dependen del tamaño máximo del árido utilizado en el hormigón, recomendándose una dimensión mínima superior a 3 veces el tamaño máximo del árido (TMA) Lo anterior conduce, en el caso de hormigones autocompactantes (cuyo tamaño máximo de árido no supera, generalmente, los 20 mm) a dimensiones mínimas del orden de 6,5 a 7,5 cm, siendo la sección más común la de 6,5 × 7,5 cm. Por otra parte, es necesario que el dispositivo de salida sea estanco mientras esté cerrado y de rápida apertura, para que de esta forma, no interfiera en lo posible, en la descarga del ensayo.

Además de este equipo, se necesita para realizar el ensayo, un recipiente con una capacidad aproximada de unos 12 litros, dicho recipiente servirá para recoger la muestra una vez ha pasado por el embudo; y por último, se deberá poder contar con un cronómetro.

Antes de proceder a verter la pasta, se deberá preparar el embudo-V humedeciendo su interior con un paño húmedo, colocándole en posición vertical sobre una superficie plana, firme y bien nivelada. Para terminar la preparación, se colocará bajo el embudo un recipiente para recoger el hormigón.

Tras asegurarse de que la compuerta está completamente cerrada, se vierte la muestra representativa del HAC (aproximadamente 10 litros), de manera continua y sin producir ningún tipo de vibración. Antes de abrir la compuerta, se nivelará el hormigón en la parte superior del embudo; y antes de que transcurran 10 segundos, se abrirá la apertura de la base. En este instante, se comienza a medir el tiempo que tarda el volumen total de hormigón en fluir a través del embudo. Para terminar, observando el flujo del hormigón desde la parte superior del embudo, se detiene el cronómetro al aparecer los primeros rayos de luz en el fondo de él.

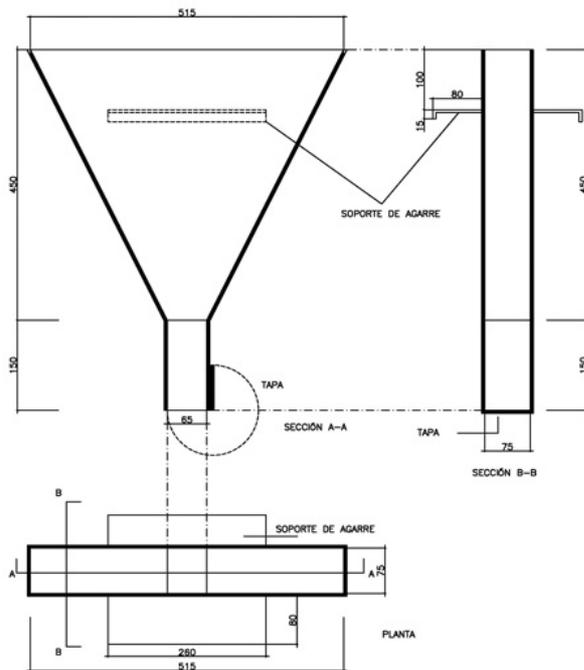


Figura 30. Ensayo embudo-V

El tiempo de flujo en segundos (T_V) es el principal parámetro obtenido de este ensayo. Es aconsejable medir el tiempo de flujo al menos 2 veces y realizar la media de ambos valores. La ejecución del ensayo dos veces consecutivas sobre la misma muestra permite evaluar cuantitativamente la resistencia a la segregación del material.

Para ello se procede a realizar una primera vez el ensayo, según lo descrito anteriormente; para luego a continuación, llenar nuevamente el embudo y antes de abrir la compuerta, dejar al material reposar unos 5 minutos en su interior. La diferencia de tiempo entre la segunda y la primera lectura no deberá superar los 5 segundos. Una diferencia mayor estaría indicando que se está ante una mezcla con baja *resistencia a la segregación*, pues el mayor tiempo en la segunda lectura estaría provocado por la segregación del árido grueso, que provoca una restricción al flujo del material en la parte inferior del embudo.

Se recomienda observar el flujo del hormigón a través del fondo para tener una idea más ajustada del bloqueo producido bajo esta situación.

El significado físico de los resultados está relacionado con varios aspectos del hormigón autocompactante en estado fresco; puesto que cuando la cantidad y el tamaño de los áridos gruesos son suficientemente pequeños en relación con la apertura del embudo-V, la colisión y la interacción entre las partículas de grava no afectan las características de flujo del hormigón fresco. Bajo estas condiciones, el tiempo de flujo del embudo permite evaluar indirectamente la *viscosidad de la mezcla* a través de la fluidez. En el caso de que la cantidad y tamaño de los áridos gruesos sean relativamente grandes para el tamaño de la abertura, la interacción

entre estos áridos es dominante en las características de flujo del embudo del hormigón en el estado fresco. Siendo por tanto, que el ensayo del embudo-V es útil para evaluar la habilidad del HAC para pasar por aberturas estrechas, y no simplemente para determinar la viscosidad de la muestra (Gettu y Agulló; 2003)

Respecto a la estabilidad en el caso de un flujo continuo sin interrupción, se puede decir que esta situación, se traduce en la ausencia de la segregación o del bloqueo de la mezcla de hormigón.

La *fluidez del hormigón*, y la forma, granulometría y dosificación del árido grueso, son factores importantes que influyen en el resultado del ensayo del embudo-V; puesto que entre otros limitantes, el ensayo se puede aplicar solamente a hormigones con tamaño máximo de árido (TMA) igual o inferior a 25 mm.

Este método, se ha demostrado como eficiente para evaluar la *habilidad de fluir* del hormigón en áreas restringidas y en dirección vertical; sin embargo, el ensayo no puede cualificar bien la tendencia a la segregación y bloqueo del mismo. Asimismo, el resultado no permite reflejar la *habilidad de fluir* en dirección horizontal o contraria a la propia gravedad. Por lo tanto, el tiempo de flujo obtenido en este ensayo no es suficiente por sí solo para cuantificar las propiedades necesarias que garanticen las prestaciones del hormigón como autocompactante.

3.3.4 Ensayo de escurrimiento con anillo J

El *anillo J* o *anillo Japonés* (UNE 83.362), *Japanese Ring* o *J-Ring* en inglés, es un instrumento que se utiliza en combinación con otros ensayos, como son el de extensión de escurrimiento o embudo-V a efectos de evaluar conjuntamente las habilidades de fluir y de pasar entre barras de armadura. Tiene como objetivo principal el evaluar la *resistencia al bloqueo* o *capacidad de paso* del HAC a través de barras de armadura en condiciones de flujo libre.

El anillo J, consiste en un anillo de 30 cm de diámetro y 10 cm de altura, en el cual se disponen a lo largo de su circunferencia, barras lisas verticales equidistantes entre sí. Se especifica la utilización de un *anillo J* con 20 barras de 10 mm de diámetro, si el tamaño máximo del árido utilizado en la composición de la mezcla es menor o igual a 20 mm, o de 12 barras de 28 mm de diámetro si el tamaño máximo del árido es superior a 20 mm (Figura 31).

Como requerimiento adicional de este ensayo, se necesita una superficie plana (mínimo 700 × 700 mm) sobre la que se colocará y fijará de forma centrada el anillo.

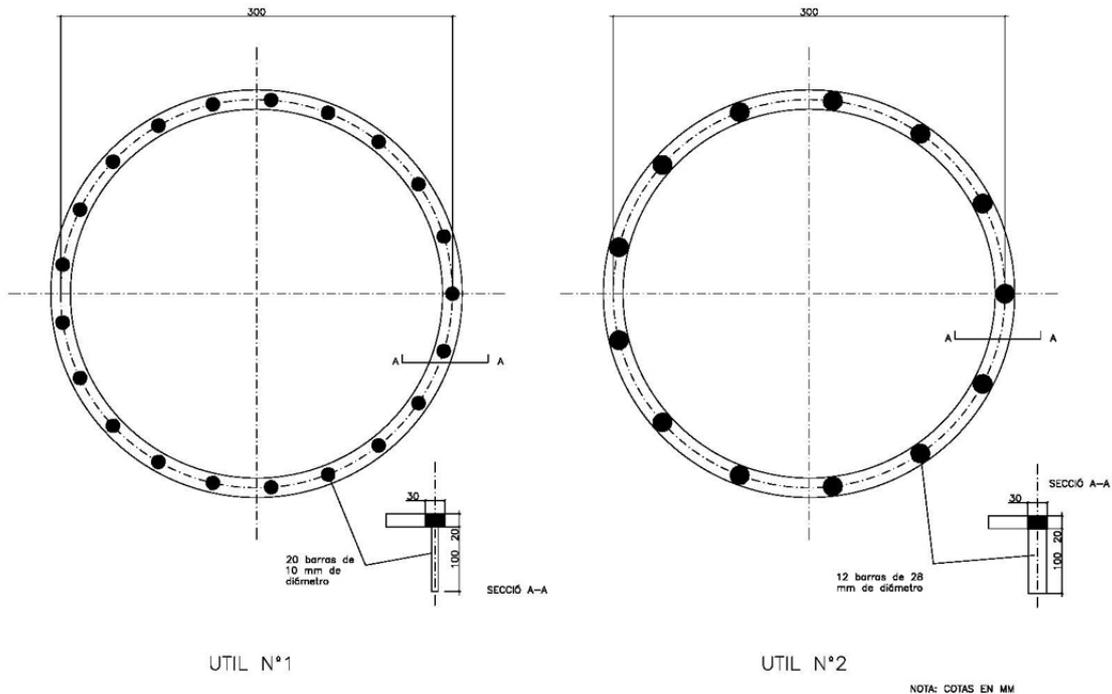


Figura 31. Esquema gráfico del anillo J.

El anillo J, se utiliza conjuntamente con el ensayo de extensión de flujo u otro ensayo similar donde se deje fluir al hormigón horizontalmente sobre una superficie plana. Por lo tanto, se necesitará disponer de los equipos correspondientes a estos ensayos con los que se combina el anillo. Por último, se requerirá disponer de una cinta métrica para medir la extensión del flujo final.

Para realizar el ensayo, en primer lugar se ha de preparar una superficie horizontal y humedecida; suponiendo que se combinará el ensayo de escurrimiento con el *anillo J*, se deberá centrar el anillo y el cono en dicha superficie para que pueda fluir el hormigón tal como procede en los ensayos de escurrimiento, pero en esta ocasión, atravesando el anillo (Figura 32).

Los parámetros que se obtienen del ensayo son, el diámetro final de extensión (D_{fJ}) y el tiempo que tarda el hormigón autocompactante en alcanzar un diámetro de 500 mm (T_{J50}), como en el ensayo de escurrimiento. Una vez que cesa el flujo, se mide el diámetro final de extensión (D_{fJ}), como la media de dos diámetros perpendiculares entre sí.

Se obtiene también la medida de las alturas de hormigón justo dentro y fuera del anillo, H1 y H2 respectivamente, y de esta forma evaluar el bloqueo. Con dichas alturas obtenidas, se determina el *coeficiente de bloqueo* (C_{bE}) mediante la siguiente expresión:

$$\text{Ecuación 1 } C_{bE} = 100 \times (H1/H2)$$

El diámetro final de extensión (D_{fJ}), se obtiene tal como se hacía con el ensayo de escurrimiento, pero en esta ocasión, la muestra atraviesa el anillo durante la extensión. Según la especificación alemana la extensión final debe ser mayor que

el valor obtenido sin el anillo menos 50 mm, para demostrar una adecuada habilidad de pasar sin sufrir bloqueo.

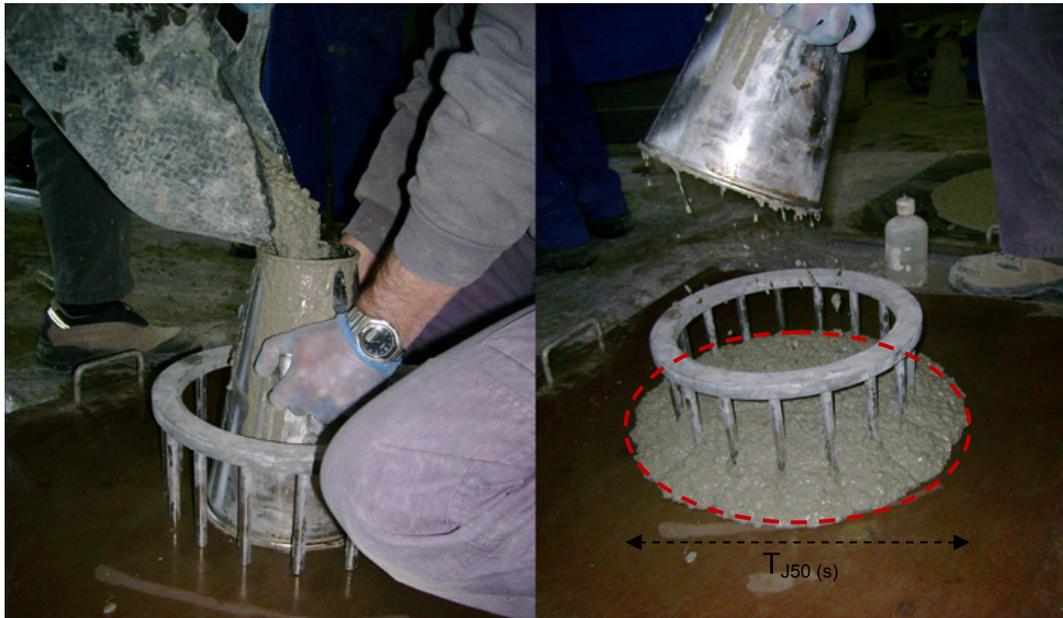


Figura 32. Proceso de ensayo del anillo J.

Por último, se observa detenidamente si se produce segregación en la mezcla, así como la posible presencia de exudación de la pasta en la zona perimetral, o la mayor concentración de árido grueso en la zona central de la masa de hormigón. En la Figura 33 derecha, se puede observar un evidente bloqueo de la mezcla, debido en este caso, al contenido de fibras.

Habitualmente este ensayo completa al ensayo de escurrimiento y la instrucción vigente recomienda que la diferencia entre los diámetros de escurrimiento sin y con anillo no sea superior a 50 mm, esto es: $D_f - D_{fJ} \leq 50$ mm.



Figura 33. Concentración de árido, ensayo anillo J.

El ensayo valora conjuntamente las habilidades de fluir y de pasar entre la armadura mediante un procedimiento simple. Sin embargo, como limitación de este ensayo, podemos indicar que normalmente el flujo no resulta *axisimétrico* lo cual dificulta la determinación de un diámetro representativo de su extensión.

3.3.5 Ensayo de la caja en L

El *ensayo de la caja en L* (UNE 83.363), denominado *L-Box* en inglés (Figura 34), tiene como objetivo evaluar la *habilidad del hormigón para pasar entre las barras* que simulan las armaduras en condiciones de flujo continuo. La prueba permite determinar valores que cuantifican el bloqueo y la fluidez del hormigón después de pasar por estos obstáculos. También permite, evaluar cualitativamente la *resistencia a la segregación* mediante la observación visual del comportamiento de la mezcla.

El aparato utilizado en este ensayo, la *caja en L*, consta de un depósito vertical con una capacidad aproximada de 13 litros, que conecta un cuerpo vertical de 600 x 200 x 100 mm; con una canal horizontal de 700 x 200 x 150 mm a través de una abertura que tiene la misma dimensión que la sección transversal interna del canal.

Detrás de la apertura situada en la sección que une el depósito con la canal, se colocan barras de armadura de acero con una determinada distribución. El tipo de barras y los espacios o separación entre ellas se establecen dependiendo del tamaño máximo del árido y de las condiciones reales de aplicación del hormigón.

En caso de utilizar un tamaño del árido máximo menor o igual a 20 mm, se utiliza un “peine” de 3 barras lisas de 12 mm de separación equidistante; y si el tamaño del árido máximo es mayor a 20 mm, entonces se usan 2 barras lisas de 16 mm de separación equidistante.

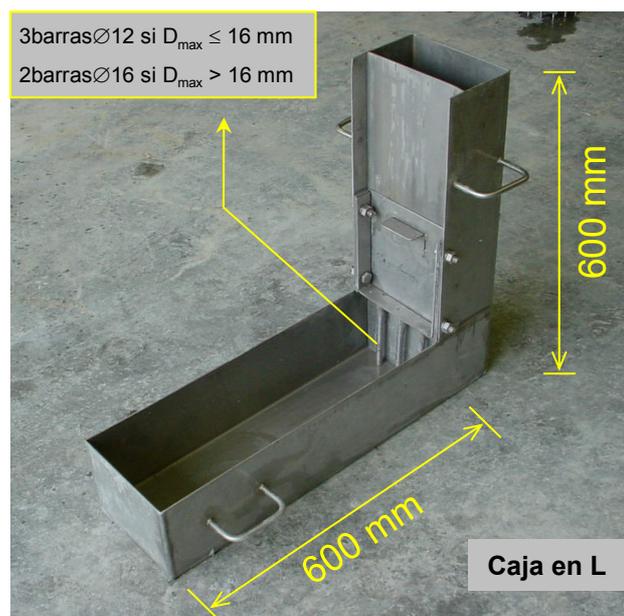


Figura 34. Caja en L.

Como en la mayoría de ensayos, hasta ahora presentados, se precisará también de instrumentos de medida, tales como el cronómetro y una cinta métrica.

Para realizar el ensayo, se monta la caja con las barras de armadura correspondientes y la compuerta cerrada. Como siempre, se humedecen sus paredes interiores con un paño húmedo antes de verter en la parte vertical de la caja la muestra de hormigón a ensayar, y se deja reposar durante unos 10 segundos aproximadamente. Este tiempo de reposo, permite realizar una primera evaluación visual de la estabilidad (segregación) de la propia muestra. Pasado este periodo, se abre la compuerta vertical rápidamente y se deja que fluya el hormigón hacia la parte horizontal, atravesando las barras de las armaduras.

A continuación, se determina el tiempo que tarda el hormigón en llegar al extremo del molde horizontal a una distancia longitudinal de 60 cm (T_{60}), y una vez finalizado el movimiento, se determinan las alturas h_1 y h_2 que alcanza la mezcla a ambos extremos de la parte horizontal, con la mezcla ya en reposo.

Los resultados obtenidos y valores típicos de este ensayo, se pueden sintetizar de la siguiente forma: En primer lugar, se mide el tiempo de escurrimiento (T_{60}), que es el tiempo en segundos empleado para que la muestra alcance el extremo del canal horizontal de la caja en L y situada a una distancia de 600 mm desde el extremo de la compuerta, con los valores obtenidos, se determina el coeficiente de paso (C_{bL}) mediante la expresión:

$$\text{Ecuación 2 } C_{bL} = 100 \times (H_1/H_2)$$

Según la Instrucción Española, el valor obtenido bajo este procedimiento de ensayo, debe presentar una variación del orden de: $0,75 \leq C_{bL} \leq 1,00$.

El ensayo permite también evaluar la *resistencia al bloqueo* y la *estabilidad de la muestra* de hormigón, mediante la visualización y observación de la muestra. En los casos en que se aglomeren o acumulen áridos detrás de la rejilla de la armadura, se considera que se produce un bloqueo. Habitualmente el bloqueo se manifiesta también por la presencia de granos de árido grueso entre las varillas. Por otra parte, cuando se observan granos del árido grueso distribuidos por la superficie del hormigón a lo largo de toda la extensión de la parte horizontal, el hormigón se considera estable, es decir, resistente a la *segregación*.

Los tiempos medidos en la caja en L cuantifican la velocidad de flujo a través de la barrera; no obstante, cabe comentar que estos tiempos no son representativos de la *fluidez del hormigón* (por lo que no se corresponden con los del test de *extensión de flujo*) cuando ocurren *efectos de bloqueo*, resultando que las mezclas que pasan tienen más pasta que el hormigón retenido en la caja.

Por otro lado, el *coeficiente de bloqueo* definido como la relación entre las alturas en los extremos del canal, es un buen indicador de la habilidad para pasar por aberturas estrechas, que incluye la *capacidad de deformación* y la *resistencia al bloqueo*.

La utilidad de este procedimiento se limita prácticamente al estudio del bloqueo, si bien permite realizar con este criterio estudios relativos a la optimización de los materiales componentes de la mezcla, tanto en términos de su naturaleza como de sus proporciones óptimas.

3.3.6 Otros ensayos utilizados en laboratorio

A continuación, se hace referencia a otros tipos de ensayos para evaluar las propiedades de hormigones autocompactantes en su estado fresco, que si bien aportan información del comportamiento de estos hormigones, no han alcanzado representatividad y reconocimiento internacional como los hasta ahora presentados.

3.3.6.1 Caja en U

Este ensayo, denominado en inglés como *U-Box*, se ha diseñado para evaluar de forma simultánea la habilidad de pasar por aperturas estrechas y la facilidad para el relleno bajo su propio peso y contra la fuerza de la gravedad de los HAC; refleja la *deformabilidad* y la *capacidad para fluir sin bloquearse* del hormigón (Figura 35)

La caja en U, consiste en un recipiente de 200 x 280 x 600 mm, dividido en dos columnas verticales, en él, existe una puerta deslizante de separación en el fondo del molde, y en la zona de paso, se colocan varias barras de armadura dejando aberturas estrechas.

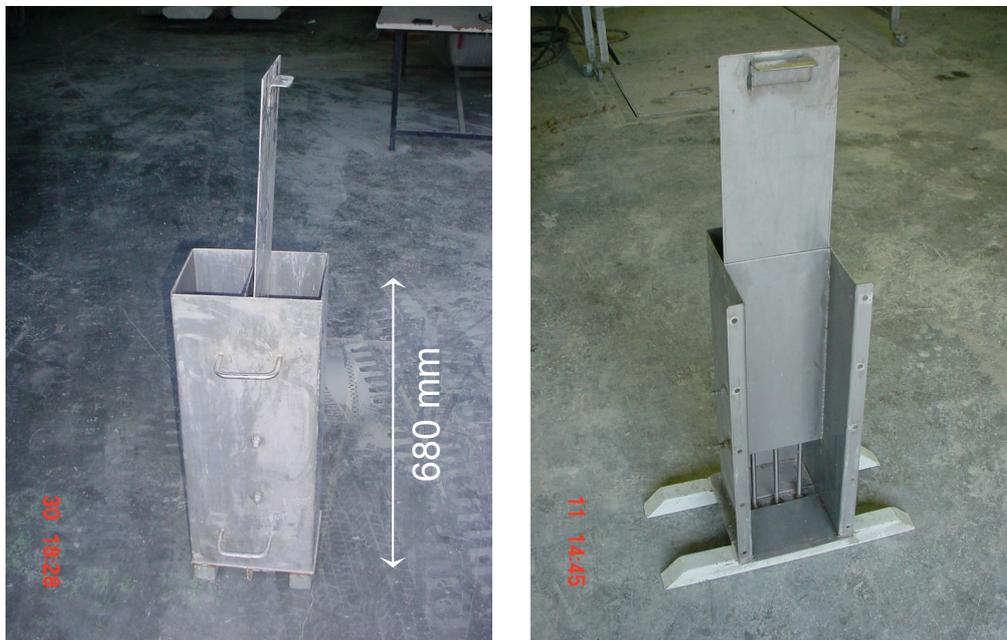


Figura 35. Caja en U (izq.) y vista interior (der.)

Se puede intentar seleccionar el número de barras y el espacio entre ellas de acuerdo con la situación real de construcción a la que se destinará el hormigón ensayado. Sin embargo, no es práctico variar constantemente las condiciones del equipo, así que es usual elegir un espacio libre entre las armaduras basadas en el

mínimo espacio libre permitido (que vendrá determinado por el tamaño máximo de árido TMA) por las especificaciones de diseño de cada país. En estas condiciones, se obtiene que el obstáculo más común utilizado es el compuesto por 3 barras de 13 mm de diámetro separadas 50 mm entre ellas (EFNARC, 2002). Por último, son necesarios instrumentos de medida tales como el habitual cronómetro y una cinta métrica.

Antes de comenzar el ensayo, es necesario humedecer las paredes interiores de ambos compartimentos y colocar el eje de la caja en posición vertical sobre una superficie plana, nivelada y firme. Una vez se tiene el aparato preparado se llena el primer compartimento con una muestra representativa del hormigón de forma continua y sin consolidar por efecto de vibración. A continuación, se nivela la parte superior y se aguarda un minuto de espera. Inmediatamente después, se levanta la compuerta dejando al hormigón que fluya hacia el compartimento vacío, pasando a través del obstáculo constituido por las varillas de acero que simulan la armadura.

El procedimiento consiste en medir la altura (h) que alcanza el hormigón una vez ha cesado el movimiento desde la base de la vasija hasta la superficie libre del hormigón (para facilitar la lectura la pared del compartimento vacío puede utilizarse una placa de metacrilato transparente)

El resultado principal obtenido de este ensayo es la altura de relleno (h); la cual, cuando a alcanzado superar el valor de 30 cm, se estima que el hormigón tiene una buena habilidad de relleno. Asimismo, puede medirse el tiempo de *flujo del hormigón* y valorar cualitativamente la *segregación* por observación visual (Gettu y Agulló; 2003)

La altura de relleno, se utiliza para evaluar la habilidad del hormigón ensayado para pasar por aberturas estrechas; de forma específica, una mayor altura de relleno indica una mayor *habilidad de paso*. De esta forma, el tiempo que tarda el hormigón en fluir se utiliza para evaluar la *viscosidad de la mezcla*.

En cualquier caso, cuando se evalúa un hormigón por el resultado de este ensayo, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos: El significado físico de la altura de llenado queda influenciado por las proporciones de la mezcla del hormigón ensayado; por ejemplo, cuando la cantidad y el tamaño del árido son pequeños comparados con el espacio entre las barras instaladas, la altura de llenado depende mucho de la capacidad de deformación o *fluidez de la muestra* de hormigón, y la *resistencia a la segregación* apenas influye. En este caso, el tiempo de flujo en la caja en U, representa bien la *viscosidad de la mezcla*, que controla la *resistencia a la segregación*.

Por otro lado, cuando el tamaño y cantidad de árido grueso son grandes en relación al espacio libre entre las barras, la colisión y la interacción entre partículas de árido grueso afecta en mayor grado a la habilidad de pasar por aberturas estrechas. En este caso, un hormigón con tendencia a la *segregación* a menudo da una baja altura de llenado de la caja en U, incluso aunque el hormigón presente una gran fluidez; además, la *velocidad de flujo* tiende a ser lenta debido

a la interacción de los áridos gruesos, incluso si la viscosidad de la muestra no es muy alta.

Este método parece ser bastante eficiente para evaluar la *habilidad para el relleno* del hormigón; sin embargo, no evalúa bien la *deformabilidad* sin restricción, y por lo tanto, se precisan de otros métodos complementarios.

3.3.6.2 Ensayo de la caja de relleno

Este ensayo fue desarrollado por Yurugi, denominado también como ensayo Kajima o *fill box test* en inglés, y es utilizado para evaluar la habilidad de rellenar un espacio en presencia de obstáculos (Figura 36)

El objetivo del ensayo es determinar la *habilidad de fluir* y rellenar un molde atravesando el espacio de barras de armadura. Para su aplicación, el recipiente utilizado consiste en una caja de sección transversal con dimensiones de 30 × 50 × 30 cm y abierta por el lado superior. En dicho equipo, se colocan barras de 16 mm de diámetro en 7 filas verticales con 5 barras en cada fila y 5 cm de distancia entre las filas, distribuidas de centro a centro. Las barras, que pueden ser metálicas o de plástico, traspasan el espesor de 30 cm de la caja, y la primera fila de éstas, están situada a 15 cm de una de las paredes. La caja se fabrica con un material transparente como por ejemplo, el metacrilato.

Para efectuar la toma de medidas, será necesario disponer de una cinta métrica para medir la altura del hormigón dentro de la caja.

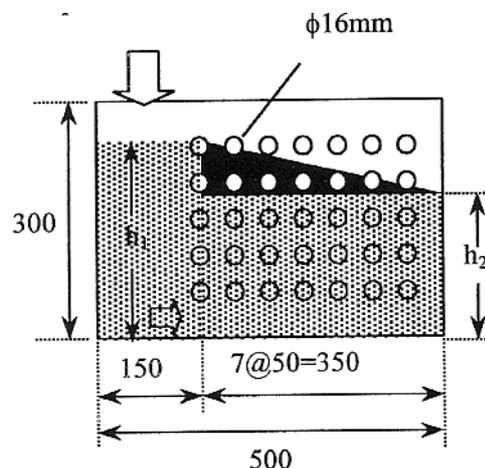


Figura 36. Recipiente para el ensayo de habilidad de relleno.

El método de ensayo consiste en introducir una muestra de hormigón en la sección libre de obstáculos (sin armadura) del recipiente; dicho recipiente, debe estar previamente humedecido con agua. Se deja de verter el hormigón cuando el nivel del mismo alcanza la barra superior de la primera de las filas. Una vez se ha detenido el flujo del hormigón en el interior del recipiente, se determinan las alturas máxima y mínima del hormigón. Es importante remarcar, que el ensayo no debería durar más de 8 minutos según la especificación de EFNARC (2002)

Con las alturas máxima (h_1) y mínima (h_2) alcanzadas por el hormigón, se calcula el coeficiente de relleno como $F = 100 (h_1+h_2) / 2h_1$, adoptándose un valor superior al 90% para que sea considerado como HAC.

En algunos casos, en lugar de utilizar solamente la altura media como parámetro de medida, se ha determinado el área relativa rellena por el hormigón y tratado ésta como indicador de la habilidad de relleno.

La mayor ventaja de este tipo de ensayo es poder visualizar la facilidad de rellenar un molde con el HAC. De esta forma, se puede juzgar el grado de autocompactabilidad del hormigón, evaluando a la vez la habilidad de pasar entre espacios pequeños y barras de armaduras. Por otra parte, el coeficiente de relleno (F), que representa la altura media alcanzada con respecto a la altura máxima, permite cuantificar esta habilidad. Se ha adoptado un valor de $F = 100$, para considerar que el hormigón es prácticamente autonivelante.

Como desventaja, es necesario indicar, que el ensayo necesita una gran cantidad de hormigón y un esfuerzo considerable para rellenar, vaciar y limpiar el instrumento; además también, la duración del ensayo es considerable debido al propio proceso del relleno del recipiente.

3.3.6.3 Tubo-U

El ensayo del Tubo-U (Figura 37, der.), ha sido desarrollado en la Universidad Politècnica de Catalunya (Gomes et al., 2002) para evaluar cuantitativamente la *estabilidad del hormigón fresco* o la *resistencia a la segregación*. En este ensayo se utiliza un tubo en forma de U de 16 cm de diámetro; el cual se rellena con hormigón por una de sus bocas hasta que quede enrasada su otra boca; el relleno se realiza sin compactación. A continuación, se deja fraguar el hormigón durante unas horas (normalmente, entre 3 y 6 horas), se procede a su apertura y se cortan discos de 10 cm de espesor en distintas secciones del tubo para determinar el contenido de árido grueso presente en cada sección, mediante lavado, tamizado del mortero (hasta las fracciones de 5 mm) y secado.

El resultado del ensayo es la *relación de segregación* (denominada RS), definida por el cociente entre el mayor y el menor contenido de árido grueso obtenido en los diferentes discos. Se recomienda que este coeficiente sea igual o superior a 0,90 para el caso de un HAC.

En la figura Figura 37 derecha, se pueden observar pruebas exigentes de tubo en U pero diferentes al ensayo propuesto y publicado por Gomes 2002, siendo una variante que puede representar condiciones prácticas reales.



Figura 37. Vista general del tubo-U

3.3.6.4 Otros ensayos para evaluar la resistencia a segregación

Para evaluar la *resistencia a la segregación* de los HAC, se han desarrollado recientemente diferentes ensayos que consisten, básicamente, en analizar el asentamiento de los áridos gruesos en el interior de columnas del hormigón fresco. A continuación, se presentan algunos ensayos que han sido validados, esencialmente por los propios grupos que han propuesto el método de ensayo, y por tanto, quedando pendiente su aceptación o reconocimiento por parte de otros investigadores.

Ensayo de estabilidad con tamiz:

Se ha propuesto este ensayo (EFNARC 2002), denominado también ensayo GTM o *screen stability test* en inglés, para su uso en el diseño de mezclas y para la recepción del hormigón en obra. El instrumento básico consiste en un tamiz de diámetro de 315 mm para retener partículas con tamaño mayor que 5 mm, sobre el cual se vierten 4,8 kg de hormigón, se esperan 2 minutos y se determina el peso de la lechada que ha atravesado el tamiz. Considerando el peso relativo de la lechada respecto al de la muestra, se aceptan valores de hasta 15%, y se rechazan hormigones con valores superiores al 30%. Entre estos límites, se recomienda realizar pruebas in situ para evaluar la segregación en el hormigón.

Índice Visual de Estabilidad:

Reconociendo la dificultad de determinar rápidamente el *grado de segregación* en una mezcla, se ha propuesto un *índice de estabilidad* basado en la observación del hormigón después de ejecutado el ensayo de escurrimiento, (ASTM C1611), (Figura 38). Dicho índice, puede tener valores del orden de 0 a 3, en incrementos de 0,5. El valor 0 indica la ausencia de segregación (Figura 38 izquierda); el valor 1 indica la presencia de una ligera exudación y burbujas de aire en la superficie, sin la aureola de mortero o acumulación de áridos en el ensayo de la extensión de flujo; el valor 2 indica la presencia de una aureola de mortero con ancho menor que 10 mm o la acumulación de áridos en el ensayo de la extensión de flujo (Figura 38 derecha); y el valor 3 indica una clara evidencia de segregación,

acumulación de áridos y la presencia de una gruesa capa de pasta sobre la superficie.

El HAC debería tener un índice igual o menor que 1; aunque se ha obtenido una buena correlación entre el valor del índice de estabilidad visual y los resultados del ensayo de columna, la determinación del índice no es objetiva.



Figura 38. Índice visual de estabilidad.

3.3.7 Control de recepción en la obra

Como ejemplos ilustrativos de otros sistemas de evaluación del comportamiento de los HAC en obra, a continuación se hacen algunas pequeñas reseñas de información documentada al respecto.

Ensayo de control de recepción del hormigón en la obra:

Para controlar el 100% del hormigón autocompactante suministrado por camión a la obra en Japón, se desarrolló un ensayo en el cual se utiliza un instrumento que consiste en una caja con barras de armadura colocadas verticalmente en su interior (Figura 39) Se coloca este instrumento entre el camión y la bomba en la obra y se hace pasar todo el volumen del hormigón a través del mismo. Si se bloquea el hormigón, se rechaza el resto del material del camión. Este instrumento fue utilizado por primera vez en la construcción de un depósito de gas licuado en Japón como único método de control del hormigón fresco en la obra.

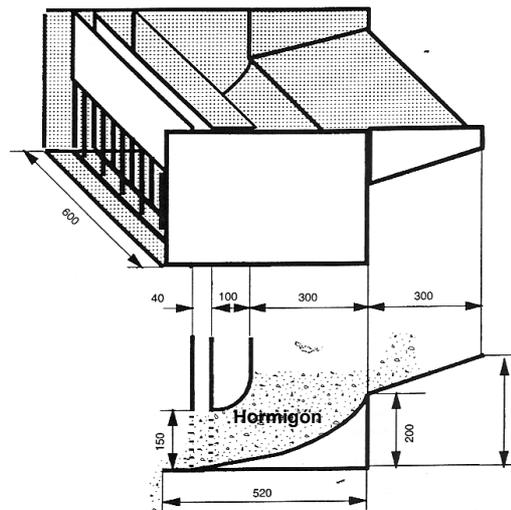


Figura 39. Ensayo del control de recepción.

Verificación in situ de la uniformidad del hormigón en el elemento:

Teniendo en cuenta que la autocompactabilidad depende de las condiciones en la obra, dimensiones y forma del elemento en el cual se va utilizar el HAC y la forma de colocar el hormigón in situ, AFGC (2000) recomienda dos métodos para verificar la uniformidad del hormigón colocado in situ: El primero de estos métodos consiste en extraer una muestra de hormigón de la superficie para analizar el contenido de su grava. El segundo de los métodos se basa en la auscultación mediante el uso de ultrasonidos. En ambos casos, se aceptan variaciones de hasta un 10% en los parámetros obtenidos con estas técnicas.

En la Tabla 3 se resumen los ensayos más habituales para la caracterización de los HAC, los distintos parámetros, sus unidades, la propiedad caracterizada y los respectivos rango admisibles (* valores según EHE). De todos modos, ninguno de los ensayos puede, por sí solo, caracterizar todos los aspectos de autocompactabilidad. Es preciso evaluar los tres parámetros de trabajabilidad del hormigón autocompactante, *fluidez*, *resistencia* o *estabilidad a la segregación* y *habilidad* o *capacidad de paso*, en el momento de diseño de la mezcla.

En lo referente al control de calidad en la obra, dos métodos suelen ser suficientes para evaluar la calidad de la producción. Las combinaciones más frecuentes son el *ensayo de escurrimiento* y *embudo en V* o *ensayo de escurrimiento* y *anillo J*.

Ensayo	Resultado	Unidad	Propiedad	Rangos admisibles
Escurrimiento	T_{50} D_f T_{final}	s mm s	Capacidad de fluidez Resistencia a la segregación	$\leq 8 s^*$ 550 a 850 mm* ∞
Embudo en V	T_V $T_{V-5 \text{ min}}$	s s	Capacidad de relleno Capacidad de paso Resistencia a la segregación	$4 s \leq T_V \leq 20 s^*$ $\leq 5 s$
Escurrimiento con anillo J	D_{fJ} T_{J50} C_{bE} D_f, D_{fJ}	mm s - mm	Resistencia al bloqueo	$\geq D_f - 50 \text{ mm}^*$ - $0,75 \leq C_{bE} \leq 1,00$ $\leq 50 \text{ mm}$
Caja en L	T_{60} C_{bL}	s -	Resistencia al bloqueo Resistencia a la segregación	- $0,75 \leq C_{bL} \leq 1,00^*$
Caja en U	h	mm	Capacidad de relleno	$\geq 30 \text{ cm}$
Tubo en U	RS	0,90	Resistencia a la segregación Estabilidad del hormigón	0,90

Tabla 3. Ensayos para medir las propiedades de autocompactabilidad del HAC.

3.4 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

Como indica la EHE, el hormigón autocompactante añade la propiedad de la autocompactabilidad a un hormigón convencional, de modo que las fórmulas que definen las propiedades del hormigón endurecido, tanto convencional como autocompactante, se pueden considerar equivalentes.

3.4.1 Resistencias mecánicas

Para establecer la resistencia característica y la resistencia media de un HAC, se pueden aplicar las mismas fórmulas utilizadas en un hormigón convencional. Según la ACHE, para una resistencia a compresión dada, las resistencias a tracción son semejantes a las que se obtienen para un hormigón convencional con el mismo tamaño máximo de árido.

De los ensayos realizados se deduce un mejor comportamiento de adherencia del hormigón autocompactante y la armadura, con valores medios superiores a un hormigón convencional. Por lo tanto, las longitudes de anclaje serán las mismas.

De la bibliografía consultada, queda demostrado que los resultados de la resistencia a compresión del hormigón autocompactante, con dosificaciones equivalentes, es superior al hormigón convencional (Fernández y Burón; 2008)



Figura 40. Instrumental de medición.

En la Figura 40 se muestra el instrumental para la obtención de datos de deformación y resistencias mecánicas, máquina de ensayo universal IBERTEST del LTE-UPC.

3.4.2 Módulo de deformación

El módulo de deformación de un hormigón es un parámetro básico para determinar las deformaciones. Habitualmente las fórmulas relacionan el módulo de deformación con la resistencia a compresión. Se utilizarán los mismos modelos que para determinar un hormigón convencional.

De la bibliografía de referencia podemos extraer que, el desarrollo del módulo de deformación es similar en hormigones convencionales como en autocompactantes (ACHE, 2008)

Los ensayos de módulo de deformación y resistencia a la compresión se pueden realizar, y como muestra la Figura 41, en un sistema de ensayo universal como el disponible en el LTE-UPC. A la izquierda, se aprecia una probeta de hormigón autocompactante preparada para el ensayo de módulo de deformación, en ella se inserta un anillo perimetral en el que de forma equidistante se colocan tres controles de desplazamiento del tipo *transformador diferencial de variación lineal* (LVDT según sus siglas en inglés) para la obtención de la deformación promedio

en tres generatrices de la probeta, a 120°. En la figura de la derecha el ensayo de compresión para la obtención de la resistencia del HAC.



Figura 41. Ensayos en estado endurecido.

3.4.3 Retracción

La pérdida de agua produce dos tipos de retracción en estado endurecido. La *retracción endógena*, que es agua que se consume durante el proceso de hidratación del cemento y producida a primeras edades; y la *retracción por secado* que ocurre durante la pérdida posterior de agua por evaporación y se desarrolla en un plazo más prolongado de tiempo.

La *retracción endógena* es ligeramente superior a los de los hormigones convencionales debido al mayor contenido de pasta. Pero, la *retracción por secado* es inferior debido a la menor pérdida de agua.

En el capítulo IV del presente trabajo, se describen los ensayos para evaluar la retracción de diferentes hormigones autocompactantes, que se realizaron durante la campaña experimental en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC.

3.4.4 Fluencia

El incremento de deformación que experimenta el hormigón cuando está sometido a una tensión constante se lo denomina, fluencia. Las deformaciones por fluencia pueden ser varias veces la deformación ocasionada por la carga instantánea.

La fluencia depende fundamentalmente de la relación agua/cemento, teniendo lugar en la pasta de cemento. La fluencia es inversamente proporcional a la resistencia del hormigón. Cuando existe un mayor volumen de áridos, la fluencia se reduce debido al obstáculo que estos representan, por lo tanto, en un hormigón autocompactante la fluencia sería mayor ya que existe un volumen menor de áridos, no obstante y según las publicaciones consultadas no se aprecian diferencias entre hormigones convencionales y autocompactantes (ACHE, 2008)

3.4.5 Durabilidad

La durabilidad es la capacidad resistente del hormigón a la acción del ambiente, los ataques físicos, químicos o biológicos durante su vida útil conservando su forma original. También se incluyen los fenómenos de corrosión.

La capacidad de transporte de fluidos, la temperatura y la humedad son los principales elementos que afectan a la durabilidad. Para la instrucción española, en un hormigón autocompactante la interfase pasta-árido es más densa que en un hormigón convencional debido a la ausencia de vibración y al uso de adiciones, que permite una mayor compacidad y como consecuencia, una reducción de la velocidad de penetración de los agentes agresivos (EHE,2008)

De todo esto podemos deducir que es de esperar que los HACs presenten una durabilidad igual o superior a los hormigones convencionales con resistencias equivalentes.

3.4.5.1 Carbonatación

Cuando la pasta de cemento hidratada y el CO_2 del aire penetra en el interior de hormigón a través de su estructura porosa, se producen reacciones denominadas, carbonatación. La formación de CaCO_3 conduce a la sedimentación de materiales en los poros del hormigón y a una reducción del pH. La reducción de pH conduce a la pérdida de la capa pasiva (de alta alcalinidad) de las armaduras, que pierden la protección alcalina que el hormigón les aporta frente a la corrosión.

Como la velocidad de carbonatación depende, entre otros factores, de la estructura de los poros, del contenido de humedad, del tipo de cemento y el tipo y cantidad de adiciones. La carbonatación de un HAC puede considerarse equivalente o menor que la de un hormigón convencional de resistencia equivalente, debido a las características de su estructura de poros, la calidad de la interfase árido-pasta y la presencia de adiciones (ACHE, 2008)

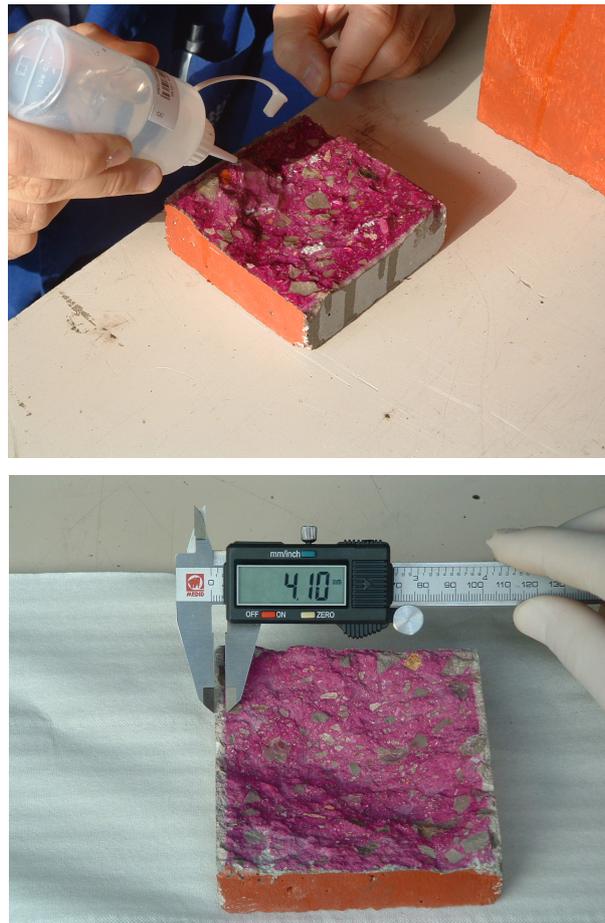


Figura 42. Método de teñido con fenolftaleína.

En la Figura 42, se observa en la parte superior, la técnica para medir la profundidad de carbonatación por medio del método de teñido con fenolftaleína (UNE 112-011-94). La solución de fenolftaleína reacciona cambiando de color ante la pérdida de pH, es decir el hormigón no cambia de color en las zonas expuestas al ambiente, en este caso, Figura 42 inferior, el frente de carbonatación es de 4,10 mm.

En el capítulo siguiente se informa de los valores de carbonatación para diferentes mezclas de HAC, en probetas con edad de 5 meses realizadas durante la campaña experimental.

3.4.5.2 Corrosión de armaduras

La corrosión de armaduras es el proceso más importante de degradación de las estructuras de hormigón armado. El hormigón protege a las armaduras debido a su pH alcalino (>12) que mantiene a las armaduras recubiertas con una capa pasiva de alta alcalinidad y a un efecto físico de barrera, que ralentiza el ingreso de las sustancias que conducen a la pérdida de esas condiciones.

La corrosión de armaduras en un HAC es similar o algo menor que la de un hormigón convencional de prestaciones equivalentes, debido a la microestructura más densa del HAC y que ejerce un efecto de barrera más eficiente, retrasando el inicio de la corrosión. Como complemento, su aptitud de llenado sin defectos en zonas densamente armadas y la ausencia de vibrado contribuyen de manera significativa a mejorar la protección del acero (ACHE, 2008)

3.4.5.3 Resistencia hielo-deshielo

El deterioro por efecto de hielo-deshielo se asocia parcialmente con el aumento de volumen del agua al congelarse y a otros cambios termodinámicos que ocurren con el descenso de la temperatura.

Según la EHE, el comportamiento de un HAC frente al hielo-deshielo es similar al de un hormigón convencional, por lo que deben tomarse las mismas precauciones.

3.4.5.4 Resistencia al fuego

Respecto a otros materiales el hormigón tiene una buena resistencia frente al fuego, pero cuando está sometido a este tipo de acciones se producen importantes cambios en su composición.

El agua contenido en el hormigón cuando alcanza temperaturas superiores a la ebullición se evapora generando una presión de vapor en el interior de los poros de hormigón, la presión será mayor cuanto mayor sea la temperatura. Esta presión genera desconchamientos en la superficie del material disminuyendo su sección y por tanto su capacidad estructural y de aislante térmico. Estas consideraciones están incluidas para el dimensionamiento de las estructuras de hormigón frente al fuego.

El efecto de la temperatura sobre la resistencia del hormigón también depende de su composición. Para la EHE el dimensionado para la resistencia al fuego puede ser el mismo que para el hormigón convencional.

3.4.5.5 Abrasión

La abrasión se produce por el rozamiento de otros materiales sobre la superficie de hormigón, el deterioro debido a este ataque físico dependerá del origen y la duración de estas acciones.

Capítulo IV: CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Introducción

Como se ha mencionado, los trabajos experimentales corresponden a programas desarrollados en el marco de diversos proyectos ejecutados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Catalunya (LTE-UPC), durante la etapa de colaboración del autor en dicho centro de investigación. Cabe remarcar la participación directa del autor en los diferentes trabajos experimentales que se presentan a continuación.

A diferencia de una campaña experimental clásica, donde los estudios se planifican a partir de una serie de materiales componentes y prestaciones fijas, en la presente configuración se emplean diversas dosificaciones y materiales componentes. Esta característica aporta una visión más amplia sobre el HAC bajo diferentes tipos de sollicitaciones, con dosificaciones realmente adaptadas a las necesidades reales de las aplicaciones estudiadas.

De esta manera, el presente capítulo se estructura en tres apartados principales y autocontenidos; los cuales responden a una clasificación que atiende a una campaña lógica de investigación (laboratorio - generación de modelos reales - aplicación práctica):

- Optimización de mezclas de HAC y estudio de sus propiedades en estado fresco y endurecido.
- Respuesta diferida del HAC reforzados con fibras, en condición fisurada.
- Aplicaciones a escala real.

En primer lugar se describen algunos de los trabajos experimentales realizados a escala del material. En el primer caso se trabajó en la optimización de mezclas de HAC, utilizando varios tipos de *filler*, en donde se estudia la influencia de estos últimos en las características en estado fresco y endurecido de un hormigón autocompactante, incluyendo la medida de parámetros de durabilidad.

Posteriormente se detallan los ensayos de fluencia en flexión de probetas de HAC reforzado con fibras de acero en condición fisurada. En particular, cabe destacar el carácter original de esta investigación, que ha aportado resultados experimentales sobre un tema de gran importancia para el cálculo estructural pero escasamente estudiado, tanto a nivel nacional como internacional.

En tercer lugar, se presentan dos aplicaciones del HAC en edificación:

- Paneles delgados para construcción in situ industrializada, un sistema que permite aumentar significativamente la productividad al hormigonar pilares, muros y forjados en una sola fase. Se ha avanzado hasta la pruebas con HAC reforzado con fibras y se ha incidido sobre las posibilidades del material como hormigón visto.
- Muros de sótano y soleras para un forjado sanitario con sistema de encofrado no recuperable en una vivienda unifamiliar. Esta aplicación,

posiblemente la primera aplicación in situ del HAC en viviendas en la ciudad de Barcelona, ha demostrado las importantes ganancias de calidad y tiempos de ejecución que se pueden conseguir a partir del empleo del HAC en este tipo de estructuras.

En todos los casos, previo a la aplicación de los diferentes HACs, se procedió a la optimización de las dosificaciones en laboratorio con los materiales que finalmente serían empleados por la planta de hormigón preparado encargada de proveer el material. En este punto, cabe destacar asimismo la intensa planificación logística que estas pruebas a escala real han requerido.

4.1 HAC CON DIFERENTES TIPOS DE FILLERS

De los trabajos realizados en el LTE-UPC, podemos destacar inicialmente el que consistió en realizar diferentes variables y en analizar los resultados obtenidos para la optimización experimental de mezclas de hormigón autocompactante de resistencia media; para lo cual, se han empleado dos tipos diferentes de *filler*.

4.1.1 Optimización de mezclas, ensayos de caracterización físico-mecánica y de durabilidad.

La instrucción EHE2008 especifica que para la dosificación de un hormigón autocompactante es necesario dotar a la mezcla, respecto a un hormigón convencional, de un mayor contenido de pasta; esto quiere decir, agua más un material con tamaño de partícula inferior a $125\mu\text{m}$: el *filler*. Este aumento del volumen de pasta permite reducir la fricción entre partículas por medio de un efecto lubricante y así lograr una de las características de la autocompactabilidad, *capacidad de fluir*.

Otro aspecto a considerar es, que el mayor contenido de pasta necesario para conseguir la capacidad de fluir del material, normalmente se consigue a través del aumento del contenido de cemento, con lo cual obtenemos hormigones autocompactantes de altos niveles de capacidad resistente, pero que por otra parte, resultan innecesarios desde un punto de vista de las prestaciones, lo cual significa un problema desde el aspecto económico de ellos.

A lo anterior debemos comentar, y según la literatura técnica sobre las mezclas de HAC, que existen referencias del uso de distintos tipos de *filler*, por ejemplo, las cenizas volantes, las escorias, las puzolanas o el polvo de piedra caliza. Sin embargo, en el caso particular de España, es el polvo producido por el machaqueo de la roca caliza el *filler* más empleado para la fabricación de estos hormigones. Lo anterior es debido a que se obtiene como un residuo del proceso de trituración de áridos, el *filler calizo* empleado para las mezclas presenta una importante heterogeneidad en sus características físicas y mineralógicas que inevitablemente producirá variaciones en las propiedades reológicas y físico-mecánicas de los hormigones que los utilizan, con el consecuente y necesario

ajuste a realizar en la dosificación, desviaciones y pérdidas de tiempo, etc. (Pajares et. al, 2008)

En el LTE-UPC, desde hace ya una década se trabaja en la optimización de las mezclas de hormigones autocompactantes que permitan conseguir dosificaciones técnica y económicamente viables. En el caso que presentamos a continuación, se analizaron las características reológicas, mecánicas y de durabilidad de HACs conseguidos a partir del empleo de productos fabricados preconcebidamente para su uso en hormigón y que garantizan la homogeneidad de sus características. Se trata de fillers de *carbonato cálcico* presentado en polvo y *slurry*, Betocarb (Bc) y Betoflow (Bf), respectivamente, fabricados por la empresa OMYA, S.L. (Omya, 2007)

En este apartado se presentan las características reológicas, mecánicas y de durabilidad de HACs conseguidos a partir del empleo de productos Betocarb y Betoflow. Asimismo, se presenta la optimización experimental de mezclas de HAC de resistencia media empleando los productos mencionados y sus características físico-mecánicas y de durabilidad en estado endurecido. De igual forma, se estudia la influencia de los fillers mencionados en cuanto a las características de fluidez y cohesión a nivel de la pasta y de la repercusión sobre la capacidad de fluir de éstos, su resistencia al bloqueo y su estabilidad a nivel hormigón.

La caracterización físico-mecánica contempla la evaluación de la retracción total en probetas sometidas a cámara de control ambiental y la evolución de la resistencia hasta la edad de 28 días. En términos de durabilidad, se evalúa la *profundidad de carbonatación* después de 5 meses de exposición al ambiente de cámara de control climático con una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 50%HR.

4.1.2 Materiales y programa de ensayos

Como componentes básicos, se ha utilizado una arena y dos grava calizas de machaqueo, en fracciones 0-5, 5-12 y 12-20 mm respectivamente, cemento gris tipo CEM I 52,5R, aditivo superplastificante (SP) basado en *éteres policarboxílicos modificados*, los fillers de carbonatos cálcicos Betocarb (Bc) y Betoflow (Bf) y un *filler calizo* como referencia.

Siguiendo el método de dosificación UPC, una vez optimizadas las fases pasta y *esqueleto granular*, se han realizado mezclas de prueba para encontrar el óptimo contenido de pasta que permita alcanzar condiciones estándar de autocompactabilidad; las cuales se han contrastado por medio de los ensayos de *escurrimiento* (Figura 43), con un diámetro final (D_f) del orden de los 600-700 mm, el tiempo de flujo en *embudo en V* (T_V) > 3 seg, ausencia de bloqueo medida el ensayo de *escurrimiento con anillo J*, $(D_f - D_{fJ}) > 50$ mm y ausencia segregación a partir de la observación visual de la masa de hormigón resultante del ensayo de escurrimiento. Las proporciones obtenidas para las tres mezclas se presentan en la Tabla 4.

Componentes (kg/m ³)	Referencia (f/c=0,3)	Betocarb (Bc/c=0,3)	Betoflow (Bc/c=0,25) (Bf/c=0,10)
Cemento CEM I	395	395	395
Filler calizo	118	-	-
Betocarb	-	118	99
Betoflow	-	-	39
Agua	197	197	186*
Arena 0-5	914	914	904
Grava 5-12	431	431	481
Grava 12-20	317	317	259
Superplastificante	7,1	7,1	7,1
Relación a/c	0,50	0,50	0,50

*Agua incorporada descontada

Tabla 4. Materiales y componentes utilizados en la campaña experimental.



Figura 43. Ensayo de escurrimiento.
 a) filler de referencia, b) Betocarb y c) Betoflow

Una vez obtenidos los HACs, se han moldeado probetas cilíndricas de 150×300 mm, para la evaluación de la *resistencia a compresión* a 12 horas, 1, 7 y 28 días, probetas prismáticas de 75×75×275 mm para la evaluación de la *retracción por secado* hasta la edad de 6 meses y probetas prismáticas de 100×100×400 mm para la evaluación de la *profundidad de carbonatación* a los 5 meses (Figura 44) Una vez desmoldadas, a todas las probetas fabricadas se les realizó una evaluación visual del acabado conseguido. Las probetas cilíndricas se mantuvieron en cámara húmeda a una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 98±2%HR, hasta la edad de ensayo. Las probetas prismáticas para retracción se mantuvieron sumergidas en agua hasta la edad de 33 días, y aquellas que se utilizaron para investigar la carbonatación fueron sometidas hasta la edad de 64 días, para después ser trasladadas a la cámara de control ambiental con una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 50%HR, durante el transcurso de los ensayos.



Figura 44. Llenado de probetas de la etapa experimental.

Como se puede observar en la Figura 45, las probetas prismáticas utilizadas para evaluar la retracción, han sido instrumentadas con puntos DEMEC, estos equipos son unos puntos que se fijan a la cara a medir de la probeta con un adhesivo especial X60; y las deformaciones son obtenidas con un micrómetro mecánico, con una exactitud de medida de 150 μm .

La *profundidad de carbonatación* ha sido evaluada mediante el método de teñido con fenolftaleína (UNE 112-011-94), permitiendo el ingreso de CO_2 solo a través de 2 de las caras longitudinales de la probeta, los 4 lados restantes, como se indica en la Figura 46, fueron sellados con una imprimación de pintura antihumedad (en color rojo).

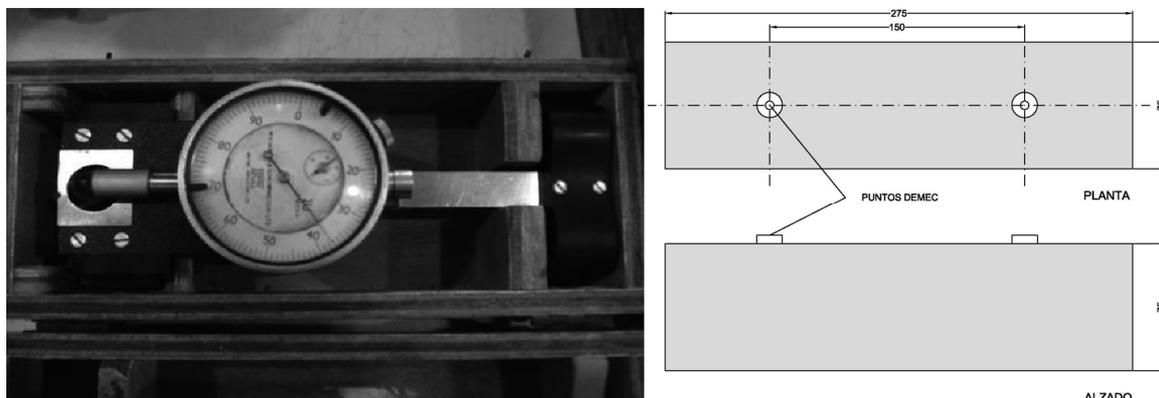


Figura 45. Probetas con puntos DEMEC y micrómetro mecánico

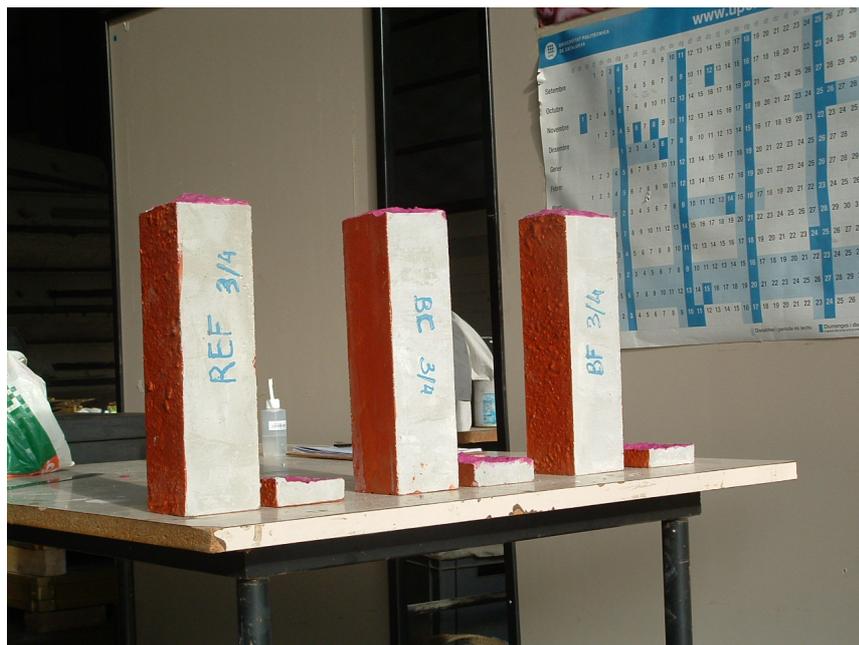


Figura 46. Probetas para la evaluación de la profundidad de carbonatación.

4.1.3 Resultados

Para caracterizar la autocompactabilidad se emplearon los ensayos estándares más difundidos; tales como el de *escurrimiento*, midiendo el diámetro final (D_f) y el tiempo en alcanzar un diámetro de 500 mm (T_{50}), el escurrimiento con *anillo J* realizando determinaciones similares (D_J y T_{50J}) y el *embudo en V*, midiendo el tiempo de vaciado (T_V)

Como se puede observar en la siguiente Tabla 5, las tres mezclas presentaron un adecuado escurrimiento. Para la misma dosis de aditivo superplastificante (SP) y resto de componentes, la mezcla con Betocarb presenta mayor valor de diámetro final (D_f) que la mezcla de referencia. La diferencia entre los valores de escurrimiento y escurrimiento con anillo J ($D_f - D_{fJ}$), han sido en todos los casos inferiores a 50 mm, lo cual indica una adecuada resistencia al bloqueo. Los valores de escurrimiento de la mezcla Bf, ligeramente inferiores a la de referencia, se deben, fundamentalmente al contenido inferior (-28%) de SP. No se ha observado ningún indicio de segregación a partir de la observación visual del ensayo de escurrimiento.

Ensayos		Referencia	Betocarb	Betoflow
Eskurrimiento	D_f (mm)	665	730	615
	T_{50} (s)	2,0	1,5	1,9
Anillo J	D_{fJ} (mm)	640	725	625
Embudo V	T_V (s)	4,2	3,3	3,1
$D_f - D_{fJ}$ (mm)		25	5	10

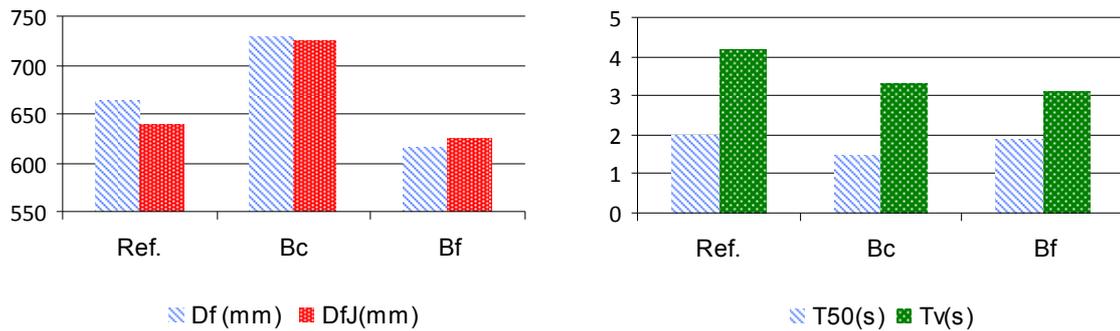


Tabla 5. Resultados de los ensayos de autocompactabilidad.

4.1.3.1 Acabados

Las probetas cilíndricas y prismáticas moldeadas con las mezclas indicadas en la Tabla 4, han sido desmoldadas a las 24 horas, instante en el que se realizó la evaluación del acabado alcanzado.

Como se puede observar de la Figura 47, donde se muestran tres probetas con las condiciones medias de cada dosificación, se evidencian claras diferencias entre las tres mezclas. En términos de burbujas superficiales, las probetas de HAC con Bc y Bf han presentado un acabado más terso que las del hormigón de referencia. Incluso las de HAC con Bf que presentaron un menor valor de escurrimiento. Es de destacar el color más blanquecino de las probetas de HAC con Bc, lo que puede resultar de significativa importancia en el caso HACs arquitectónicos.



Figura 47. Acabado superficial de los diferentes HAC.

4.1.3.2 Resistencia a compresión

Las probetas cilíndricas para el ensayo a compresión fueron refrentadas con una mezcla en base a grafito y azufre en ambas caras (Figura 47), según UNE: 83303 y ensayadas en una máquina IBERTEST de 300 TN. Los ensayos de resistencia a compresión se han iniciado a las 12 horas de su moldeado, con el fin de valorar la importancia que puede tener la resistencia a edades tempranas en aplicaciones de prefabricación. La Figura 48, muestra la evolución de la resistencia a compresión (f_c) hasta la edad de los 28 días.

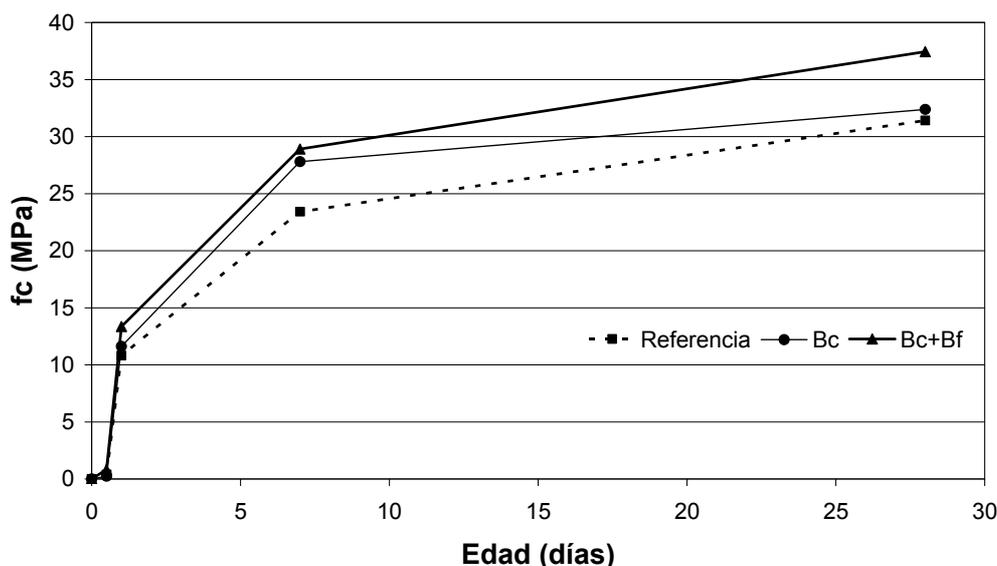


Figura 48. Evolución de la resistencia en el tiempo de probetas ensayadas en la campaña experimental.

Como se puede observar en la Figura 48, en las tres dosificaciones de HAC se han conseguido resistencia a las 24 horas por encima de los 10 MPa. Los HACs elaborados con Bc y Bf han presentado una mayor velocidad en la ganancia de resistencia hasta los 7 días de edad. A los 28 días de edad, las probetas de HAC conteniendo Bc y Bf han presentado valores de resistencia a compresión por encima del HAC de referencia; presentando los HAC con Bf los valores más elevados de todos ellos. El anterior hecho, se fundamenta en el significativamente menor tamaño de partícula del Bf, que conlleva un mayor llenado de los microporos y, por tanto, un mayor nivel de compacidad.

4.1.3.3 Retracción

Como ya fue mencionado anteriormente, se ha evaluado la retracción que han experimentado probetas moldeadas de los tres HACs fabricados para su caracterización. Dichas probetas han sido colocadas en cámara de control ambiental, a 20° C y 50% de humedad relativa (HR) En la Figura 49 se pueden observar las deformaciones producidas por la retracción en función del tiempo. Estos ensayos se han prolongado hasta los 113 días posteriores a su curado.

Este período de tiempo, se puede considerar que ha generado la mayor parte de la deformación por retracción.

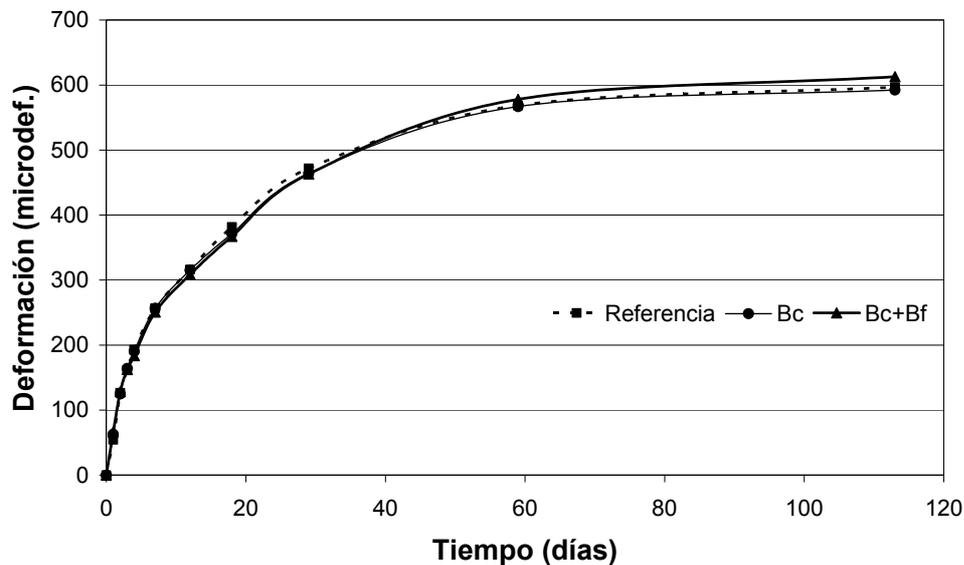


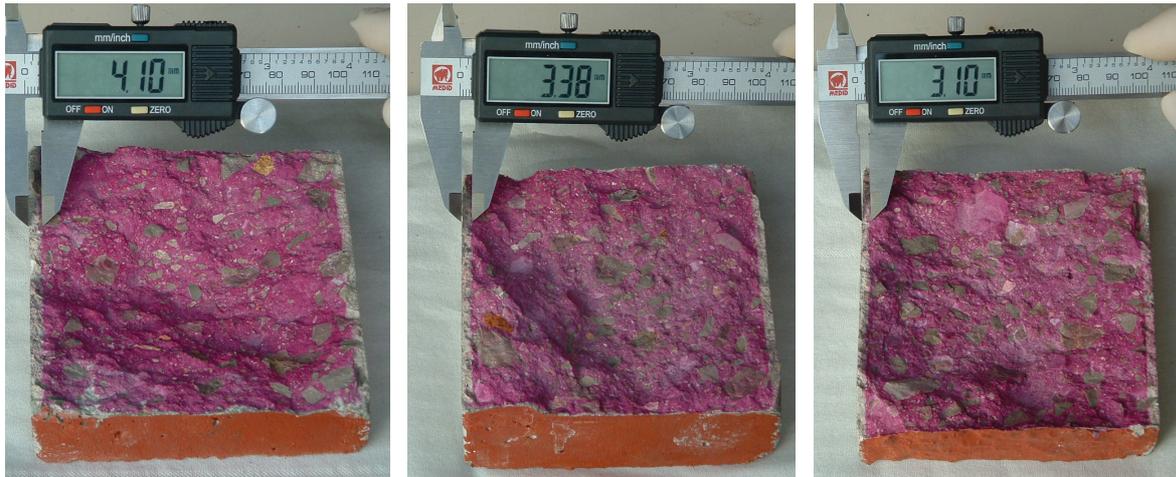
Figura 49. Evolución de la retracción en el tiempo.

Como se puede ver en la Figura 49, las tres mezclas de HAC mostraron valores equivalentes de retracción total, con medidas en torno a las 600 $\mu\text{m}/\text{m}$ a los 113 días.

La despreciable diferencia entre los comportamientos observados se debe, por un lado al hecho de que los tres HACs poseen un contenido de pasta muy similar, y por otro, a que su *esqueleto granular* corresponde al de máxima compacidad.

4.1.3.4 Profundidad de carbonatación

Para determinar la profundidad del frente de carbonatación, se realizó el ensayo de pulverizado con solución de fenolftaleína (UNE112-011-94). En la Figura 50, se muestran los perfiles de carbonatación para las probetas mantenidas en cámara de control ambiental. Como se puede observar, las probetas con Betoflow han presentado las menores profundidades de carbonatación a la edad de 5 meses (3,10 mm), seguidas del HAC con Betocarb (3,38 mm) y por último, el HAC de referencia con filler calizo (4,10 mm). De esta manera, se evidencia una significativa mejora de esta propiedad de durabilidad en el caso del hormigón con Bf con respecto al hormigón de referencia; de hecho, una reducción de más del 30% en la profundidad de carbonatación, comportamiento que puede justificarse por la mayor compacidad del material, producto de la finura del Bf.



De izquierda a derecha: HAC de referencia, HAC Betocarb y HAC Betoflow.

Figura 50. Perfiles de carbonatación de las probetas ensayadas.

4.1.4 Conclusión referente a la caracterización básica de HACs con diferentes tipos de fillers

Del estudio antes presentado, en el cual se ha analizado la influencia de los *carbonatos cálcicos micronizados* en polvo y en slurry (Betocarb y Betoflow), tanto en las características de fluidez y cohesión a nivel de la pasta, y la repercusión sobre la capacidad de fluir de estos, de la resistencia al bloqueo, y de la estabilidad a nivel hormigón, en donde se han evaluado tanto aspectos prácticos y estéticos como distintas propiedades físico-mecánicas, nos ha permitido alcanzar las siguientes conclusiones:

1. Los HACs conseguidos han presentado adecuadas medidas de autocompactabilidad, valores de fluidez en el rango medio, apropiada resistencia al bloqueo y no han mostrado signos de segregación.
2. En términos de acabado superficial, los HAC con Bc y Bf han presentado un acabado con menos burbujas en superficie que las del HAC de referencia. Es de destacar el color más blanquecino de las probetas de HAC con Bc, lo que puede resultar de significativa importancia en el caso HACs arquitectónicos.
3. Los ensayos de resistencia sobre las probetas que contenían los dos fillers analizados, han presentado valores de resistencia a compresión por encima del HAC de referencia.
4. Los tres HACs mostraron valores equivalentes de retracción total, con valores que rondan las 600 $\mu\text{m}/\text{m}$ a los 113 días.
5. Los HACs con Bc y Bf presentaron una profundidad de carbonatación menor que el HAC de referencia después de 5 meses de exposición.

6. Las mejoras conseguidas en las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad analizadas, a través del uso de los *carbonatos cálcicos micronizados* en polvo y en slurry, pueden imputarse, por un lado, a la blancura y propiedades controladas de los productos, y por otro, al menor tamaño de partícula del Bf, que redundaba en una estructura de microporos más compacta, con las consecuentes ventajas asociadas.

4.2 FLUENCIA DEL HAC REFORZADO CON FIBRAS EN CONDICIÓN FISURADA

Como se ha mencionado, la temática de este apartado forma parte de líneas de investigación de gran actualidad; en este proyecto se estudia la fluencia o deformación en el tiempo bajo la acción de una carga constante de elementos fisurados. Más precisamente, se estudia sobre la evolución de la apertura de fisura bajo la acción de solicitaciones de flexión constantes. Dado el estado de fisuración y las condiciones de carga, se conjugan complejos estados tensionales que requieren sofisticadas condiciones de ensayo.

De esta manera, se ha aprovechado la interacción en el LTE-UPC para realizar una investigación bibliográfica sobre el tema y participar en la parte de la campaña experimental que se desarrolló durante la colaboración (debe tenerse en cuenta que los ensayos de fluencia tendrán más de un año de duración). A modo de referencia, se presentan algunos resultados obtenidos y las conclusiones generales hasta el final de la colaboración.

4.2.1 Consideraciones preliminares

El principal beneficio que otorga la introducción de fibras en el hormigón es el de disminuir su fragilidad; esto es, incrementar su *tenacidad*, entendiendo a esta como una medida de la energía consumida durante el ensayo de flexión, y mejorando el control de su fisuración.

Las fibras actúan interceptando las fisuras y retardando así su propagación, si se disponen en suficiente cantidad y están uniformemente distribuidas, evitan la unión de las microfisuras aumentando la resistencia aparente de la *matriz*. De igual forma, disminuyen también el ancho de las fisuras, lo cual es muy favorable para la durabilidad del hormigón. Las anteriores propiedades, dependen de la características, cantidad, distribución y orientación de las fibras dentro del propio hormigón (Torrijos et al., 2005).

Por otra parte, además de disminuir la fragilidad del hormigón, también se las utiliza en el control de la fisuración por contracción, puesto que aumentan la resistencia al impacto, fatiga y aumentan la resistencia al fuego en hormigones de alta resistencia; en consecuencia, aporta un beneficio directo en las propiedades del estado endurecido del hormigón. En función del uso que la fibra deba prestar,

se elige la fibra más adecuada en lo que respecta a dimensiones, geometría de éstas y material del que deben estar hechas.

Como se demuestra en la bibliografía técnica consultada, es posible sustituir o reforzar la armadura convencional con el refuerzo de fibras para mejorar la capacidad resistente al corte y lograr un comportamiento más dúctil (Zerbino et al., 2000; Barragán, 2000; Tobes et al., 2007) En la actualidad, se han desarrollado fibras sintéticas estructurales que pueden competir, en ocasiones, con las fibras de acero usadas con más frecuencia.

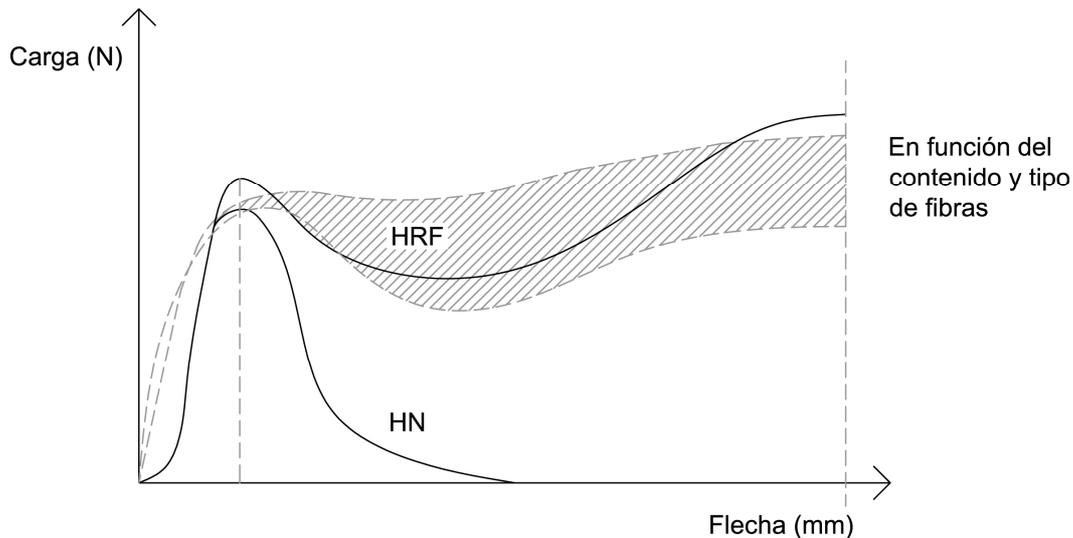


Figura 51. Incidencia de las fibras en el comportamiento a flexotracción.

A modo de ejemplo de lo anterior, la Figura 51 grafica el efecto de la presencia de fibras en el hormigón resultante de un ensayo de flexotracción. Como se puede analizar en este gráfico, la resistencia de un hormigón reforzado con fibras (HRF) no disminuye bruscamente a partir del inicio de la fisuración, contrariamente a lo que sucede con un hormigón convencional (HN). Es por ello, que la presencia del refuerzo de fibras modifica sustancialmente la respuesta mecánica del material, confiriéndole mayor *tenacidad*, de este modo, resulta especialmente adecuado para prevenir situaciones donde se requiere el control de los procesos de fisuración. Por este motivo, y como se puede deducir de la Figura 51, el análisis para evaluar un HRF no se limita únicamente a la resistencia, sino que resultará indispensable analizar el comportamiento postpico y las ganancias en *tenacidad*.

A menudo se utiliza el hormigón reforzado con fibras (*fibre reinforced concrete* en inglés) en las aplicaciones de revestimientos de túneles, pavimentos y soleras industriales. Sin embargo, la utilización de fibras como reemplazo parcial o total de las barras de armadura convencional en elementos con responsabilidad estructural, es limitada. Esta situación se debe, en parte a la inexistencia hasta hace pocos años de instrucciones oficiales para el cálculo con dicho material, una situación que a su vez derivaba de una incompleta caracterización a escala material, de donde obtener parámetros robustos para el diseño estructural.

En este sentido, han sido importantes los avances conseguidos a partir de las primeras recomendaciones de RILEM para la ejecución del ensayo de flexotracción (RILEM, 2002), actualmente Norma UNE-EN 14651/2007, y sucesivamente las correspondientes instrucciones para el cálculo con la respuesta obtenida a partir de dichos ensayos (RILEM, 2003).

Dicho método de cálculo considera la posibilidad de fisuración en servicio, pero no tiene en cuenta el comportamiento diferido, a largo plazo, de los elementos en situación fisurada. En este sentido, resultan importantes las conclusiones alcanzadas por algunos investigadores (Granju J.L., et al.; 2000), quienes indican que las instrucciones de cálculo que ignoren el comportamiento diferido resultarán inadecuadas. Al mismo tiempo, los autores observan que la fluencia en flexotracción en condición fisurada de los hormigones reforzados con fibras de acero, se estabiliza después de 6 meses de carga sostenida y que la misma, si bien afectaría las deformaciones, no pondría en juego la seguridad estructural, lo que sí ocurriría en el caso de sollicitaciones de fatiga. En sus ensayos, dentro de los escasos estudios sobre el tema, ambos tipos de sollicitaciones producen significativos incrementos de las aperturas de fisura.

Esta investigación tiene por objetivo indagar acerca de la respuesta bajo cargas de larga duración de un HRF previamente fisurado. Para ello se elaboró un hormigón autocompactante (HACRF) al que se le incorporaron 40 kg/m³ de fibras de acero tipo “hooked end” de 50 mm de longitud y 1 mm de diámetro. Se moldearon vigas de 150 x 150 x 600 mm y probetas cilíndricas para valorar la resistencia a compresión. En primer lugar se ensayaron 3 vigas en flexión de acuerdo a la propuesta del RILEM TC 162. Luego siguiendo un proceso de carga similar se provocó una fisura (pre-ensayo) en otras vigas hasta alcanzar aperturas (CMOD) iguales a 0.2, 0.2, 1.0, 1.5 o 3.5 mm. Dichas vigas fueron sometidas a cargas de flexión de larga duración utilizando una disposición en cuatro puntos (carga a los tercios). La CMOD fue monitoreada durante varios meses mediante transductores tipo LVDT ubicados en la zona traccionada. En el estudio se consideran diferentes niveles de tensión respecto a la carga de primera fisura del hormigón y de la tensión a la cual se detuvo el pre-ensayo.

4.2.2 Materiales y propiedades en estado fresco y endurecido

Para caracterizar las propiedades de autocompactabilidad en estado fresco se han empleado los ensayos de *escurrimiento*, midiendo el diámetro final (D_f) y el tiempo en alcanzar un diámetro de 500 mm (T_{50}), el *escurrimiento con anillo J* realizando determinaciones similares (D_J y T_{50J}) y el *embudo en V*, midiendo el tiempo de vaciado (T_V).

En el estudio realizado, se analizó la respuesta bajo cargas de larga duración de un hormigón reforzado con fibra (HRF) en el cual se inducía previamente un fisurado. Para ello, se elaboró un hormigón autocompactante con componentes y con resultados de las propiedades en estado fresco, indicados en la Tabla 6 y, al que se le incorporaron 40 kg/m³ de fibras de acero tipo “hooked end”, es decir, con patas de anclaje de 50 mm de longitud y 1 mm de diámetro. Dichos elementos se moldearon vertiendo el hormigón desde la zona central de los

moldes; en total se realizaron 21 vigas de 150x150x600 mm con el objeto de caracterizar la resistencia y tenacidad en flexión, de igual forma, se obtuvieron probetas cilíndricas de 150x300 mm para valorar la resistencia a compresión.

Transcurridos los 28 días de curado en cámara de control ambiental, las probetas fueron sacadas de la cámara y estacionadas al aire en ambiente de laboratorio durante 6 meses, con la finalidad de completar prácticamente el proceso de evolución de la resistencia, de este modo, se aseguraba que no existieran diferencias significativas entre las distintas probetas ensayadas a lo largo del estudio; el cual prolongó a lo largo de varios meses.

Las probetas cilíndricas refrentadas y ensayadas a compresión a los 28 días, indicaron una resistencia media igual a 45 MPa. Dichos ensayos a compresión, se realizaron siguiendo las directrices de la normativa UNE 8330:1984.

Componentes y proporciones(kg/m ³)	
Cemento CEM II	455
Filler calizo	-
Agua	160
Arena	940
Grava	775
Superplastificante	7
Fibras de acero	40

Ensayos en estado fresco		
Escurrimiento	D _f (mm)	608
	T ₅₀ (s)	2,2
Anillo J	D _{fJ} (mm)	540

Tabla 6. Proporciones y resultados del estado fresco del HACRF utilizado en la campaña experimental.

4.2.3 Pre-ensayo a flexotracción para hormigones reforzados con fibras

Para caracterizar la tenacidad de los hormigones con fibras se han desarrollado diferentes métodos de ensayo, siendo frecuentemente utilizado el *ensayo a flexotracción* (Zerbino et al., 2000)

Dicho ensayo, requiere de un sistema servohidráulico (sistema INSTRON, ver Figura 53) con capacidad de establecer un control, al que se lo denomina de “lazo cerrado”, adoptando como variable de control la *apertura de la fisura* (CMOD, *crack mouth opening displacement*, en inglés). Un control por “lazo cerrado” significa que las acciones sobre las probetas dependen de la respuesta a la deformación del material ensayado. El sistema servohidráulico está regulado por señales de deformación de los extensómetros que regulan la aplicación de la carga del cabezal de la máquina, de forma tal, que provocan una velocidad prefijada de la apertura de la entalla. Los transductores de desplazamiento o extensómetros son dispositivos que se utilizan para medidas de desplazamientos, y que convierten una señal física de entrada, como es la variación de posición, en

una salida de tipo eléctrico, para este ensayo se utilizaron transductores del tipo “Clip” (Figura 52)

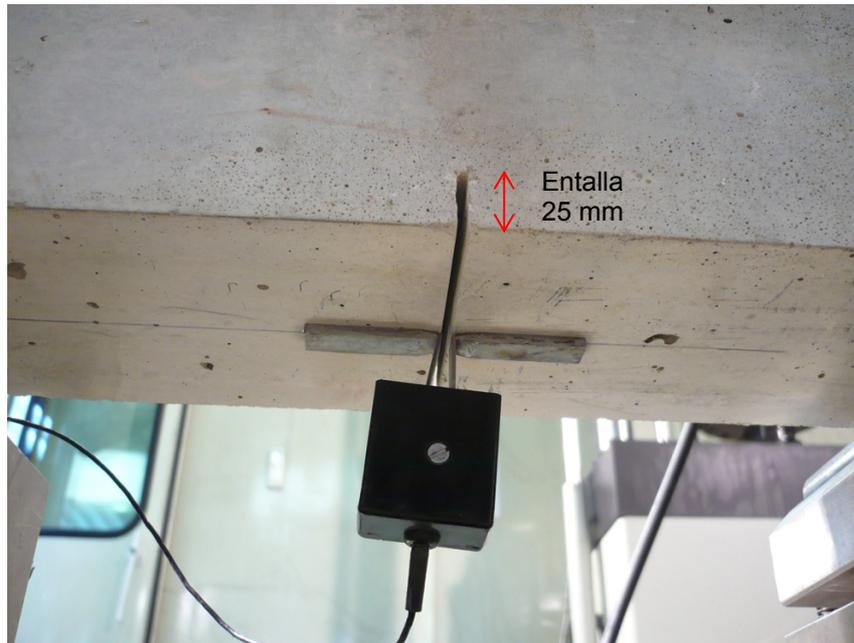


Figura 52. Transductor de desplazamiento tipo CLIP.

La evaluación del comportamiento en flexión se realizó en base a la propuesta de ensayo de la normativa RILEM TC-162 (2002) para “*Ensayos a flexión en hormigones reforzados con fibras*”, el cual permite utilizar probetas prismáticas de dimensiones 150x150x600 mm con una entalla de 25 mm de profundidad en la cara traccionada, en coincidencia con el centro de la carga, esta permite medir la apertura de fisuras.

La característica particular, de las probetas fabricadas para el ensayo, es que en la parte central se debe realizar una entalla, y a diferencia de otras vigas, la deformación se localiza en el plano de la misma y el resto de la probeta no experimenta deformaciones significativas.

El ensayo de fisuración o pre-ensayo, se realiza con una aplicación de carga central a una velocidad constante de desplazamiento, y se indica como opcional la medida del CMOD sobre la entalla.

Previamente se ensayaron 3 vigas en flexión para obtener la carga de fisura, con este primer ensayo, se obtiene una flecha máxima de referencia para las demás probetas. Una vez obtenida la flecha límite, se promedian los resultados y se obtiene la media del CMOD o *valor de control de la apertura de fisura*. Siguiendo un proceso de carga similar, se induce la fisura a las restantes vigas hasta alcanzar las aperturas deseadas.

El ensayo fue realizado en una máquina INSTRON (Figura 53) midiéndose la apertura de fisura mediante un extensómetro del “tipo Clip” ubicado en el tramo medio del ancho de la viga, en la Figura 53, se muestra el dispositivo de medición

utilizado. El control del ensayo fue hecho a través de la apertura de fisura. Previamente las vigas fueron entalladas hasta una profundidad de 25 mm con una sierra de corte vertical. De estos ensayos, se obtuvieron las resistencias a primera fisura (f_{L1}), última (f_M) y las resistencias residuales para aberturas de fisura (f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} y f_{R4}), respectivamente.

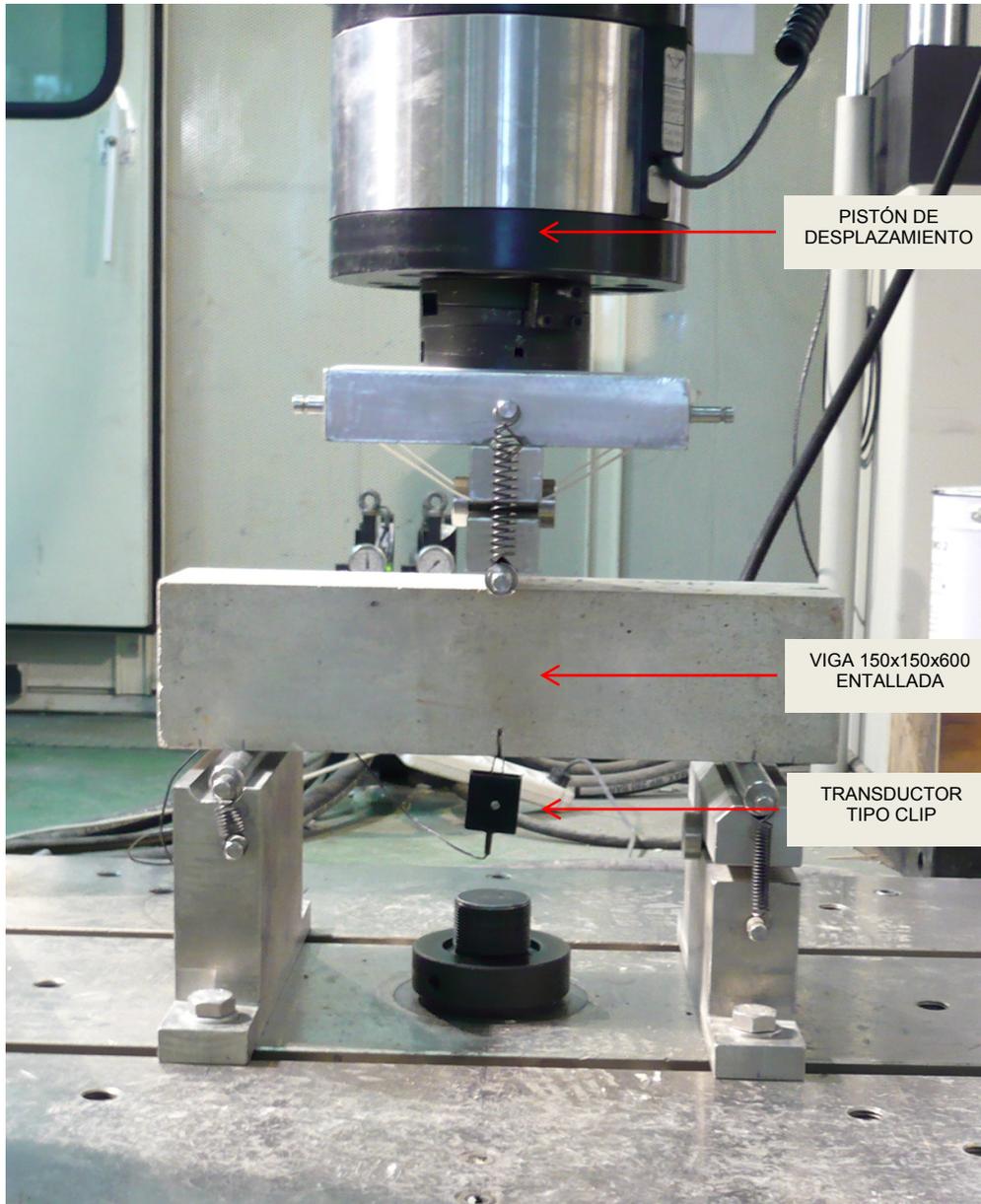


Figura 53. Pre-ensayo de flexotracción en el sistema Instron.

En la Tabla 7, se pueden observar los valores medios de dichos parámetros. La Figura 54-a muestra la respuesta típica observada durante el ensayo completo de la Norma EN 14651, y las Figura 54-b y Figura 54-c, dicho ensayo hasta diferentes aperturas de fisura, aproximadamente 1.0 mm y 0.5 mm respectivamente (las probetas de este último tipo continuaron luego sometidas a solicitaciones de flexión constante en los bastidores de fluencia).

	f_L (MPa)	f_M (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
Valor medio	4.7	7.5	6.5	7.1	6.4	5.8
Desviación estándar	0.29	1.21	1.15	0.66	0.75	0.64
COV (%)	6	16	18	9	12	11

Tabla 7. Valores medios de los resultados de los ensayos de caracterización.

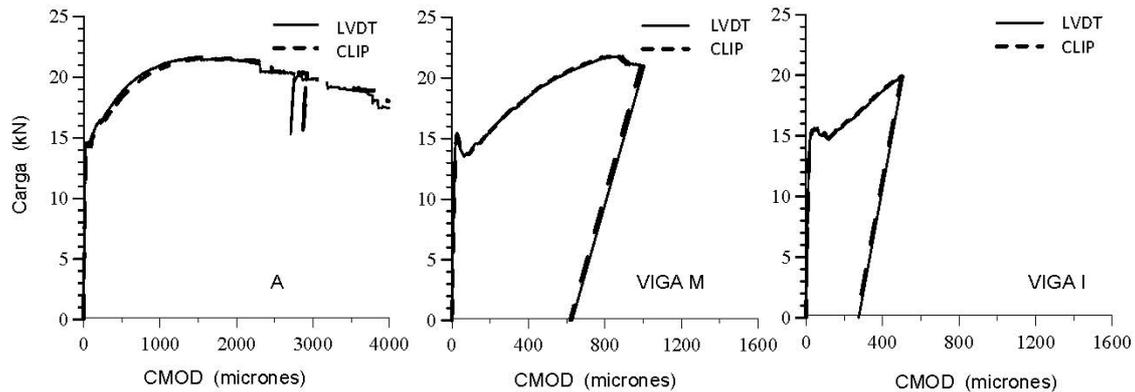


Figura 54. Respuesta completa del ensayo de flexotracción según EN 14651 (a) y respuesta del ensayo interrumpido a 1.0 mm, viga I (b) y 0.5 mm, viga M (c)

4.2.4 Ensayo a flexión de larga duración

Para este apartado, fueron utilizadas las vigas anteriormente ensayadas sometiéndolas a cargas de flexión de larga duración, en donde la apertura de fisura CMOD fue monitoreada durante varios meses mediante transductores de desplazamiento o extensómetros, que para el presente ensayo fueron del tipo LVDT, ubicados en la zona traccionada (Figura 55)

Uno de los objetivos buscados de este ensayo, es la respuesta de los HACRF en su comportamiento en condición fisurada a larga duración. Por ello, y una vez fisuradas las vigas, fueron colocadas sobre unos instrumentos especialmente diseñados para el ensayo denominados “pórticos”, donde fueron sometidas a cargas sostenidas a tensiones constantes. En este caso se adoptó una disposición de carga a los tercios con una luz de ensayo igual a 450 mm. A partir del pre-ensayo, se calculó la carga a los tercios que provocaría una tensión equivalente a la del fin de ensayo.

Para realizar el ensayo de flexión, se utilizaron las 21 vigas restantes. Como hemos indicado con anterioridad, fue controlada la flecha midiendo la apertura de fisuras por medio de un extensómetro tipo LVDT (con un recorrido de ± 5 mm) que se fijó sobre una cara lateral, a 10 mm de la fibra traccionada y en el centro de la viga. En la Figura 55 siguiente, se puede observar el transductor de desplazamiento situado en posición horizontal.

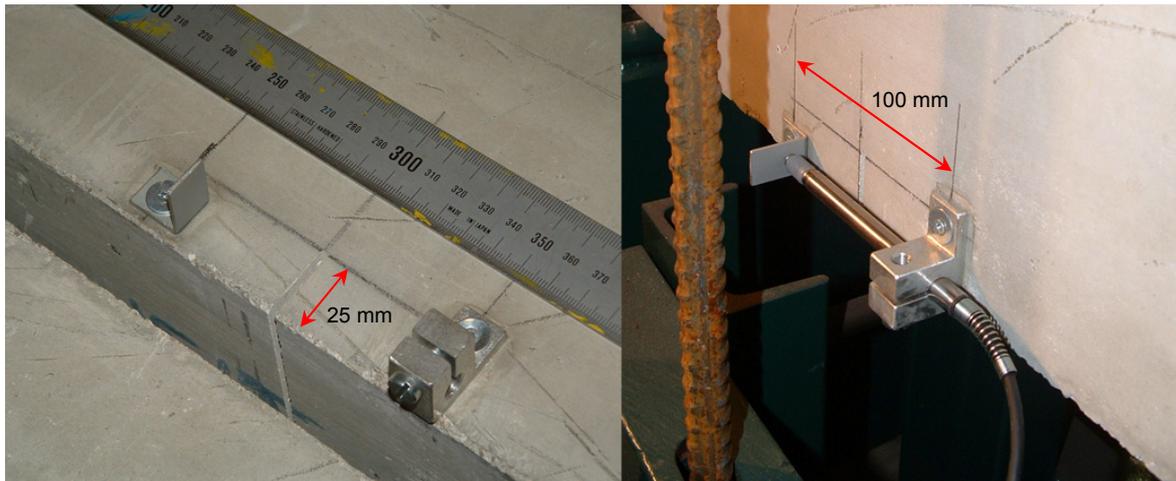


Figura 55. Viga entallada (izq.) y LVDT (der.)

Para la toma de testimonios; se utilizó un sistema de adquisición de datos de 20 canales donde los canales 1 a 13 corresponden a LVDTs, los canales 14 a 18 a celdas de carga (una por pórtico) que permiten controlar el peso de la carga a la que están sometidas las vigas durante el ensayo, y por último los canales 19 y 20, fueron utilizados para los sensores de temperatura y de humedad.

En esta ocasión, se utilizaron 5 pórticos con tres vigas cada uno, cuyas características y dimensiones se muestran en la Figura 56.

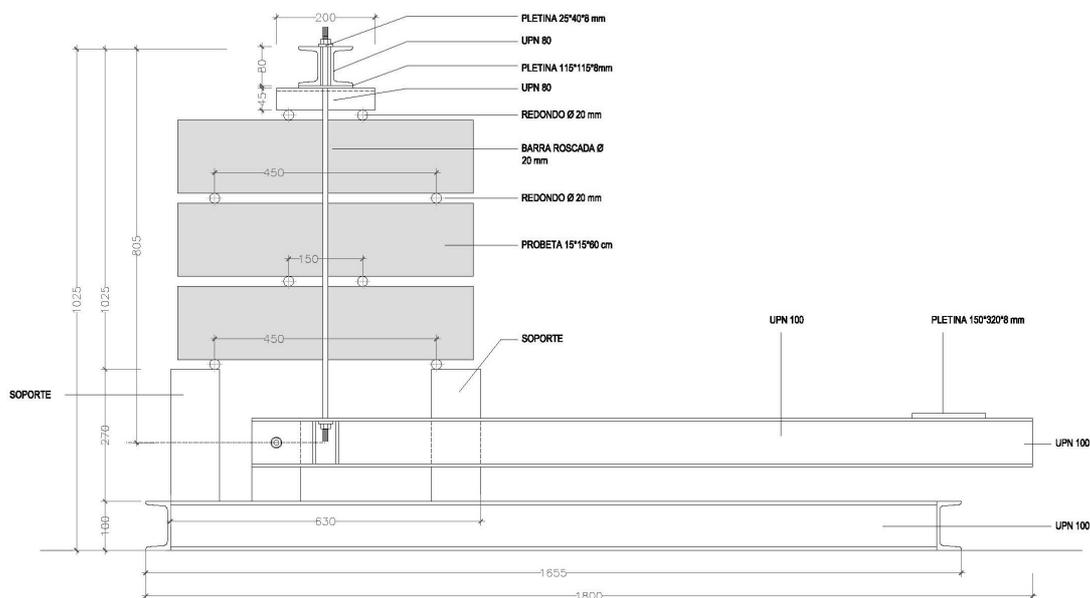


Figura 56. Esquema general de los pórticos utilizados para el ensayo a flexión de larga duración.

En la Figura 57, se muestra el diseño y las dimensiones de los pórticos, la situación de las vigas y la disposición de los elementos de medición, en el

extremo derecho del bastidor se disponen las piezas rectangulares de acero de 50 kg c/u que permite que las cargas sean permanentes.

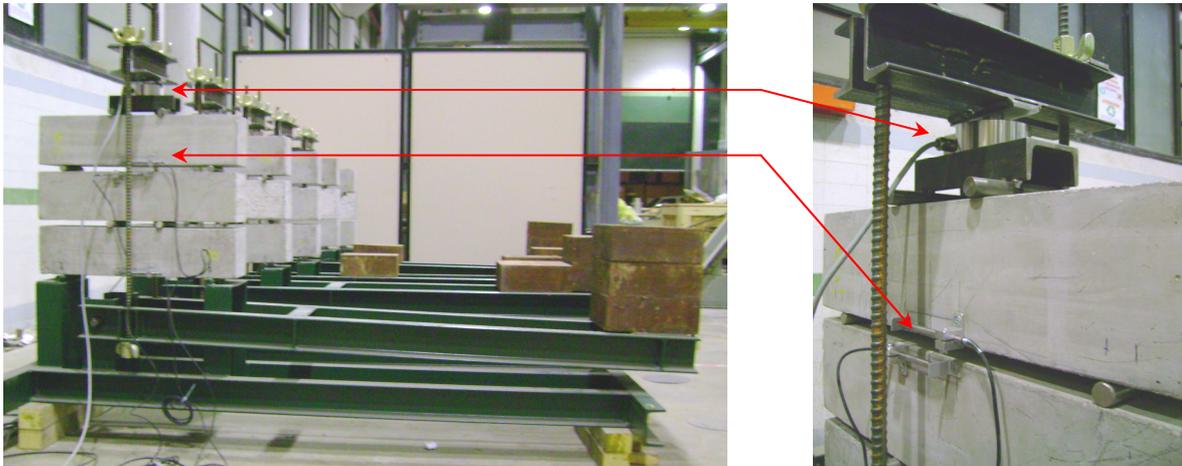


Figura 57. Diseño del pórtico y situación de las vigas.

En la Figura 58 se ilustra la disposición de los dispositivos para la medición de cargas y deformaciones de este ensayo. Para estas últimas probetas, se dejaron los mismos LVDT mientras que las cargas fueron monitoreadas y registradas a través de celdas de carga.

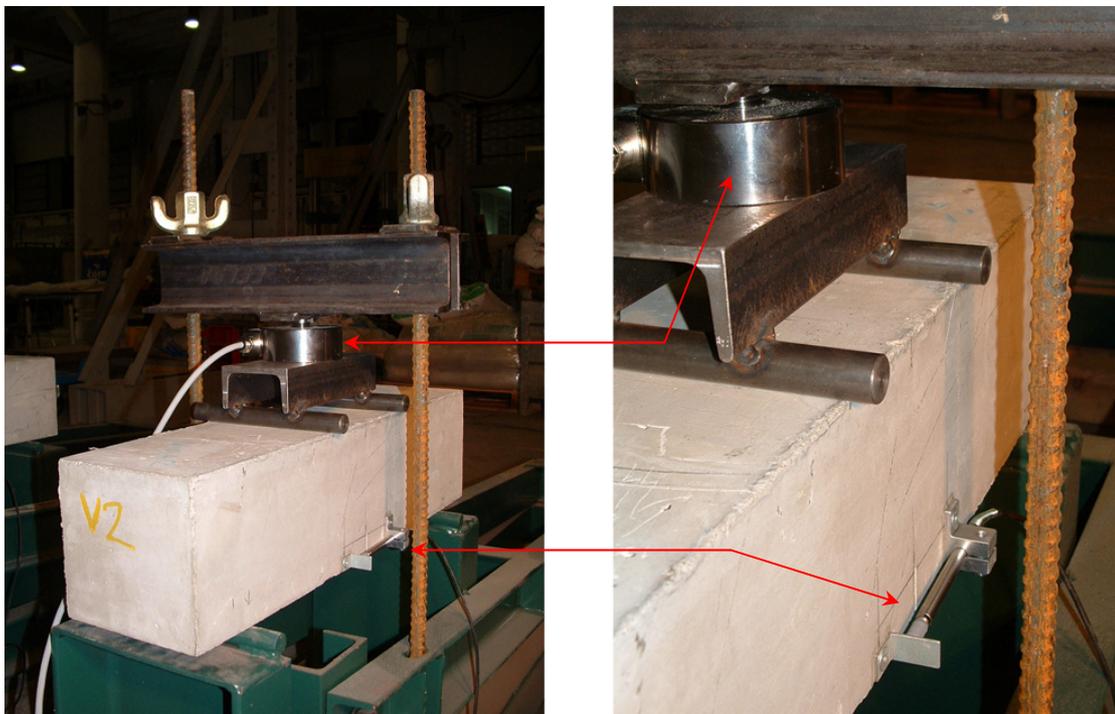


Figura 58. Detalles de LVDT y celdas de carga.

A continuación se presenta en la siguiente Figura 59, un gráfico en el que se muestran las variaciones de temperatura y humedad ambiente registradas durante el tiempo que las vigas estuvieron sometidas a cargas de larga duración. Asimismo, se incluye el registro de un LVDT de una viga sin carga. En dicho gráfico, es posible apreciar que no existe una variación significativa de la temperatura y que las condiciones ambientales no afectan de forma significativa las deformaciones sobre las vigas.

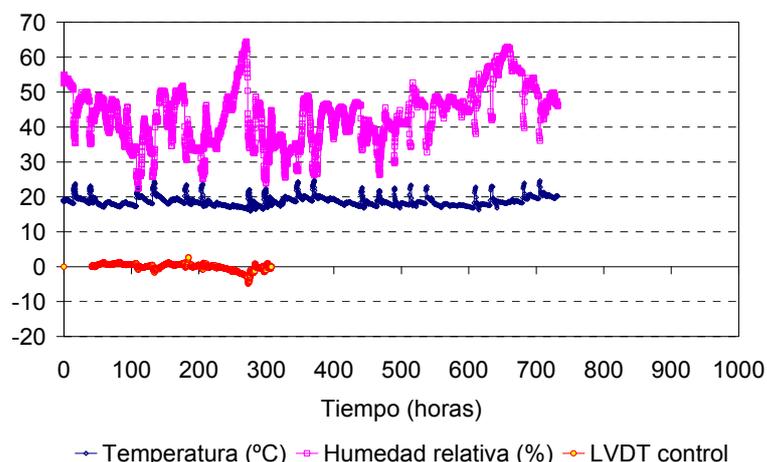


Figura 59. Variaciones de temperatura y humedad ambiente.

En la Tabla 8 siguiente, se presenta una síntesis de los ensayos de larga duración obtenidos en esta campaña experimental. Se indican la identificación de cada viga y la fisura del pre-ensayo. Asimismo, para cada una de ellas, la carga aplicada se facilita en el momento en el que fue realizada y la tensión correspondiente indicada en MPa, haciendo énfasis en los valores relativos a la carga de primer pico y de fin de ensayo de cada viga. Finalmente se calculó la velocidad de apertura de fisura (en micrones por hora y en mic/h.MPa), que igualmente se aportan en esta tabla.

Viga	Fisura (mm)	Tiempo (h)	Tensión (f) (MPa)	(f/f _L)	(f/f _{final})	Velocidad de apertura de fisura			Observaciones
						(h)	(µm/h)	(µm/h.MPa)	
A	0.2	0 207	5.1 5.1	1.10 1.10	1.01 1.01	150	0.18	0.04	Carga y descarga a las 207 hs.
						400	0.28	0.05	
						1000	0.14	0.03	
						3000	0.04	0.01	
H	0.5	0	5.2	1.08	0.96	250	0.31	0.06	
						3000	0.13	0.02	
I	0.5	0	4.8	1.03	0.81	250	0.38	0.08	
						3000	0.04	0.01	
K	1.0	0	2.6	0.64	0.78	150	1.10	0.42	Fracaso en 1977 hs.
						300	0.64	0.24	
						1200	1.36	0.52	
M	1.0	0	4.4	0.89	0.66	150	0.29	0.07	
						1000	0.12	0.03	
						3000	0.05	0.01	
O	1.5	0	5.0	0.89	0.66	150	0.51	0.10	
						1000	0.15	0.04	
						3000	0.09	0.02	
R	3.5	0	2.6	0.61	0.45	150	0.41	0.16	
						1000	0.04	0.02	
						3000	0.04	0.02	

Tabla 8. Resultados de los ensayos de larga duración.

La Figura 60 presenta el comportamiento general de las anteriores probetas sometidas al ensayo de larga duración obtenidos en esta campaña experimental, para diferentes niveles de apertura de fisura y tensión aplicada. En las mismas, la letra identifica a la probeta, el valor en milímetros la apertura de fisura alcanzada en el pre-ensayo y el valor final la relación entre la tensión aplicada durante el ensayo de fluencia y la máxima alcanzada durante el pre-ensayo. De esta manera, la identificación “H - 0.5 mm - 0.96” corresponde a la probeta H, que fue pre-fisurada hasta una apertura de fisura de 0.5 mm y posteriormente sometida a una tensión constante equivalente al 96% de la máxima registrada durante el pre-ensayo.

Los resultados permiten observar un comportamiento caracterizado por tres escenarios definidos, una primera etapa donde se produce una deformación instantánea en correspondencia con el momento de aplicación de la carga, seguida de un claro incremento de la apertura de fisura en el tiempo bajo carga constante y, en el caso de la probeta “K”, un último escenario donde un rápido incremento de la apertura de fisura bajo carga constante conduce en poco tiempo a la rotura.

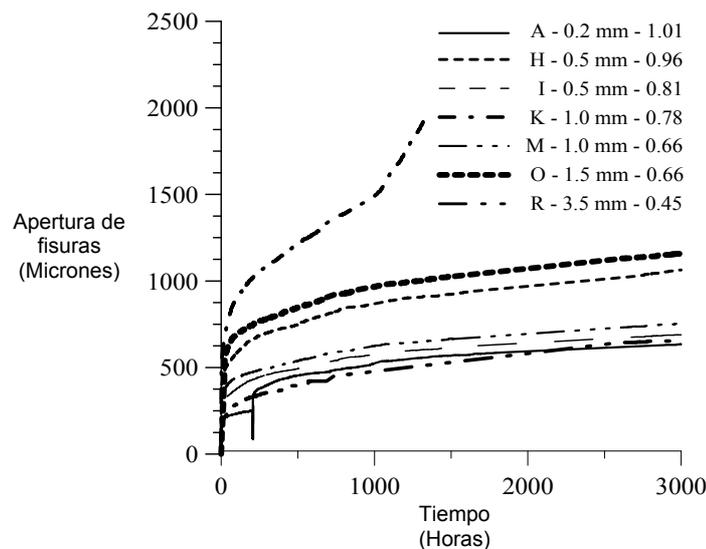


Figura 60. Respuesta apertura de fisura vs. tiempo de probetas sometidas a sollicitaciones de flexión constante.

4.2.5 Conclusiones preliminares referentes al comportamiento mecánico del HACRF

Este trabajo forma parte de las primeras experiencias realizadas en el laboratorio para investigar el comportamiento de los hormigones autocompactantes reforzados con fibras en piezas fisuradas y sometidas a cargas permanentes. Entre las principales deducciones de esta etapa experimental, podemos señalar las siguientes:

1. Al analizar las respuestas de las vigas ensayadas en los pórticos se observó un aporte de las fibras en el control de deformaciones bajo cargas de larga duración, observándose una respuesta estable para pequeñas aperturas de fisura 0.2-0.3 mm, incluso para niveles tensión equivalente a los que produjeron la apertura de fisura inicial durante el pre-ensayo. Para niveles de tensión menores a 0.5, se observó un ligero aumento inicial de la apertura de fisura que luego se estabiliza a velocidades de apertura próximas a cero, asegurando la estabilidad en el tiempo.
2. Se puede observar una respuesta estable incluso para probetas con apertura de fisura de 0.5 mm y niveles tensionales próximos al 100%. Sin embargo, en este último caso se observa un incremento constante de la apertura de fisura en el tiempo, lo que podría ocasionar la entrada en el tercer escenario (inestable) con el transcurso del tiempo.
3. El proyecto que enmarca los estudios presentados contribuirá a proveer de un importante complemento al cálculo estructural con hormigón autocompactante reforzado con fibras.

4.3 TABIQUES PARA VIVIENDAS INDUSTRIALIZADAS HORMIGONADOS IN-SITU

Con la finalidad de comprobar la óptima solución de aplicaciones de hormigón autocompactante en componentes de edificación, se planificaron en el LTE-UPC, una serie de ensayos y aplicaciones en paneles hormigonados in situ.

El caso particular de los componentes verticales de edificación, es una de las aplicaciones donde mayores ventajas se pueden obtener con la utilización de los HAC en cuanto al aumento de su producción y en la mejora de la calidad de los acabados. Las características inherentes al HAC tales como el ritmo continuo y sin interrupciones del vertido, el mejor recubrimiento de las armaduras, la mejora en la calidad de los acabados, y la reducción en el tiempo de ejecución, hacen de éste material, un material idóneo para la realización de muros armados. De hecho, como lo demuestran las aplicaciones actuales (www.imasatec.com), facilita decisivamente el sistema de construcción industrializada tipo “túnel”, donde, en el caso específico de edificación, permite el hormigonado de pilares, muros y forjados en una única fase, sin necesidad de vibradores externos.

Sin embargo, como se ha visto, las características de autocompactabilidad pueden diferir sustancialmente entre HACs, por lo que resultará necesario establecer los rangos adecuados de los diferentes parámetros para asegurar un relleno y acabado acorde con la finalidad. En términos estéticos, son pocas las metodologías disponibles para realizar una evaluación objetiva de los acabados; los métodos propuestos en general se basan en valores comparativos, en función de escalas de defectos y colores definidas, y careciendo de medidas cuantitativas de los diferentes tipos de defectos que pueden aparecer; burbujas, marcas de agua, nidos de grava, etc.

Si bien las consideraciones para el diseño y aplicación del hormigón autocompactante dependerán de las exigencias de acabado y de la altura del muro a hormigonar, en el caso de muretes no pasan a ser significativas; en cambio, sí que lo pueden llegar a ser en muros altos donde la resistencia del encofrado es crucial, dado que la distribución de presiones sobre el mismo durante la colocación puede ser del tipo hidrostático, muy por encima de las presiones generadas por el hormigón convencional.

Es importante asegurar la estanqueidad del encofrado, ya que las altas presiones pueden provocar fugas de la lechada que, al final, producirán nidos de grava en las zonas cercanas a la fuga.

Las pruebas realizadas sobre muros esbeltos tenían fines claramente diferenciados, por una parte se buscaba verificar el éxito de elementos esbeltos hormigonados in situ realizados con este material y que además contasen con la totalidad de las instalaciones desde la obra; y por otra parte, validar la optimización de las mezclas, de los ensayos normalizados para el estado fresco, de las propiedades del estado endurecido, y sobre todo, de la calidad de los propios acabados, por último, la posibilidad de reemplazo de la armadura convencional por fibras, una ambiciosa solución que redundaría en importantes ventajas en términos de productividad al eliminar las tareas de cortado, colocación y control de típico mallazo. En cuanto a la evaluación de la calidad de los acabados, se trabajó conjuntamente con la Universidad Politécnica de Madrid en un método para cuantificar la calidad superficial del hormigón autocompactante.

Los trabajos se abordaron a partir del planteamiento de los siguientes objetivos:

1. Reducción de espesores respecto a los mínimos del sistema constructivo actual; de 100 a aprox. 70 mm.
2. Estudio de la relación entre las propiedades de autocompactabilidad y la calidad de los acabados.
3. Obtención de valores para la calibración de un método de análisis de acabados basado en parámetros cuantitativos.
4. Evaluación de la presión sobre los encofrados ejercida por el HAC.
5. Estudio de las posibilidades de reemplazo de la armadura convencional por fibras; HAC reforzado con fibras.

De esta manera, la aplicación de HAC en componentes muy esbeltos llevado a cabo en el laboratorio, verifica la posibilidad de la utilización del hormigón autocompactante en la producción de elementos de edificación de reducido espesor.

4.3.1 Característica de los paneles

En la Figura 61 se detalla el tipo de encofrados con acabado fenólico utilizados para el ensayo y en la Figura 62 se puede observar el diseño y las dimensiones de los tabiques hormigonados durante la campaña experimental. Estos elementos

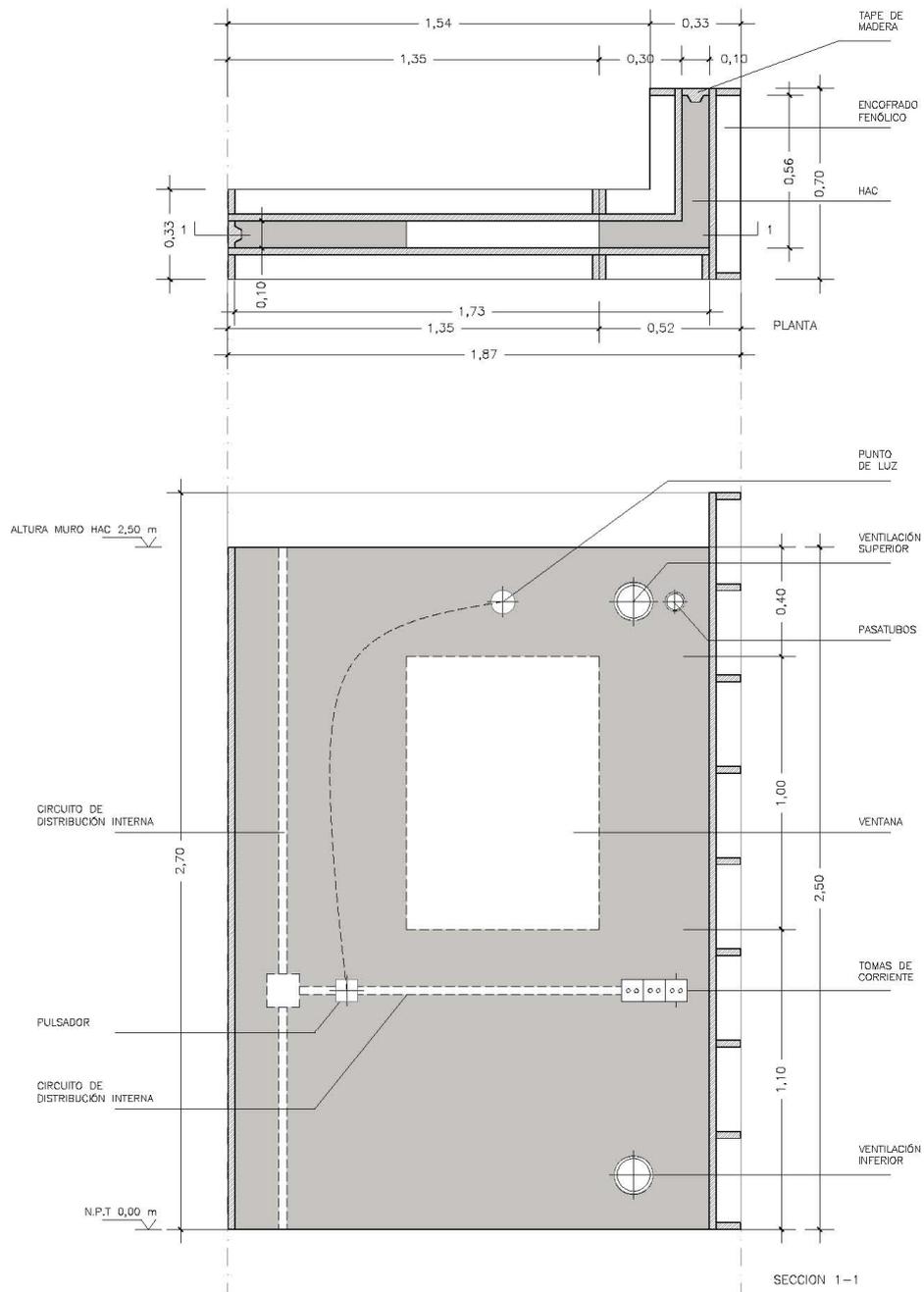
fueron montados en el laboratorio incorporando los elementos geométricos de una esquina y las características de armado de un tabique que incorpora en su interior una ventana de dimensiones 1,00 x 0,80 m; al igual que la previsión de paso de instalaciones y conductos.

Cada panel tiene unas dimensiones de 1,80 x 0,60 metros en planta; 2,50 m de altura y un espesor aproximado de 7 cm. Las razones del diseño de los moldes se eligieron por la dificultad geométrica y la disposición de los huecos en una de las paredes. Para la construcción de los moldes, se utilizaron paneles de encofrados industriales con acabado fenólico de la marca "STEN", antes de cerrar el encofrado, se aplicó con la ayuda de un rodillo el desencofrante que facilitaría el proceso de desmoldar.

En todos los elementos a los que nos referiremos como paneles o tabiques, las conducciones de los servicios, paso de las instalaciones o aberturas en el elemento, fueron colocados con el fin de reproducir lo más fiable posible un requerimiento real del diseño. En la pared más larga del elemento se previó una ventana de 1,00 x 0,60 m de superficie, para satisfacer este requerimiento de realidad experimental.



Figura 61. Aspecto interior y exterior de los encofrados.



			01
TÍTOL DEL PROJECTE	ESCALA: 1/20	NOM DEL PLÀNOL: DETALLE MONTAJE MURO HAC	FECHA JUNIO 2007 NOM FITXER: PANELHAC.DWG

Figura 62. Dimensiones de los tabiques hormigonados.

4.3.2 Programa experimental

El programa experimental contempló, por una parte, la simulación en laboratorio de las condiciones reales del encofrado según las características de la actual solución del sistema constructivo (Pacios, 2009; www.imasatec.com); encofrados, instalaciones, aberturas y armaduras.

Por otra parte, se ha aprovechado la utilización de HAC en los tabiques hormigonados in situ durante la presente campaña experimental, para realizar una serie de ensayos que enumeramos a continuación:

- a) La elección de las mezclas.
- b) Fabricación semi-manual del HAC en camión hormigonera.
- c) Control de recepción.
- d) Fabricación de los elementos.
- e) Medición de presiones sobre los encofrados.
- f) Moldeo y ensayo de probetas.
- g) Evaluación del acabado superficial.

4.3.3 Elección de materiales y mezclas de HAC

En este trabajo se ha partido de dosificaciones de hormigón autocompactante optimizadas según el método desarrollado en la UPC (Gomes, 2002)

Con el objetivo de proveer a la campaña de características asimilables a la realidad del sector, se consideraron mezclas con materiales normalmente disponibles en la zona de Barcelona; arena y dos áridos calizo de tamaño 0-2, 0-5 y 5-12 mm respectivamente, cemento tipo CEM II-42,5, filler calizo, aditivo superplastificante policarboxilato (SP) y aditivo modulador de la viscosidad (AMV). En la dosificación del panel nº4 se utilizaron fibras de acero de 30 mm de longitud y 0,37 mm de diámetro, en el panel nº5 se colocaron fibras de polímeros de 54 mm de longitud y 0,05 mm de diámetro y se introdujo en la mezcla un pigmento rojo de óxido de hierro. Para los paneles 2 y 3 se colocó una malla de acero de refuerzo de 150x150 mm y de 6 mm de diámetro de barras. La Tabla 9 detalla las dosificaciones empleadas para cada uno de los 5 paneles hormigonados.

Asimismo, teniendo en cuenta las dificultades geométricas y en cuanto a obstáculos del elemento a hormigonar, se ha trabajado con un HAC de clase de escurrimiento medio-alto y un tamaño máximo de árido de 12 mm, con el fin de reducir el riesgo de bloqueo.

MATERIAL (kg/m ³)	Panel 2 (HAC)	Panel 3 (HAC)	Panel 4 (HACRF)	Panel 5 (HACRF)
Cemento CEM II 42,5	315	315	315	360
Filler calizo	147	-	147	175
Agua	152	152	152	162
Arena 0-2 mm	685	832	685	697
Arena 0-5 mm	397	397	397	410
Grava 5-12 mm	663	663	663	620
Superplastificante (SP)	10	11	14	10
Modificador de viscosidad (AMV)	-	1.75	-	-
Retardante de fraguado	-	-	-	1.8
Fibras de acero	-	-	30	35
Fibras poliméricas	-	-	-	1-1.5
Pigmento rojo	-	-	-	37.5

Tabla 9. Dosificación de hormigones en paneles prefabricados.

4.3.4 Fabricación del HAC

La fabricación de las mezclas de HAC se realizó parcialmente en planta de hormigón preparado y en el LTE-UPC. Los áridos y el cemento fueron incorporados en la planta y, después de que el camión realizara el trayecto de unos 15 km mezclando estos materiales, se incorporaron en los materiales restantes en laboratorio. A modo de ejemplo, la Figura 63 muestra una imagen del contenedor con el agua y aditivo (razón del color azulado) a ser incorporados en la cuba. En el caso particular del agua, de esta manera se ha conseguido un control más exhaustivo del contenido de agua en el hormigón, al incorporar el agua justa después de evaluar la humedad de la mezcla al llegar el camión al laboratorio.



Figura 63. Agua con aditivo incorporado preparada para ser incorporada en laboratorio a la cuba del camión hormigonera.

4.3.5 Control de recepción

Una vez incorporados todos los materiales en la cuba del camión hormigonera, se procedió al mezclado a velocidad de carga durante un lapso de unos 5-10 minutos. Posteriormente, y previo a la colocación del HAC, se realizaron los ensayos de escurrimiento, escurrimiento con anillo, caja en L y embudo en V. En algunos casos, los resultados de estos ensayos condujeron a la re-dosificación de aditivo para alcanzar el rango de fluidez adecuado.

La Tabla 10 resume las medidas de autocompactabilidad de los HAC correspondientes a 3 de los 5 paneles fabricados y la Figura 64 muestra el aspecto típico del material después del ensayo de escurrimiento para el caso del HAC del panel 2 y 5, junto con la ejecución del ensayo de embudo en V.

4.3.6 Fabricación de los elementos

Una vez realizados los ensayos de control y alcanzado el rango de autocompactabilidad predefinido, los HAC fueron colocados por medio de un cubilote de 250 litros, que vertía el hormigón en forma de caída libre a un ritmo constante y desde una altura aproximada de 3m, después de atravesar un embudo guía, Figura 65. El hormigón se vertió desde un extremo hasta que el material alcanzó la parte superior, posteriormente el embudo se fue trasladando hasta alcanzar la altura de 2,70 m a lo largo de toda la pieza.

Ensayos		Panel 2	Panel 3	Panel 4
Escurrimiento	T ₅₀ (s)	2	2	3
	D _f (mm)	690	680	745
Embudo V	T _v (s)	9	10	136
	T _{v-5min} (s)	-	12	-
Anillo J	T _{50J} (s)	2,5	3	7
	D _{fJ} (mm)	653	590	525
ΔD_f (D _f - D _{fJ})	(mm)	38	90	220
Caja L	C _{bL} (3 barras)	0,73	0,16	0
	T ₆₀ (s)	4,6	38	∞
	(2 barras)	-	-	0
Volumen pasta	%	0,32	0,26	0,32
Densidad	(kg/m ³)	2360	-	2442

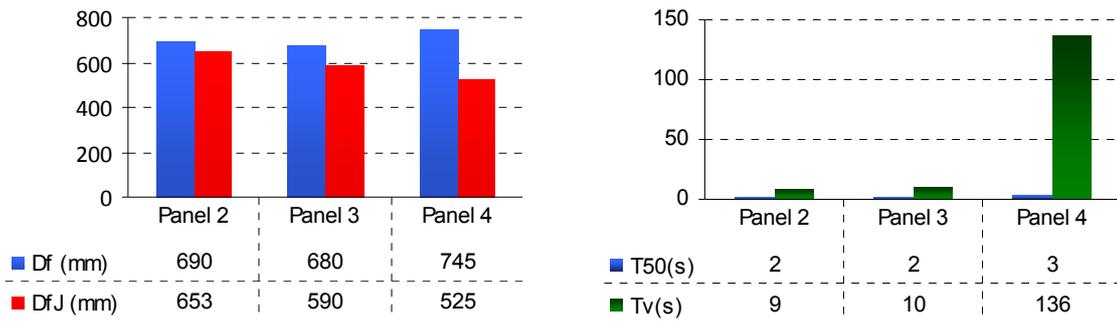


Tabla 10. Características autocompactantes del hormigón aplicado en tabiques.



Figura 64. Aspecto típico del ensayo de escurrimiento y escurrimiento con anillo J (panel 2), ejecución del ensayo del embudo en V y fibras de acero utilizadas (panel 4)



Figura 65. Aplicación del HAC en paneles de vivienda, fase experimental.

4.3.7 Medición de presiones sobre los encofrados

Como fuera mencionado, otro aspecto importante a analizar es la presión del HAC sobre los encofrados. Para estudiar la influencia de la presión sobre las caras del encofrado se colocaron 3 celdas de carga similares a la de la imagen presentada en la Figura 66 siguiente, monitoreadas desde un ordenador portátil y distribuidas en toda la altura (1 superior, 2 medio, 3 inferior) modelo C6A de HBM y con una capacidad de carga de 200kN, conectadas a un sistema de adquisición de datos como se muestra en la Figura 67.



Figura 66. Celda de carga utilizada para el ensayo.



Figura 67. Esquema general de los equipos e instrumentos (izq.) y sistema de captación de la presiones (der.)

La Figura 68 muestra la respuesta de las células de carga en función del tiempo. Como se puede observar, la presión aumenta conforme se vierte el hormigón en el molde, de manera constante hasta alcanzar un máximo correspondiente con el momento en que se completa el elemento. Después, se produce una ligera disminución de la presión correspondiente con la “estructuración” que experimenta el material debido a su tixotropía, lo que disminuye ligeramente la presión sobre el encofrado.

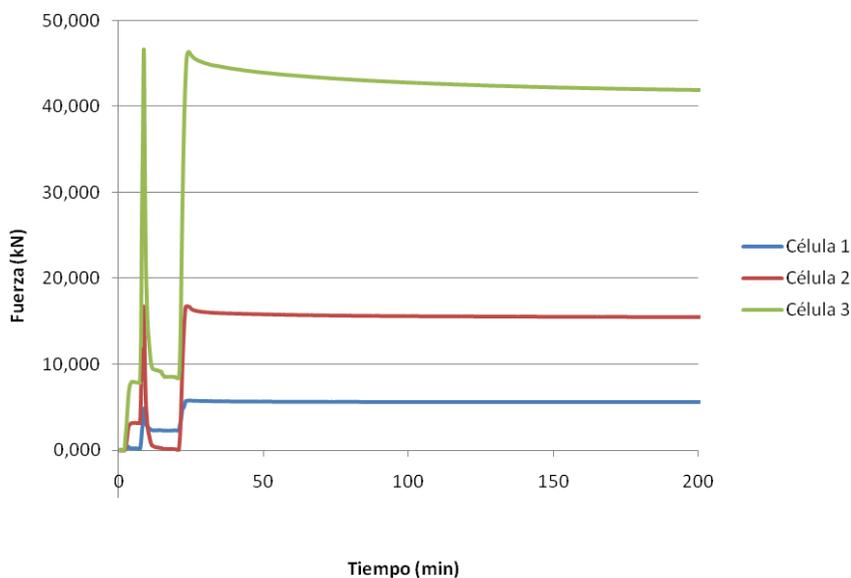


Figura 68. Evolución de la fuerza registrada por la célula de carga

en función del tiempo.

Los picos de presión corresponden con el momento del vertido. El aumento de la velocidad de llenado del hormigón autocompactante, influye en la presión que soportan los encofrados, disminuyendo de forma paulatina a medida que pasan los minutos; puesto que la pasta deja de fluir e inicia a fraguar el material.

4.3.8 Modelo y ensayo de probetas

Durante la fabricación del muro se procedió a tomar muestras para la fabricación de probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura para la evaluación de la resistencia a compresión, resistencia a tracción indirecta y módulo de elasticidad y, en el caso de los HAC reforzados con fibras, probetas prismáticas de 150x150x600 mm para la evaluación del comportamiento a flexotracción.

4.3.9 Evaluación del acabado superficial

En cuanto a la calidad de los acabados, los hormigones arquitectónicos son diseñados, entre otros objetivos, para desempeñar un cometido estético. El acabado superficial del hormigón es de gran importancia cuando el valor estético es una de las propiedades inherentes de un elemento de construcción, y que como hemos puntualizado al principio de este Trabajo Final de Carrera, una de las ventajas asociadas al uso del HAC es la mejora en la calidad de los acabados.

Después de desmoldar el elemento, su superficie se dividió en áreas o sectores sobre los cuales se midieron los defectos de acabado. La pared con la ventana se identificó como "Pared V", siendo importante señalar que este muro es el que lleva incorporado la instalación de tuberías, la "Pared exterior", es la notación para la cara externa, y por último, la "Pared interior", es la notación de la cara interna.

La Figura 69 muestra el aspecto general de unos de los paneles hormigonados y en la Figura 70 se puede observar en detalle el aspecto de algunos defectos encontrados.



Figura 69. Aspecto de los paneles después de desencofrar.

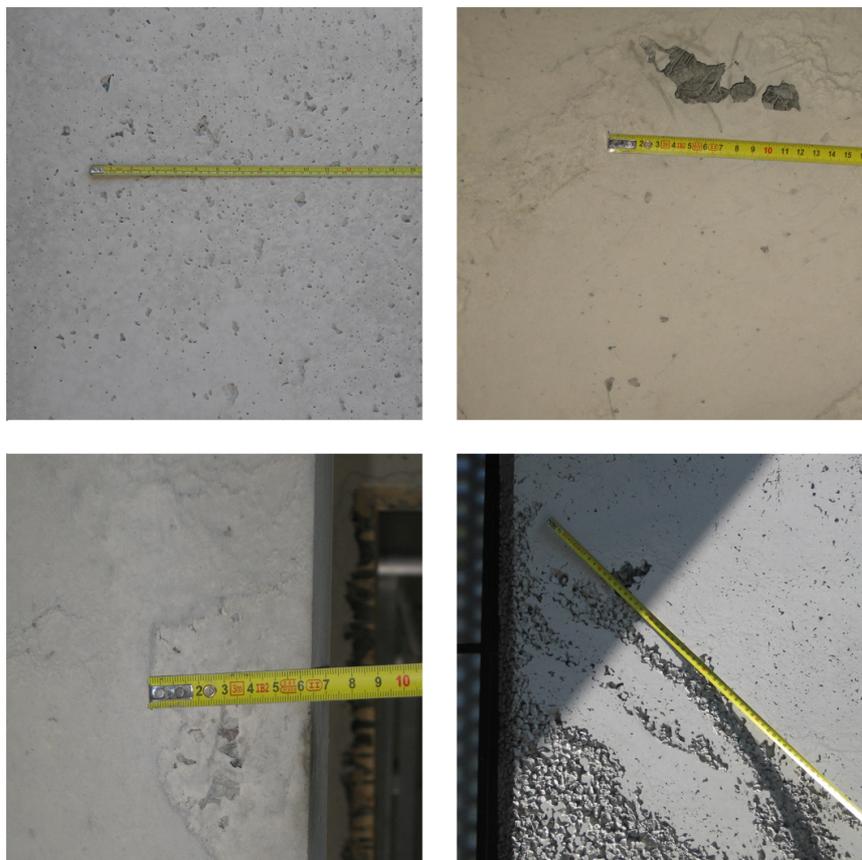


Figura 70. Ejemplo de algunos de los defectos identificados en los paneles analizados.

Para lograr una calidad estética aceptable, será necesario disminuir los defectos tales como, falta de uniformidad de color, manchas y defectos superficiales, fisuración, eflorescencias, etc. Sin embargo, no siempre se llega a alcanzar esta prestación, pero sobre todo, no existe un criterio común sobre como validar el acabado entre la dirección facultativa, el contratista y el fabricante (Pacios et al., 2008)

Los estudios realizados por la comisión de trabajo W29 del CIB establecen una serie de tolerancias para un mismo defecto de acuerdo a las categorías de construcción del hormigón (especial, cuidada, normal ó sin requerimientos) En la Figura 71, se ilustra sobre uno de los paneles ejecutados en el laboratorio, las tablas de referencia y análisis comparativo utilizadas para apreciar la calidad de la superficie del hormigón (del 1 al 7), y la importancia de los defectos dentro de los parámetros del hormigón (CIB, 1973). A la derecha de la imagen, la tabla de los defectos causados por la burbujas de aire, a la izquierda, la escala según la variación en el color.

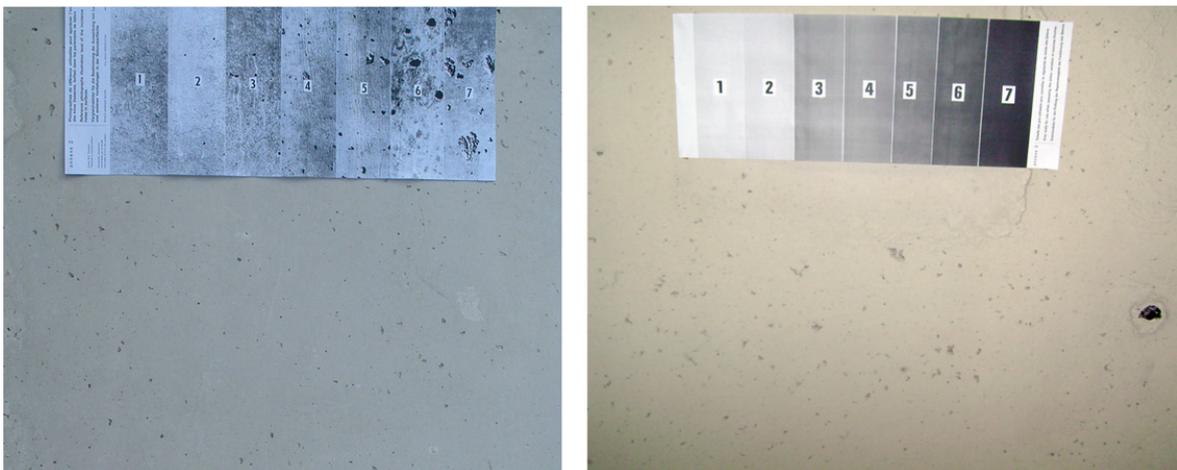


Figura 71. Acabado superficial de un tabique hormigonado con HAC.

Los resultados de este estudio forman parte de las conclusiones del Proyecto HABITAT 2030, dentro del cual el autor estaba colaborando. Una síntesis de los mismos ha sido publicada por (Pacios y Barragán, 2009)

El análisis de los resultados realizado en dicha publicación muestra la estrecha relación entre el diseño de la mezcla de un HAC y la calidad de la superficie, junto con la necesidad de identificar la adecuación de las mezclas del HAC en fase de ejecución. Es por ello, que el “mapeo” de las superficies accede a definir valores cuantitativos, que permite clasificar en categorías el acabado de la superficie.

Sin embargo, debido a las dificultades de forma de los elementos diseñados, a la diversidad de las dosificaciones empleadas y las consecuentes características de autocompactabilidad, los acabados presentaron numerosos defectos. Dominando las agrupaciones de burbujas localizadas y las coqueras, apareciendo defectos en zonas donde el encofrado no es estanco, produciéndose fuga de lechada.

Una vez localizados los defectos de los paneles fabricados, se realizó un relevamiento (mapeado) por sectores para evaluar la densidad de los defectos, las principales causas asociadas, la detección de acciones futuras para prevenirlos. En la Figura 72, se muestra el trazado de mapas de defectos en la superficie de los paneles hormigonados como representación de la metodología. Los principales indicadores fueron, el total de tasa de defectos, el número de los diferentes defectos y el tamaño máximo de un solo defecto.

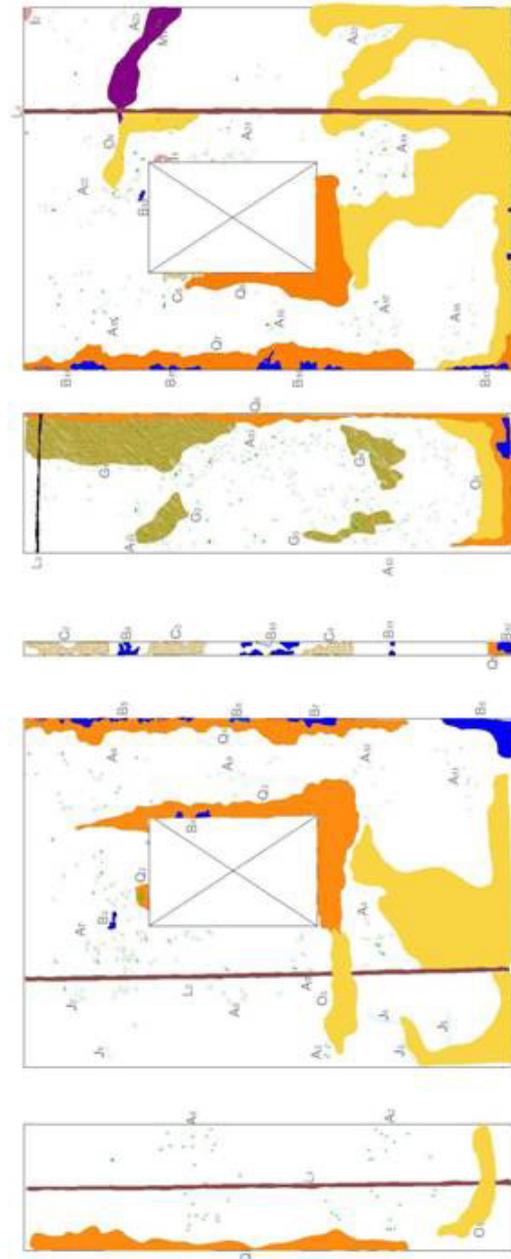


Figura 72. Mapeo de los defectos de superficie en paneles
(Pacios y Barragán; 2009)

Las características de autocompactabilidad del panel 3, T_{V-5min} igual a 12 segundos (ver Tabla 10) parecen no ser suficientes para llenar un molde de sólo 70 mm de espesor con tubos embebidos y refuerzo de malla de acero, lo cual es debido al bloqueo y a la defectuosa capacidad de llenado.

Los resultados de ensayo del *embudo en V* de los paneles 2 y 3, según la Instrucción EHE corresponden a la clasificación de la Clase 2 AC-V2 (AC-V viscosidad) de acuerdo con el Código español. Una baja capacidad de relleno se observa en el caso de los paneles con HACRF, debido al bloqueo de las fibras en la parte inferior del embudo. Sin embargo, aunque con condiciones de flujo discontinuo, el volumen total del hormigón pasó a través del embudo.

Teniendo en cuenta los resultados de las pruebas del ensayo con el *anillo J*, se puede observar en el caso del Panel 2, una adecuada capacidad de relleno (un $\Delta D_f < 50mm$), mientras que el Panel 3 y el Panel 4, muestran un notable bloqueo (véase la Tabla 10). Asimismo, las pruebas muestran valores coherentes en las características de autocompactabilidad del ensayo de la *caja en L* y del ensayo con *anillo J*.

Defectos	Pared Exterior V: 4,67 m ²			Pared Exterior : 1,80 m ²		
	Panel 2	Panel 3	Panel 4	Panel 2	Panel 3	Panel 4
Burbujas	0,430	0,308	0,150	0,920	0,510	0,400
Coqueras	---	0,001	0,010	---	0,0002	0,005
Nidos de grava	---	0,007	0,001	---	0,080	---
Variación de color	0,030	---	---	---	---	0,200
Incrustaciones	---	0,020	---	---	---	---
Desprendimiento	0,001	---	0,001	---	0,004	---
Raíces de segregación	0,070	0,100	0,250	0,040	0,020	0,130
Sub-Total	0,531	0,571	0,412	0,960	0,614	0,735
Clase	4	4	3	4	4	4
Defectos	Pared Interior V: 4,50 m ²			Pared Interior: 1,65 m ²		
	Panel 2	Panel 3	Panel 4	Panel 2	Panel 3	Panel 4
Burbujas	0,440	0,460	0,120	0,460	0,320	0,150
Coqueras	---	0,020	0,010	---	---	---
Nidos de grava	---	0,060	---	---	0,048	---
Variación de color	0,030	---	---	---	---	---
Incrustaciones	---	0,021	---	---	---	---
Desprendimiento	---	0,005	---	---	---	---
Raíces de segregación	0,030	0,110	0,200	0,020	0,011	0,110
Sub-Total	0,500	0,676	0,330	0,480	0,383	0,260
Clase	3	4	3	3	3	2
Total defectos	1,031	1,247	0,742	1,440	0,997	0,995

Tabla 11. Clasificación de los defectos cuantificados de los paneles ejecutados (Pacios y Barragán; 2009)

En la Tabla 11, se presenta la tasa de defectos cuantificados en los diferentes paneles estudiados. Como se puede observar, existe una gran cantidad de

burbujas en las superficies y también defectos de rastros visibles de agua en la superficie del hormigón a los cuales, se les ha llamado "raíces de la segregación" por su semejanza a éstas.

Teniendo en cuenta el promedio de tasa de defectos de todas las paredes, el Panel 3 es el de menor calidad desde el punto de vista estético, y el Panel 4 es el mejor. Dada la elevada calidad de autocompactabilidad, el Panel 2, en términos de llenado y capacidad de fluidez, era de esperar el alcanzar un mejor resultado de los acabados. Sin embargo, es importante mencionar que el Panel 2 presenta el menor número de diferentes tipos de defectos (burbujas y raíces de la segregación principalmente), pero con algunas superficies de desprendimiento. Dicha observación conduce a considerar que no podría haber un problema con el diseño de mezcla de hormigón, pero podría ser una fuerte influencia el del agente desengrasante aplicado.

Asimismo, en el caso del Panel 2, los encofrados cedieron ligeramente durante el proceso de vertido; tal situación, puede destruir la capa de pasta que se forma entre el material y el molde después de la autocompactación, lo cual es imposible de ser reconstruido más tarde. En la Tabla 12 siguiente, se describen los tipos de defectos en un hormigón autocompactante, las características de éstos y sus principales causas.

Tipo de defecto	Causas principales
Burbujas.	-Aire atrapado. -Agua atrapada. -Aceite del desengrasante atrapado.
Coqueras.	-Pasta o finos insuficientes. -Hormigón segregado debido a una viscosidad plástica demasiado baja. -Hormigón incapaz de llenar partes del molde.
Planos de unión visibles entre distintos lotes.	-El endurecimiento superficial impide la unión monolítica con el siguiente hormigón.
Incrustaciones.	-La capa superficial contiene sólo material fino y ha asentado demasiado rápido.
Rallas verticales o rastros visibles de agua en superficie del hormigón (Raíces de segregación)	-Segregación de agua y finos.
Superficie poco rígida o irregular.	-Deformación del molde. -"Huellas digitales" de la superficie del molde a la del hormigón.
Fisuración por retracción y asentamiento plástico.	-Secado demasiado rápido. -Sedimentación.

Tabla 12. Tipos de defectos de un HAC (Pacios et al., 2008)

Analizando los diferentes sectores de los paneles estudiados, el de la pared con la ventana y los tubos embebidos es el área con un mayor número de diferentes tipos de defectos, pero no siempre la mayor tasa de defectos. Por ejemplo la Pared interior "V" (parte interna de la pared que contiene la ventana), tiene una tasa de defectos del 50%, 3 tipos de defectos y un solo defecto que cubre el 44% de su superficie; por lo que este sector fue clasificado como tipo 3. Por otro lado, la Pared interior, con la misma clase, tiene menor tasa de defectos, menor número de defectos, pero un solo defecto que cubren una mayor superficie.

El panel 3, que fue fabricado con una baja capacidad de fluidez de acuerdo con el cuadro los resultados de autocompactabilidad, presentó un defecto de tipo coqueas, lo que es más acentuado que en el caso del Panel 4, que fue ejecutado con el HACRF.

4.3.10 Conclusiones de la aplicación del HAC en elementos esbeltos

De la investigación antes presentada, en la cual se ha analizado la reducción de espesores mínimos del sistema constructivo, tanto en la relación entre la autocompactabilidad y la calidad de los acabados, obtener un método de análisis basado en parámetros cuantitativos, evaluar la presión ejercida por el HAC sobre los encofrados, y estudiar la posibilidad de reemplazar la armadura convencional; nos ha permitido alcanzar las siguientes conclusiones:

1. El "mapeo" de la superficie es una herramienta para registrar y medir los defectos del hormigón en superficie, con el objetivo de obtener un valor cuantitativo que nos permita clasificar, en función de la calidad de los acabados, por categorías la superficie de un hormigón autocompactante.
2. Un diseño optimizado en la dosificación de un HAC produce un material con buenas propiedades de autocompactabilidad. Sin embargo, la óptima propiedad de autocompactabilidad por sí sola no es suficiente para lograr una alta calidad del acabado, que está marcadamente influenciada por la condición y colocación de los encofrados.
3. Existen algunas características de la mezcla de diseño que están relacionados con la calidad superficial y debe ser considerada para aplicaciones exigentes con respecto a la capacidad de llenado y de paso o cuando se usa HACRF; un mayor volumen de pasta aumenta el precio del material, sin embargo, para el hormigón reforzado con fibras es una necesidad a fin de evitar el bloqueo.
4. Teniendo en cuenta el promedio de tasa de defectos de todas las paredes, el elemento fabricado con el mayor volumen de pasta (Panel 4) es el que tiene una mejor calidad. Existe una correlación entre la autocompactabilidad, los resultados de las pruebas y la calidad superficial final.

Como se ha mencionado, los estudios relativos al método de evaluación de defectos superficiales corresponden el proyecto HABITAT 2030 (financiado por el MEC), cuyos resultados han sido publicados en (Pacios y Barragán; 2009)

4.4 APLICACIÓN DE HAC EN LA CONSTRUCCIÓN DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR EN BARCELONA

En este último apartado del Trabajo Final de Carrera, se describe una aplicación in situ del uso de hormigón autocompactante en componentes de una vivienda. Esta experiencia es posiblemente la primera implementada en la ciudad de Barcelona, de forma documentada. Considerando que podría haber casos en que no se les realizara difusión, este proyecto representa como mínimo, la primera aplicación publicada de este prometedor material en obras residenciales hormigonados in situ de esta ciudad.

Para llevar a cabo el proyecto, desde la fase de optimización de las mezclas hasta la puesta en obra, se organizó el trabajo en dos etapas. En primer lugar, la campaña experimental íntegramente desarrollada en el LTE-UPC, y finalmente el diseño constructivo y la aplicación in situ, coordinada desde la oficina de arquitectura "Barbera Arquitectos" bajo la dirección de la arquitecta Silvia Barbera Correia, de la cual el autor es colaborador.

4.4.1 Organización de los trabajos y campaña experimental

Como fase previa a la aplicación final del material en muros de contención y forjados sanitarios, para lo cual se diseñó un hormigón autocompactante reforzado con fibras; se ejecutaron tareas de optimización y dosificación de las mezclas, ensayos en estado fresco y en estado endurecido. Asimismo, a lo largo de todo el proceso de diseño y ejecución, la coordinación de los trabajos se realizó en colaboración entre la oficina de arquitectura responsable del proyecto ejecutivo, y el LTE-UPC.

El trabajo aquí comentado, se realizó durante el período 2006-2008 y abarca diversas líneas de actuación, entre las cuales se pueden enumerar las siguientes:

- a) Optimización de las mezclas y diseño del HAC.
- b) Ensayos a escala material.
- c) Ensayos en estado fresco.
- d) Ensayos en estado endurecido.
- e) Control y dosificación en planta hormigonera del hormigón autocompactante utilizado.
- f) Ensayos a pie de obra.
- g) Aplicación en muros de contención.
- h) Aplicación en forjado sanitario.
- i) Control de ejecución.
- j) Extracción de testigos y ensayos ulteriores a la ejecución de la obra.

4.4.2 Diseño y justificación de la vivienda

El edificio es una vivienda aislada que se encuentra ubicada en la parte alta de la ciudad de Barcelona, al pie del Parc de Collserola. La especial localización del edificio, justo en la curva de una calle con pendiente, ha sido uno de los aspectos en los que el proyecto ha sido más sensible por motivos de integración de la construcción en el propio entorno circundante. La perspectiva que se tiene desde la calle evidencia que la fachada se constituye como una “piel” continua de granito negro que envuelve las cuatro caras del volumen y que la constituyen en una caja con sus cuatro fachadas como un elemento continuo.

La voluntad otorgada desde su particular emplazamiento, por una parte, la condición del programa funcional, por otra, fueron las premisas básicas a la hora de desarrollar el proyecto definitivo, garantizando desde su inicio los requerimientos especiales para su ejecución y realización.

La configuración del proyecto responde al encargo de dos viviendas integradas en una, pero independientes entre ellas. La primera de ellas, para los clientes y la segunda para el hijo de éstos, por lo que se configuró el conjunto en tres niveles diferenciados; planta baja y planta primera para los primeros, y en planta sótano (la vivienda independiente) para el segundo.



Figura 73. Aspecto exterior de la vivienda.

En cuanto al volumen exterior, el programa funcional diferenciado debía dar respuesta a la misma interpretación desde el exterior, razón por la cual la fachada ventilada de piel granítica delimita las dos primeras plantas y se independiza del sótano constituido por muros vistos de hormigón autocompactante. Por último, una ventana corrida y continua permite otorgar la independencia compositiva de las distintas partes del proyecto. En la Figura 73, se observa la composición volumétrica y los diferentes materiales con sus acabados, utilizados en la obra.

Los materiales utilizados en esta obra fueron seleccionados para conseguir las premisas enunciadas, lograr alcanzar las mejores condiciones estructurales y obtener el confort y bienestar necesario.

En cuanto al hormigón utilizado, como se comentó en capítulos anteriores, es requisito necesario para su consideración como autocompactante, que cumpla simultáneamente con las tres exigencias principales de la autocompactabilidad, esto significa: *capacidad de relleno*, *capacidad de paso* y *resistencia a la segregación*. Para esta obra, los tres anteriores requisitos fueron evaluados en primer lugar en el LTE-UPC y posteriormente en cada aplicación a pie de obra, mediante ensayos en estado fresco, que en aquel momento las recomendaciones para la realización de éstos y la caracterización de la autocompactabilidad, eran recogidas en la Normas UNE respectivamente, ya que aún no había entrado en vigor la actual Instrucción EHE.

4.4.3 Ensayos de caracterización en estado fresco y endurecido para los componentes de la vivienda

Previamente a la elección en el diseño definitivo de la mezcla utilizada en esta obra, la campaña experimental establecida se diseñó para la evaluación de la autocompactabilidad de cuatro HACs diferentes; analizándose valores de resistencia a compresión simple a diferentes edades, módulos de elasticidad y de respuesta carga-apertura de fisuras en flexotracción para el caso de HAC reforzado con fibras de acero.

La caracterización físico-mecánica en estado endurecido contempla la evolución de la resistencia hasta la edad de 750 días; para el caso de la homogeneidad en la altura o ausencia de segregación de los HAC, se valoraron las propiedades mediante métodos destructivos y no destructivos; esto es, extracción de testigos y medidas de la velocidad de pulso ultrasónico respectivamente. De igual forma, se realizaron cortes en el muro con disco de diamante en sentido vertical y horizontal, que han permitido verificar la distribución uniforme del árido grueso con la altura del elemento estructural.

Por último, dado que los muros estaban concebidos para ser de hormigón visto, se llevó a cabo una evaluación cualitativa de las características del acabado superficial de los elementos; para lo cual, se utilizó las tolerancias recomendadas por el CIB (CIB, 1971) encaminadas a cuantificar la calidad de los acabados.

4.4.4 Muros sótano y solera de hormigón autocompactante

Los muros fueron diseñados para resistir el empuje del terreno, ya que el pavimento de la planta sótano se encuentra aproximadamente a 2 metros por debajo de la rasante del terreno. Las características de resistencia del hormigón para el muro debían responder a un tipo HA-35/F/20/IIa y con un doble armado horizontal y vertical de barras de acero BS500 de diámetro 12 cada 20 cm.

Para la ejecución de los diferentes muros previstos en esta obra, se utilizaron un total de 25 m³ de hormigón autocompactante; siendo destacable que se realizó el hormigonado de los mismos desde un solo punto de vertido (hecho que únicamente se podría realizar utilizando HACs). Este HAC, ha sido capaz de fluir a lo largo de 15 metros pasando entre los diferentes entramados de las armaduras, sorteando en algunos casos ángulos de hasta 90° y rellenando de forma eficiente la totalidad del encofrado previsto.

Los datos generales geométricos de estos elementos estructurales, que se muestran en la Figura 74 siguiente, se resumen de la siguiente forma: los muros perimetrales de contención definían una ocupación en planta de forma cuadrada, y contaban con unas dimensiones de 210 cm de alto por 30 cm de ancho, para un desarrollo lineal total de 40 metros.

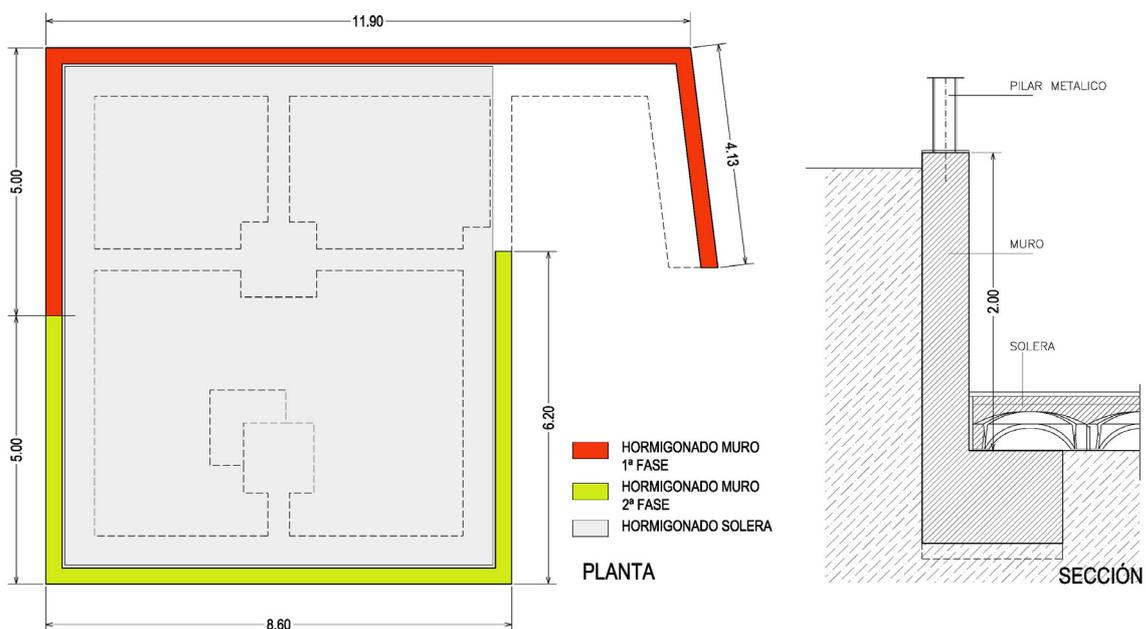


Figura 74. Planta y dimensiones de los muros hormigonados.

En el caso de la solera para el forjado sanitario (Figura 75), se diseñó un hormigón reforzado con fibras que fuera capaz de rellenar los senos del encofrado no recuperable de polipropileno reciclado termo-inyectado del tipo "Caviti" modelo C-25, y una capa de compresión de 5 cm de altura. En esta oportunidad se

suministraron 7 m³ de HACRF. Los datos generales geométricos de este elemento se resumen de la siguiente forma: la solera definía una ocupación en planta de 80 m², cada pieza del encofrado perdido era de 750 x 500 x 250 mm y un consumo de 40 lts/ m² de hormigón hasta la altura del seno.



Figura 75. Sistema de encofrado no recuperable y detalle de los senos hormigonados con HACRF.

4.4.4.1 Materiales y dosificaciones

Para la dosificación de las mezclas, y como se indica en la Tabla 13, se utilizaron las mismas proporciones en cada aplicación de los siguientes materiales: dos arenas y dos gravas calizas de tamaño 0-2, 0-5, 5-12 y 12-18 mm, respectivamente, cemento tipo CEM I-42,5, *filler calizo*, *aditivo superplastificante policarboxilato* y *aditivo modulador de la viscosidad*. En la dosificación de la solera se utilizaron fibras de acero de 50 mm de longitud del tipo “hooked end”.

Materiales componentes (kg/m ³)	Muro (Fase 1)	Muro (Fase 2)	Solera
Cemento 42.5R	343	343	343
Agua	163	163	---
Filler calizo*	103	103	103
Arena 0-2	619	619	619
Arena 0-5	346	346	346
Grava 5-12	460	460	460
Grava 12-18	337	337	337
Superplastificante*	7	7	6,9
Relación a/c	0,5	0,5	0,5
Fibras de acero*	---	---	40

* Se dosificaron manualmente en obra

Tabla 13. Materiales componentes utilizados en la vivienda.

Siguiendo el método de dosificación UPC, una vez optimizadas las fases pasta y *esqueleto granular*, se han realizado mezclas de prueba para encontrar el óptimo contenido de pasta que permita alcanzar condiciones estándar de autocompactabilidad; las cuales se han contrastado por medio de los ensayos de *escurrimiento*, con un diámetro final (D_f) del orden de los 600-700 mm, el tiempo de flujo en *embudo en V* (T_V) > 3 seg, ausencia de bloqueo medida el ensayo de *escurrimiento con anillo J*, ($D_f - D_{fJ}$) > 50 mm y ausencia segregación a partir de la observación visual de la masa de hormigón resultante del ensayo de *escurrimiento*.

4.4.4.2 Programa de ensayos en estado fresco a pie de obra.

Para garantizar la autocompactabilidad en el momento de la puesta en obra del hormigón y en cada lote se emplearon los ensayos de *escurrimiento*, midiendo el diámetro final (D_f) y el tiempo en alcanzar un diámetro de 500 mm (T_{50}), el *escurrimiento con anillo J* realizando determinaciones similares (D_J y T_{50J}) y el *embudo en V*, midiendo el tiempo de vaciado (T_V). En la Tabla 14, se presentan los resultados de autocompactabilidad obtenidos para los hormigones utilizados en obra, y a continuación en la Figura 76, *ensayo de escurrimiento* a pie de obra.

Ensayos		Muro (Fase 1)	Muro (Fase 2)	Solera
Escurrecimiento	T_{50} (s)	2,4	1,5	1,48
	D_f (mm)	695	780	720
Embudo V	T_V (s)	10	7,5	18,4
Anillo J	T_{50J} (s)	635	770	1,8
	D_{fJ} (mm)	4	1,6	650
ΔD_f ($D_f - D_{fJ}$)		(mm)	60	10

Tabla 14. Medidas de autocompactabilidad de los hormigones utilizados en obra.

Es necesario mencionar que el hormigón para la solera llega ligeramente segregado desde la planta hormigonera. La adición de agua para limpieza de la cuba y las lluvias torrenciales durante el transporte, pudieron provocarlo. El albarán muestra que se ha cambiado el tipo de cemento, sin haberlo solicitado desde el LTE-UPC, el hormigón se ha fabricado con CEM II A-L, que incorpora *filler calizo*, en lugar del cemento 42.5 R. Para corregir la dosificación y asegurar las óptimas condiciones de autocompactabilidad, se añadieron 6 litros de *agente modificador de la viscosidad* del tipo Rheomac. El AMV produjo una reducción de la fluidez, por lo que fue necesario incorporar una cantidad extra de *aditivo superplastificante* del tipo Glenium C303 SCC, de la casa BASF.



Figura 76. Ensayo de escurrimiento realizado a pie de obra.

4.4.4.3 Ejecución en obra

En la planta sótano, se realizaron muros de contención de 30 cm. de espesor y una solera con una capa de compresión de 5 cm de altura en hormigón autocompactante. Para la construcción de estos elementos fue empleado un total de 32 m³ de HAC. En el caso de los muros, la aplicación del hormigón se realizó en dos fases consecutivas por sugerencia de la empresa constructora, de aproximadamente un 50% del hormigón colocado en ellos para cada una de estas fases, utilizando 2 camiones hormigonera en cada caso.

En todos los casos, el hormigón se suministró desde la planta de hormigón preparado de la empresa PROMSA ubicada en Sant Vicenç dels Horts, Barcelona. Para cada aplicación de los muros, un equipo formado por técnicos del LTE y arquitectos de la oficina de arquitectura se trasladó hasta la planta encargada de proveer el material con el objetivo de dosificar el *filler* utilizado en la mezcla del HAC.

En la primera fase o Fase 1, la puesta en obra se realizó por bombeo (Figura 77) con un tiempo de vertido de entre 30 y 40 minutos. En la segunda Fase 2, se utilizó un cubilote de 250 litros por decisión de la empresa constructora, con una duración aproximada de 120 minutos para verter los primeros 8 m³, y 45 minutos para los restantes 7 m³ que se realizaron directamente desde el camión.

Es importante remarcar, que la eliminación del proceso de vibrado del hormigón, permitió realizar la puesta en obra del mismo a un ritmo continuo y sin necesidad de colocación en sucesivas tongadas, alcanzando una velocidad de ejecución,

que en el caso del hormigón convencional no se puede igualar. Por otra parte, también se hace necesario mencionar, que todo el trabajo de vertido del hormigón en muros y solera, fue realizado simplemente con un la ayuda de dos operarios.



Figura 77. Fase 1ª del hormigonado de los muros.

Por otra parte, dado que los muros en cuestión eran de poca altura, no existieron consideraciones especiales significativas para su ejecución; sin embargo, la estanqueidad de los encofrados utilizados sí que se trató de forma particular, de importante mención y cuidado, ya que el HAC ejerce en estos casos más presión sobre el propio encofrado que lo que haría un hormigón convencional.



Figura 78. Encofrado de los muros de la Fase 2ª.

Pese a estas recomendaciones, los encofrados cedieron ligeramente durante el vertido de la Fase 1, produciéndose en algunos sectores fuga de lechada ya que los mismos no estaban debidamente reforzados, además al ceder se produjeron defectos del tipo de las burbujas debido al aire atrapado en la interfase molde-hormigón. Con la finalidad de evitar este descuido para la ejecución de la Fase 2, se decidió aumentar los refuerzos del encofrado. En la anterior Figura 78, se puede observar las características del encofrado para esta fase y en la Figura 79 el llenado de los muros con cubilote.



Figura 79. Detalles de la puesta en obra mediante cubilote.

El HAC también se aplicó con éxito en la construcción de la solera de la vivienda estudiada, en este caso, la rápida y cómoda aplicación fue la principal ventaja observada en la experiencia aquí documentada.

Para la solera, se planteó realizar un forjado sanitario con una capa de compresión de 5 cm de espesor, para el que se diseñó un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero, eliminando completamente de esta forma el armado convencional de estos elementos. Las fibras en cuestión, otorgan al hormigón capacidad resistente residual y controlan así el desarrollo de la fisuración.

Para la solución del forjado sanitario se adoptó la utilización de encofrados perdidos de PVC tipo “Caviti” de las características anteriormente descritas. En la ejecución de la capa de compresión se utilizaron 7m³ de hormigón autocompactante colocados directamente desde el camión por medio de un

cubilote de 250 litros, y el tiempo de aplicación fue de 20 minutos. Fue necesario un operario para la puesta en obra del HACRF (Figura 80)



Figura 80. Puesta en obra del HACRF en la solera estudiada.

En este caso en particular, es importante mencionar, que para la realización del acabado de esta solera, no fue necesario pasar la regla vibrante; puesto que la elevada fluidez del hormigón autocompactante permite evitar la tendencia de elevar los contenidos de agua del hormigón utilizados para pavimentación, con las consecuencias que esto implica para la resistencia mecánica del mismo.

4.4.4.4 Ensayos en estado endurecido

Sobre el hormigón endurecido se realizó en primer lugar un relevamiento del acabado superficial detectando la formación de burbujas u otros tipos de defectos. Como se mencionara anteriormente, en la superficie del muro que durante la ejecución se produjo la fuga de lechada, presentó un índice mayor de defectos del tipo burbujas (ver Figura 81)



Figura 81. Aspecto superficial del hormigón en muro.

Las probetas cilíndricas de 150x300 mm encabezadas y ensayadas a compresión a los 28 días, de la Fases 1 y 2, indicaron una resistencia media igual a 60,5 y 49,5 N/mm², respectivamente, en el caso de la solera la resistencia media fue de 37,1 N/mm². Los ensayos a compresión se realizaron siguiendo los lineamientos de la normativa UNE 8330:1984.

A continuación en la Tabla 15, se informa el valor medio de la resistencia a compresión a los 28 días de edad para las probetas estudiadas; medida sobre probetas cilíndricas de 150 × 300 mm, curadas en cámara húmeda y ensayadas según la Norma UNE-EN 12390-3:2003- Ensayos de hormigón endurecido.

Ensayos de resistencia		Muros (f _c)	Solera (f _c)
Resistencia a compresión (N/mm ²)	Lote 1	61,3	---
	Lote 2	60,0	---
	Lote 3	50,6	---
	Lote 4	48,4	---
	Lote 5	---	37,1

Tabla 15. Ensayo de resistencia a compresión a 28 días.

En el marco de la campaña experimental, y luego de 2 años desde la puesta en obra del hormigón autocompactante, se realizaron debido a modificaciones de proyecto y por orden de la dirección facultativa, cortes verticales y horizontales en los muros de contención mediante la utilización de un instrumento de corte con disco de diamante para la extracción de dos piezas en el sector correspondiente a la Fase 2 de la aplicación.

A partir de la extracción de piezas de 1,50 m de ancho por 2,00 m de altura aproximadamente, se decidió realizar una serie de ensayos en el laboratorio para

determinar la evolució de las características en estado endurecido del hormigón vertido.

En primer lugar, se realizó a pie de obra la evaluación visual de la homogeneidad mediante la observación de la superficie y seguidamente, se procedió a realizar un ensayo no destructivo mediante la velocidad de pulso ultrasónico, que han permitido verificar positivamente la distribución uniforme del árido grueso con la altura del elemento estructural. La Figura 82 muestra el aspecto del HAC en la superficie cortada, observándose una distribución uniforme del árido a lo largo de toda la altura.

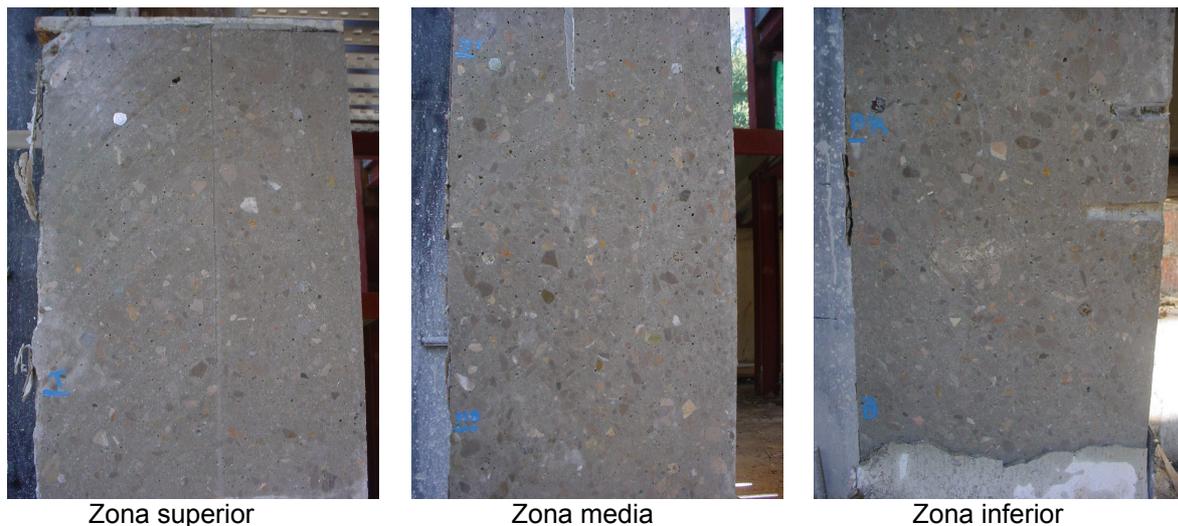


Figura 82. Muros de sótano, vista del plano de corte

Posteriormente en el LTE-UPC, se procedió a la extracción de testigos para ensayos de compresión con determinación de la resistencia y el módulo de elasticidad. Para ello se replantearon los muros testigos y se dividieron ortogonalmente en tres franjas horizontales y verticales, numerándolos de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo (testigo 1, sup.-izq.; testigo 9 inf.-der.). Luego, y con la ayuda de una máquina para extraer testigos se obtuvieron piezas cilíndricas de unos 10 cm de diámetro y de 30 cm de altura (Figura 83).



Figura 83. Extracción de testigos de los muros cortados.

Antes de realizar los ensayos, los cilindros fueron aserrados y encabezados con una mezcla en base a grafito y azufre en ambas caras y ensayados en una máquina IBERTEST de 300 TN. La medición de las deformaciones longitudinales fue realizada a través de 3 LVDTs. Se descartaron aquellos testigos que no cumplieran para el ensayo con la relación 2/1.

La Tabla 16 siguiente, muestra los valores de la resistencia a compresión (f_c) del hormigón empleado para la ejecución de los muros durante la Fase 2, desde la edad de 28 hasta los 750 días. Como puede observarse existe una variación de la resistencia en función de la localización de los testigos.

Resistencia a compresión (f_c)							
Ensayos a 28 días		Ensayos a 750 días					
Resistencia Fase 2 (N/mm ²)	Testigos	Resistencia (N/mm ²)		Módulos (E:Gpa)		Muro A	Muro B
		Muro A	Muro B	Muro A	Muro B		
Probetas Lote 1. 50,6	N° de orden	1	53,5	45,4	37,8	45,3	
		2	54,0	46,3	38,2	40,9	
		3	56,9	*	37,1	43,5	
		4	40,4	48,3	35,5	38,7	
		5	47,7	44,1	*	36,0	
Probetas Lote 2. 48,2		6	39,2	39,6	36,6	36,2	
		7	40,5	*	36,2	38,8	
		8	40,7	36,9	37,6	37,6	
		9	41,7	38,8	35,3	35,1	

*Se descarta ensayo por no cumplir relación 2/1

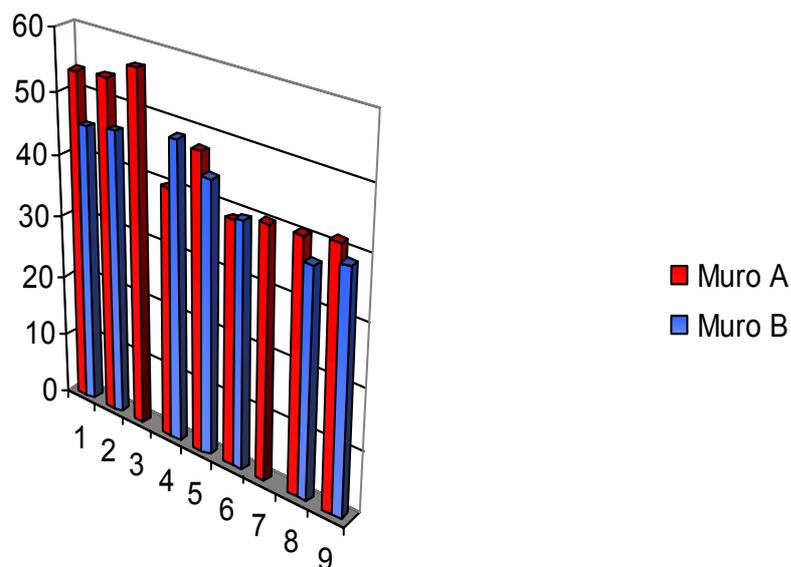


Tabla 16. Resultados a compresión de los testigos ensayados a 750 días.

4.4.5 Conclusiones preliminares de la aplicación en vivienda

El trabajo realizado en esta etapa de la campaña experimental, abarcó desde la optimización de las mezclas y ensayos en laboratorio hasta la aplicación final del material en muros de contención y forjados sanitarios, para el que se ha desarrollado un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero, eliminando completamente el armado convencional. Entre las principales conclusiones podemos señalar las siguientes:

1. Por lo que respecta a la aplicación del HAC en la construcción de componentes de edificación de una vivienda, se ha utilizado con éxito la metodología de dosificación UPC para diseñar un hormigón autocompactante destinado a la elaboración de unos muros y una solera para un forjado sanitario.
2. En el caso de los muros se han superado con éxito los estrictos requisitos de forma y acabado, obteniendo buenos resultados en términos de autocompactabilidad y prestaciones mecánicas. Esto ha permitido una significativa reducción del tiempo de llenado del muro (Fase 1: 12 m³), actividad que finalmente fue ejecutada en 30 minutos. Cabe mencionar que, según el personal de obra, hormigonar el mismo elemento con hormigón vibrado tradicional hubiera demandado aproximadamente 4 horas.
3. Además, se ha eliminado por completo, tanto en los muros como en la solera, cualquier necesidad de vibrado, con la consiguiente reducción de ruido y mejora del ambiente de trabajo.
4. Complementariamente esta aplicación evidenció que en los casos de elementos arquitectónicos, en los que el aspecto final tiene una consideración importante, es esencial el control en obra de las características de estanqueidad y resistencia de los encofrados.
5. Los ensayos realizados sobre el HAC endurecido evidenciaron las propiedades inalterables del material, tanto en términos de uniformidad como en cuanto a sus propiedades mecánicas.
6. En el caso particular de la solera, el HACRF pudo ser logrado sencillamente adicionando las fibras al camión hormigonera, con el correspondiente ajuste de la dosificación. Aunque los coeficientes de bloqueo evidenciaron una baja capacidad de relleno debido a la presencia de fibras, el material pudo colocarse sin inconvenientes. Asimismo, la eliminación del armado convencional de la solera redundó en la ganancia de tiempos de ejecución.

En general, se ha confirmado que el HAC representa una tecnología idónea para la construcción de componentes de viviendas, en este caso muros de sótano y forjados sanitarios, conllevando ganancias de productividad, prestaciones y mejoras significativas del entorno de trabajo.



Figura 84. Aspecto final de los muros hormigonados con HAC.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN

De todo el estudio realizado y presentado en este trabajo se presentan las conclusiones que se detallan a continuación. En general, podemos afirmar que se han alcanzado los principales objetivos presentados en el Capítulo I.

A) Conclusiones generales del proyecto final de carrera

- 1) En cuanto al estado del conocimiento, se ha presentado una recopilación de los principales aspectos que cualifican y distinguen al hormigón autocompactante del hormigón convencional. De ésta, se desprende que la tecnología del HAC está siendo adoptada rápidamente en España. Para generalizar su uso faltaría progresar en la difusión de las propiedades del HAC a la hora del diseño.
- 2) Por lo que respecta al estudio bibliográfico realizado en lo referente a las metodologías de ensayos de hormigón autocompactante, hemos verificado que existen una variedad de ensayos, todo ellos validados, para la caracterización del HAC. Sin embargo, un solo ensayo no es suficiente para determinar la autocompactabilidad del hormigón, son necesarios al menos la combinación de dos métodos, uno para definir la autocompactabilidad en términos de fluidez y capacidad de relleno, y otro para evaluar su habilidad de paso.
- 3) Por lo que respecta a la caracterización y la optimización de mezclas de HAC, se ha demostrado la influencia de los finos utilizados como filler en las características del estado fresco y endurecido. Hemos verificado que las mejoras conseguidas en las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad se deben a las propiedades controladas de fillers fabricados *ad hoc* y al menor tamaño de sus partículas, que redundan en una estructura más compacta con las consecuentes ventajas asociadas a durabilidad, resistencia y calidad de los acabados.
- 4) En el caso estudiado del hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero, se ha demostrado el aporte de éstas en el control de las deformaciones bajo cargas de larga duración.
- 5) Por lo que respecta a la aplicación de HAC en tabiques delgados para viviendas industrializadas hormigonadas in situ, hemos verificado que la óptima propiedad de autocompactabilidad por sí sola no es suficiente para lograr una alta calidad en los acabados, y que está influenciada por la condición y colocación de los encofrados.
- 6) Por lo que se refiere a la experiencia y puesta en obra del hormigón autocompactante en la construcción de la vivienda, la aplicación ha sido exitosa, demostrando importantes ganancias de calidad y tiempo de ejecución.
- 7) En lo referente a mi experiencia personal en el desarrollo del PFC, el mayor objetivo en el momento de plantear el trabajo fue la oportunidad de

entender y verificar en la práctica los conceptos estudiados en la escuela, que en este momento puedo afirmar que se han alcanzado satisfactoriamente.

B) Conclusiones específicas del proyecto final de carrera

- 1) En cuanto al estudio bibliográfico realizado en lo referente a las propiedades y características del HAC, se han identificado las principales propiedades que caracterizan al hormigón autocompactante en estado fresco que lo distinguen de un hormigón convencional, y que son, capacidad de relleno, habilidad de paso y resistencia a la segregación. Estos parámetros son ajenos a la caracterización convencional de un hormigón en estado fresco.
 - a) Como resultado de esta conclusión, durante la campaña experimental se ha priorizado en aquellos ensayos que en términos de repetitividad y reproductibilidad no suponen un problema y que son capaces de ofrecer rápidamente y de forma fiable los resultados de las propiedades de un HAC con un equipamiento robusto, fiable, manejable y económico.
 - b) Del estudio realizado hemos comprobado que resulta imposible reducir la caracterización a un solo ensayo.
 - c) Para caracterizar un HAC al menos será necesario utilizar dos ensayos, uno que permita definir al hormigón en términos de fluidez y capacidad de relleno, y otro para evaluar su habilidad de paso.
 - d) Finalmente, la combinación de los ensayos de escurrimiento, embudo en V y anillo J, permite una buena evaluación de las tres propiedades anteriormente mencionadas.
- 2) Por los que respecta a la optimización de las mezclas con diferentes tipos de fillers, en donde se ha estudiado y analizado la influencia de éstos en las propiedades del estado fresco y endurecido, hemos comprobado mejoras en los resultados obtenidos.
 - a) En términos de resistencia, los ensayos sobre las probetas que contenían fillers provenientes de procesos controlados, han presentado mejores valores de resistencia a compresión.
 - b) En cuanto a los ensayos de durabilidad, los resultados de profundidad de carbonatación presentados, fueron más satisfactorios en aquellos hormigones que incorporaron a la mezcla, fillers de procedencia contrastada.
 - c) Desde los términos de acabado superficial, más allá de la alta calidad de acabado conseguida en general, los hormigones con fillers fabricados *ad hoc* y bajo procesos controlados han presentado un

- acabado con menos burbujas en superficie que en el caso del HAC que incorporaba filler calizo subproducto del machaqueo de los respectivos áridos.
- d) Las mejoras anteriormente conseguidas se imputan, por un lado a las propiedades físicas-mineralógicas controladas de los productos, y por otro, a una estructura de micro poros más compacta.
- 3) Por lo que respecta a los hormigones autocompactantes reforzados con fibras, se estudió la deformación en el tiempo bajo la acción de una carga constante en elementos previamente fisurados, la evolución de la apertura de fisura y el control de su fisuración.
- a) Hemos comprobado un comportamiento caracterizado por tres escenarios definidos, una primera etapa en donde se produce una deformación instantánea en correspondencia con el momento de aplicación de la carga, un segundo escenario donde se observa un incremento de la fisura en el tiempo bajo carga constante, y un último escenario donde un rápido incremento de la fisura conduce en poco tiempo a la rotura.
- b) Se observó un aporte de las fibras en el control de las deformaciones bajo cargas de larga duración, con una respuesta estable para pequeñas aperturas de fisura.
- c) El aumento inicial de la apertura de fisura se estabiliza con el tiempo.
- d) Los resultados de ensayo aquí presentados, se enmarca en estudios que contribuirán a proveer un complemento al cálculo estructural del HACRF y forman parte de una temática de investigación muy específica y de total actualidad.
- 4) En cuanto a lo referente a la aplicación in situ del HAC en elementos de reducido espesor para viviendas industrializadas, hemos verificado la estrecha relación entre el diseño de la mezcla de un hormigón autocompactante, la calidad de la superficie, el control de ejecución, y las características y colocación del encofrado.
- a) Debido a las dificultades de forma, elementos embebidos, características de la puesta en obra, tipos de encofrado y sus ajustes, el acabado de los paneles presentó numerosos tipos de defectos, los cuales fueron identificados y cuantificados. Estos resultados han contribuido a la definición de una metodología de evaluación de acabados superficiales. En este sentido, el “mapeo” de las superficies permite definir valores cuantitativos, constituyéndose en una herramienta para registrar y medir los defectos del hormigón en superficie, con el objetivo de obtener un valor cuantitativo que nos permita clasificar, en función de la calidad de los acabados, por categorías la superficie de un hormigón autocompactante.

- b) Un diseño optimizado en la dosificación de un HAC produce un material con buenas propiedades de autocompactabilidad. Sin embargo, la autocompactabilidad por sí sola no es suficiente para lograr una alta calidad del acabado, que está marcadamente influenciada por la condición y colocación de los encofrados.
 - c) Existen algunas características de la mezcla de diseño que están relacionados con la calidad superficial y debe ser considerada para aplicaciones exigentes con respecto a la capacidad de llenado y de paso o cuando se usa HACRF; un mayor volumen de pasta aumenta el precio del material, sin embargo, para el hormigón reforzado con fibras puede ser una necesidad a fin de evitar el bloqueo.
 - d) El elemento fabricado con el mayor volumen de pasta fue el que evidencio una mejor calidad de acabado.
- 5) Por lo que respecta a la aplicación del HAC en la construcción de componentes de edificación de una vivienda, se ha utilizado con éxito la metodología de dosificación UPC para diseñar un hormigón autocompactante destinado a la elaboración de unos muros y una solera para un forjado sanitario.
- a) En el caso de los muros se han superado con éxito los estrictos requisitos de forma y acabado, obteniendo buenos resultados en términos de autocompactabilidad y prestaciones mecánicas. Esto ha permitido la reducción del tiempo de llenado del muro (Fase 1: 12 m³), actividad que finalmente fue ejecutada en 30 minutos. Cabe mencionar que, según el personal de obra, hormigonar el mismo elemento con hormigón vibrado tradicional hubiera demandado aproximadamente 4 horas.
 - b) Además, se ha eliminado por completo, tanto en los muros como en la solera, cualquier necesidad de vibrado, con la consiguiente reducción de ruido y mejora del ambiente de trabajo.
 - c) De forma complementaria esta aplicación evidenció que en los casos de elementos arquitectónicos, en los que el aspecto final tiene una consideración importante, es esencial el control en obra de las características y propiedades de los encofrados.
 - d) Los ensayos realizados sobre el HAC endurecido evidenciaron las adecuadas propiedades del material, tanto en términos de uniformidad como en cuanto a sus propiedades mecánicas.
 - e) En el caso particular de la solera, el HACRF pudo ser logrado sencillamente adicionando las fibras al camión hormigonera, con el correspondiente ajuste de la dosificación. Aunque los coeficientes de bloqueo evidenciaron una baja capacidad de relleno debido a la presencia de fibras, el material pudo colocarse sin inconvenientes. A

partir de estos resultados, resulta evidente que la evaluación de la autocompactabilidad debe necesariamente estar relacionada con las características del elemento a hormigonar; como se puede observar en el presente ejemplo, resulta innecesario evaluar la resistencia al bloqueo del HAC si la estructura a hormigonar no presenta barras de armadura u otro tipo de obstáculos para su llenado.

- f) La eliminación del armado convencional de la solera redonda en la ganancia de tiempos de ejecución.

Por último, y en lo referente a la formación profesional, el desarrollo del presente Proyecto Final de Carrera ha aportado una serie de experiencias enriquecedoras que se pueden resumir en las siguientes:

- a) Participar y colaborar con miembros vinculados con la investigación.
- b) Entender y poner en práctica conceptos dados en la escuela.
- c) Verificar en la práctica la factibilidad de proponer o innovar nuevas tecnologías.
- d) Comprender y manipular el comportamiento de un material por excelencia en la construcción de la edificación.
- e) Expresar mis ideas de forma escrita, técnicamente y de forma hablada.
- f) Comprender lo importante y difícil que es realizar un trabajo con calidad profesional.

VOCABULARIO BÁSICO

Adiciones: materiales inorgánicos divididos de manera fina con actividad puzolánica (puzolanas, cenizas volantes, escorias granuladas, humo de sílice, etc.)

Aditivos: productos químicos que modifican las propiedades del hormigón fresco o del endurecido (superplastificantes, cohesionantes, etc.) y cuya proporción está limitada al 5% en peso con respecto al conglomerante.

Aditivos superplastificantes del tipo policarboxilato: aditivos químicos que en términos químicos, basado en moléculas complejas con un alto grado de flexibilidad, y comprenden diferentes grupos funcionales y con diferentes longitudes de cadena. Los policarboxilatos se basan en copolímeros de ácido acrílico y grupos éter de ácido acrílico; crean una capa de adsorción de gran volumen alrededor de las partículas de cemento debido a sus largas cadenas laterales, que impide la floculación y facilita la alta fluidez de la pasta de cemento.

Aditivos moduladores de la viscosidad: son aditivos químicos que mejoran sustancialmente la cohesión del hormigón y, por tanto, limitan la pérdida de agua por *exudación* y minimizan la tendencia a la *segregación del hormigón*. Su empleo junto con superplastificantes de última generación permite obtener hormigones estables a pesar de tener una gran fluidez y, por tanto, gran facilidad de mezclado, bombeo y colocación.

Anillo J: instrumento de ensayo que se utiliza a efectos de evaluar las habilidades de fluir y de pasar entre barras de armadura del hormigón autocompactante. Tiene como objetivo principal evaluar la *resistencia al bloqueo* o *capacidad de paso* del HAC.

Áridos extremos: áridos utilizados en las mezclas de hormigón que por sus características de forma y absorción de agua presentan una singularidad particular (a modo de ejemplo, los áridos de naturaleza volcánica)

Asbesto molido: nombre de un grupo de minerales del tipo silicato que ocurren en la naturaleza y que pueden ser separados en fibras. Las fibras son fuertes, duraderas y resistentes al fuego.

Axisimétrico: (flujo) significa que el flujo posee simetría respecto de los ejes principales. Una de las principales características es que en cierto modo se garantiza cierta homogeneidad en lo que a comportamiento estructural se refiere.

Autocompactabilidad: capacidad del hormigón de compactarse bajo el efecto de su propio peso.

Bentonitas: es una arcilla de grano muy fino, de alta plasticidad y tixotropía. En el caso del material bentonita-cemento utilizado en la construcción, la mezcla resultante se mantiene en estado líquido durante un tiempo gracias a la propiedad retardante de la primera, que aporta a la mezcla impermeabilidad y plasticidad.

Bloqueo: características que se manifiesta como una interrupción del flujo.

Caja en L: instrumento de ensayo que tiene como objetivo evaluar la *habilidad del hormigón para pasar entre las barras* que simulan las armaduras en condiciones de flujo continuo.

Cal hidratada: La cal hidráulica se obtiene de la cocción a baja temperatura. Se utiliza para la elaboración de morteros de alta resistencia; le confiere al material una gran plasticidad y trabajabilidad, fuerte adherencia en diferentes superficies, poca tendencia a la fisuración, buena elasticidad y durabilidad, buena impermeabilidad al agua, permeabilidad al vapor y transpirabilidad.

Calor de hidratación: El hormigón genera calor durante su endurecimiento como resultado del proceso químico por el cual el cemento reacciona con el agua para formar una pasta dura y estable. El calor generado se denomina calor de hidratación; varía en cantidad y en velocidad según los distintos cementos. El calor de hidratación resulta en particular útil en el hormigonado a bajas temperaturas ya que a menudo genera el calor suficiente para suministrar una temperatura de curado sin que sean necesarias otras fuentes de calor, por ejemplo en elementos de mayor masa.

Caolín: arcilla de color blanco, de la cocción a 600°C se obtiene el metacaolín que se utiliza como adición mineral en la fabricación de hormigones y cementos.

Capacidad de relleno: capacidad que tienen los hormigones autocompactantes de fluir y rellenar un molde o encofrado sin ayuda externa y sin que queden coqueas o nidos de grava.

Capacidad de paso: también llamada *resistencia al bloqueo*, es la característica de un hormigón autocompactante de pasar entre las barras de la armadura, obstáculo o huecos sin producirse bloqueo por parte de los áridos gruesos.

Capacidad de deformación: o *fluidez de la muestra* de hormigón.

CEM I: Corresponde a la clasificación de los cementos Portland o comunes por TIPO según el RC 97, se refiere esencialmente a la composición de los distintos elementos que lo componen. Los cementos tipo II son los intermedios entre los I y los siderúrgicos o puzolánicos, permitiendo una graduación continua entre unos y otros. Los cementos CEM III corresponden a cementos con un alto porcentaje de escoria siderúrgica que actúa, junto con el clinker de conglomerante hidráulico.

Cenizas volantes: son los residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados. Se utilizan como adiciones para hormigones. La EHE establece que se podrán utilizar cenizas volantes como adición en el momento de la fabricación del hormigón, únicamente cuando se utilice cemento tipo CEM I.

Cemento con alto contenido de velita: que provoca menor calor de hidratación y mayores resistencias a largo plazo. El empleo de este tipo de cemento podría

ser útil en elementos masivos, donde un hormigón con un alto contenido de cemento convencional puede inducir fisuraciones por efectos térmicos.

Coefficiente de bloqueo (C_{bE}): es un indicador de la habilidad para pasar, del hormigón autocompactante, por aberturas estrechas, que incluye la *capacidad de deformación* y la *resistencia al bloqueo*.

Cohesión: propiedad que indica la capacidad del hormigón de mantenerse unido.

Comportamiento pseudoplástico: desde el punto de vista reológico, se dice que el hormigón tiene un *comportamiento pseudoplástico*, es decir, su *viscosidad plástica* disminuye al aumentar el gradiente de velocidad aplicado. Lo anterior da lugar a un hormigón con una elevada estabilidad, es decir, mínima tendencia a la *segregación* y *exudación*).

Conglomerante o ligante: cemento más adiciones.

Curva de flujo: El comportamiento reológico se representa por medio de un diagrama denominado, "*curva de flujo*", en donde la *tensión umbral* se representa en el eje de las ordenadas, y la velocidad de deformación, en el eje de las abscisas.

Deformabilidad: se entiende como la capacidad de un material o elemento en el control de las deformaciones.

Diatomeas: Las diatomitas son rocas silíceas, formadas como consecuencia de la acumulación de caparazones de diatomeas, que son algas microscópicas, propias de aguas tanto marinas como dulces, cuyo caparazón está constituido por sílice. Sus aplicaciones están relacionadas con sus propiedades físicas: baja densidad, alta porosidad, alta capacidad, baja conductividad térmica, alto punto de fusión y moderado poder abrasivo.

Embudo en V: (instrumento para el ensayo del embudo en...) Tiene como objetivo evaluar la *habilidad de fluir* o *capacidad de relleno del hormigón*; así como también, determina su *capacidad de paso* en áreas restringidas en dirección vertical y bajo su propio peso.

Escoria granulada: de alto horno..., es el residuo no metálico que se obtiene en el alto horno por la fusión de minerales de hierro, enfriado de manera repentina con agua o vapor y aire, compuesto principalmente por silicatos y aluminosilicatos cálcicos.

Escurrimiento: ensayo de... *docilidad* o trabajabilidad del hormigón fresco. El *ensayo de escurrimiento*, tiene por objeto evaluar cuantitativamente la *habilidad* o *facilidad de fluir* del hormigón bajo efecto de su propio peso, sin la presencia de obstáculos que le impidan el movimiento; este ensayo permite valorar cualitativamente y en términos visuales, si se está en presencia de una mezcla que presenta *segregación*.

Esqueleto granular: estructura generada por la interconexión de los áridos, excluyendo la pasta de cemento.

Estabilidad: capacidad del hormigón de mantener una distribución homogénea de sus componentes mientras se encuentra en estado fresco.

Estabilidad dinámica: capacidad del hormigón de mantener una distribución homogénea de sus componentes durante el transporte y la colocación.

Estabilidad estática: capacidad del hormigón de mantener una distribución homogénea de sus componentes después de colocado, mientras se encuentra en estado plástico.

Exudación: ascensión del agua de amasado hacia la superficie del hormigón fresco tras la separación de ésta de la pasta de cemento. Este fenómeno puede producirse por diferentes motivos.

Filler: áridos cuya mayor parte pasa por el tamiz 0,063 mm y que se obtiene por tratamiento de los materiales de los que provienen.

Finos: partículas con tamaño inferior a 0,125 mm. Incluye cemento, fracción fina de los áridos, adiciones y filler.

Fluidez: propiedad que indica la capacidad de comportarse como un fluido, capacidad de fluir del hormigón en estado fresco. Para el hormigón podríamos decir que la fluidez le da una menor viscosidad y una menor tensión umbral.

Habilidad de fluir: o *capacidad de relleno del hormigón*. Se dice de una de las características de la autocompactabilidad.

Habilidad de paso: se dice de la capacidad del HAC de pasar entre aberturas estrechas si segregarse.

HAC: son las iniciales de Hormigón Autocompactante.

HACRF: son las iniciales de Hormigón Autocompactante Reforzado con Fibras.

Hormigón convencional: hormigón que requiere algún método de compactación para alcanzar una adecuada compacidad.

Humo de sílice: puzolana muy fina obtenida como un subproducto, resultado de la reducción de sílice de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico.

Índice de estabilidad: basado en la observación de la superficie del hormigón después de la descarga del hormigón, o en el hormigón escurrido en el ensayo de *extensión de flujo*. Dicho índice, puede tener valores del orden de 0 a 3, el valor 0 indica la ausencia de segregación y el valor 3 indica una clara evidencia de segregación, acumulación de áridos y la presencia de una gruesa capa de pasta sobre la superficie.

Matriz: en hormigones reforzados con fibras, se denomina matriz a la mezcla de base, a la cual se le incorporan las fibras.

Mortero: conjunto de pasta y áridos con tamaño menor o igual a 4 mm.

Opus caementicium: (*opus*: obra, *caementae*: fragmentos de piedras diversas) los romanos denominaban en este sentido a un material compuesto de cal, puzolana y piedras trituradas, con propiedades hidráulicas, químicas y mecánicas.

Pasta: conjunto de finos, agua y aire.

Polvos de roca: áridos finos.

Propiedades reológicas del hormigón: se dice de las propiedades de deformación y flujo que afectan al hormigón.

Reología: ciencia que estudia la deformación y flujo de los materiales vinculando las relaciones entre esfuerzo aplicado, deformaciones y el tiempo.

Resistencia al bloqueo: es decir, capacidad de pasar entre las barras del armado.

Resistencia a la segregación: o estabilidad dinámica y estática, que significa lograr una distribución uniforme del árido en toda su masa.

Retracción: comportamiento del hormigón debido a la pérdida de agua en estado endurecido. Pueden ser de dos tipos, la *retracción endógena*, que es agua que se consume durante el proceso de hidratación del cemento y producida a primeras edades; y la *retracción por secado* que ocurre durante la pérdida posterior de agua por evaporación y se desarrolla en un plazo más prolongado de tiempo.

Robustez: capacidad de una dosificación de hormigón autocompactante de asegurar las condiciones de autocompactabilidad ante pequeñas variaciones de sus componentes o condiciones de fabricación.

SSC: referencia en inglés de hormigón autocompactante (Self Compacting Concrete)

Segregación: reparto no uniforme de los áridos dentro de la masa de hormigón mientras está en estado fresco.

Superficie específica: es una propiedad de los sólidos la cual es la relación entre el área superficial total y la masa del sólido, o volumen en bruto, o área en la sección transversal. Es una magnitud científica derivada que puede ser utilizada para determinar el tipo y propiedades de un material. Se la define tanto como área superficial dividida por masa (m^2/kg), o área superficial dividida por el volumen (m^2/m^3) Es una magnitud que posee especial importancia en el caso de análisis de adsorción y reacciones en superficies.

Tamaño Máximo de los Áridos (TMA): Se denomina tamaño máximo D de un árido grueso o fino, la mínima abertura de tamiz UNE EN 933-2 que cumple los requisitos generales recogidos en la tabla 28.3.a EHE, en función del tamaño del árido. Las limitaciones están determinadas en el punto 28.3.1 de la instrucción española.

Tensión umbral (τ_0): resistencia inicial que hay que vencer para poner en movimiento el hormigón.

Tiempo abierto o tiempo de uso: es el lapso de tiempo desde la fabricación y durante el cual se mantienen las características de autocompactabilidad del hormigón.

Tixotropía: característica de un material de perder fluidez en reposo recuperándola al aplicarle energía.

Viscosidad (μ): resistencia a fluir del material una vez que el flujo ha comenzado, en rigor, el término se refiere a la viscosidad plástica.

Viscosidad plástica: ver definición anterior.

BIBLIOGRAFÍA

Libros y artículos de referencia

1. Aguado, A. (2007) *“Aplicaciones estructurales del hormigón con fibras”*. UPC (www.bmbupc.org)
2. Alonso, M. M.; Palacios, M. y Puertas, F. (2008) *“Aditivos superplastificantes basados en PC y PE. Estudios de compatibilidad con cementos de diferente composición”*, en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp. 115-124.
3. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, (2008) Monografía M-13 *“Hormigón Autocompactante: Diseño y aplicación”*, Ed. ACHE, p.p1-142.
4. Baronetto, C.; López, A.; Oshiro, A.; Positieri, M.; Giaccio, G.; y Zerbino, R. (2008) *“Hormigón autocompactante arquitectónico con residuo del proceso de la trituración de rocas”*, en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp. 223-232.
5. Barragán, B. E. (2002) *“Failure and Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete”*, Tesis Doctoral, Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona.
6. Barragán, B. E.; Pacios, A. y Serna, P. (2008) *“Hormigón Autocompactante”*, Ed. Barragán, Pacios, Serna, Barcelona, pp.1-768.
7. Barragán, B. E. y Zerbino, R. (2002) *“Propiedades y aplicaciones estructurales de los hormigones reforzados con fibras de acero”*, en *Revista Ciencia y Tecnología del Hormigón N°9*, LEMIT, La Plata, Argentina, pp. 47-70.
8. Barragán, B. E. y Zerbino, R. (2008) *“Creep behavior of cracked steel fiber reinforced concrete beams”*, en BEFIB 2008, 17-19 Septiembre 2008, Chennai.
9. Borralleras Mas, P. (2006) *“Instituto Óscar Domínguez de Arte y Cultura Contemporánea de Santa Cruz de Tenerife”* en *Admixtures News N° 10*, octubre, BASF.
10. Borralleras Mas, P. (2008) *“Hormigón autocompactante para aplicaciones convencionales”*, en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp. 449-458.
11. Bravo Sobrino, M. (2004) *“Caracterización y utilización del hormigón autocompactable”*. Tesina de la Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, UPC.
12. Calavera Ruiz, J. (2004) *“Ejecución y control de estructuras de hormigón”*. Ed. Intemac, Madrid, pp. 937.
13. CIB Working Commission W 29 (1971) *“Tolerances on blemishes of concrete, CIB report n° 24, Tolerances on blemishes of concrete”*; Report prepared by CIB Working Commission W29 "Concrete Surface Finishings", Rotterdam, p8.
14. EPG 2005, *“The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification Production and Use”* en <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>
15. EFNARC (The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems) (2002) *“Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete”*, en <http://www.efnarc.org>
16. Fernández Gómez, J. y Burón, M. (2005) *“Guía Práctica para la utilización del hormigón autocompactante”*, Ed. Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones (IECA) pp. 42.

17. Fernández Cánovas, M. (2004) *"Hormigón"* Ed. 7ª, Colegio de Ingenieros Caminos Canales y Puertos, Madrid, pp. 666.
18. Galan Gutiérrez, L. y Amador Blanco, J. (1994) *"Hormigón"* Ed. 4ª EATM, Madrid.
19. Gettu, R. y Agulló, L. (2003) *"Estado del arte del hormigón autocompactante y su caracterización"*, Informe C4745/1, Universidad Politècnica de Catalunya.
20. Gomes, P.C.C., Gettu, R., Agulló, L. y Bernad, C. (2002) *"Diseño de hormigones autocompactables de alta resistencia. Procedimiento para su dosificación y métodos de caracterización"*, en revista Cemento-Hormigón, nº 832, pp. 30-42.
21. Granju J.L., Rossi P., Chanvillard G., Mesureur B., Turatsinze A., Farhat H., Boulay C., Serrano J.J., Fakhri P., Roque O. y Revlon P. (2000) *"Delayed behaviour of cracked SFRC beams"*, en Proceedings Fifth RILEM Symposium on fibre-reinforced concrete, Lyon, September, 2000.
22. *"Hormigón, diseño, construcción y ejemplos"* (2007) Detail Praxis, Ed. GG, Barcelona. pp.110.
23. IMASATEC (2009), <http://www.imasatec.com> [consultado septiembre 2009]
24. Instrucción de hormigón estructural, EHE-08 (2008) Ministerio de Fomento, Madrid. pp.344.
25. Jiménez Montoya, P.; García Meseguer, A. y Morán Cabré, F (2004) *"Hormigón armado"*, Ed. 14ª Gustavo Gili, Barcelona. pp.846.
26. López, A; Tobes, J.M; Zerbino, R.; Giaccio, G.; Positieri, M.J y Oshiro, A. (2008) *"Incorporación de color al hormigón autocompactante"*, en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp.195-204.
27. Martínez, J.F. y Segura P. (2008) *"HAC blancos de alta resistencia en el Puente del Tercer Milenio (Zaragoza)"*, en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp.729-738.
28. Meca, J.M (2008) *"Hortransa, aplicación de hormigón autocompactante en viviendas VPO"*, en Admixtures News Nº 15, octubre, BASF.
29. Mambrini, C; Rosell, J. y Tacca, A. (1998) *"Arquitectura, construcció i ciutat en la historia d'occident"*, Ed. Garsineu, Tremp. 1-113 pp.
30. Montero Fernández de Bobadilla, E. (2006) *"Puesta en obra del hormigón"*, Ed. Consejo General de la Arquitectura Técnica de España.
31. Müller, W. y Vogel, G. (1985) *"Atlas de arquitectura 2. Del románico a la actualidad"*, Ed. Alianza, Madrid.
32. Navarro Vaquerizo, J.M. y Puerta Gutiérrez F. (2008) *"El viaducto de Navia. Una experiencia en Hormigón autocompactable"* en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp.703-716.
33. Omya (2007), <http://www.omya.com> [consultado septiembre 2009]
34. Pacios Álvarez, A. y Barragán, B.E. (2009) *"Specification for Surface Quality of Architectural Self-Compacting Concrete Elements"*, COINVEDI 2009- 1er Congreso Internacional de Investigación en Edificación Organizado por la Universidad Politècnica de Madrid, Madrid, 2009.

35. Pacios, A.; Olmos, I.; Flores, D. y González, Martín, O. (2008) *“Relación entre el control de recepción y el acabado en elementos de hormigón arquitectónico”*, en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp.495-506.
36. Pajares, I.; Barbará, J.; Barragán, B. y Ramos, G. (2008) *“HAC con carbonatos cálcicos micronizados en polvo y en slurry”*, en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp.89-98.
37. Pintado, X. y Barragán, B. (2008) *“Evaluación de la homogeneidad del HAC utilizado en el refuerzo de túneles”*, en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp. 439-448.
38. Pous de la Flor, J.; Cerrolaza, L.; de la Gándara, L. y Ávila Macías, J.M (2008) *“Uso del hormigón autocompactante en la remodelación de la Plaza de la Encarnación de Sevilla. Experiencias y conclusiones”*, en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp. 759-768.
39. Rigueira, J. y Serna, P. (2008) *“Dosificación y control de ejecución del HAC utilizado en la construcción de las pilas del puente en la ronda norte de Valencia”*, en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp. 717-727.
40. RILEM TC162-TDF (2002) *“Test and design methods for steel fiber reinforced concret bending test, final recommendation”*. Materials and Structures Vol. 35, pp. 579-582.
41. RILEM TC 162-TDF (2003) *“Test and design methods for steel fiber reinforced concrete, σ - ϵ design method”* Materials and Structures, Vol. 36.
42. Santana Rodríguez, R; (2008) *“Método de diseño para HAC con áridos extremos”*, en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp. 153-164.
43. Soriano, F. (1998) *“Hacia una definición de la planta profunda, de la planta anamórfica y de la planta fluctuante”*, Ed. El Croquis. pp.81-82.
44. Tobes, J.M.; Zerbino, R.; Torrijos, M.C., López, A. y Giaccio, G. (2008). *“Hormigones autocompactantes fabricados con diferentes tipos de árido grueso”*, en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp. 165-174.
45. Tobes, J.M.; Monetti, D.; López, A.; Giaccio, G. y Zerbino, R. (2007). *“Hormigones autocompactables reforzados con fibras”*, en Revista Ciencia y Tecnología del Hormigón N°14, LEMIT, La Plata, Argentina, pp. 37-56.
46. Torrijos, M.C., Tobes, J.M.; Giaccio, G. y Zerbino, R. (2005) *“Estudio de la distribución del esfuerzo en hormigones con fibras”*, en revista Ciencia y Tecnología del Hormigón, N°12, pp. 31-46.
47. Turmo, J., Banthia, N., Gettu, R., y Barragán, B. (2008) *“Estudio del comportamiento a cortante de vigas de hormigón reforzado con fibras”*. Materiales de Construcción, 58 (292): 5-13 doi: 10.3989/mc.2008.40507
48. Velasco, C. (2008) *“Refuerzo con micro-HAC de los arcos del puente sobre el río Rumblar en la A-4”*, en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp. 749-758.

49. Zerbino, R.; Agulló, L.; Gettu, R. y Aguado A. (2000) “*Criterios y alternativas para la evaluación de la tenacidad en hormigones con fibras de acero*” en Revista de Obras Públicas, España, pp. 23-30, 2003.
50. Zerbino, R.; Barragán, B.; García, T.; Agulló, L. y Gettu, R. (2008) “*Efectos de la temperatura sobre los parámetros reológicos y las propiedades ingenieriles del hormigón autocompactante*” en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp. 317-326.

Revistas especializadas

51. *Admixture News*, Revista de Actualidad y Tecnología. Ed. BASF (www.admixtures.basf-cc.es)
52. *AV Proyectos 004* (2004) Ed. Arquitectura Viva, Madrid, pp.80.
53. *Tectónica N°3. Hormigón “In situ” (I)* (2004) Ed. ATC Ed. S.L, Madrid, pp. 124.
54. *Tectónica N°25. Hormigón (III)* (2007) Ed. ATC Ed. S.L, Madrid, pp. 124.

Normas

Para el empleo de hormigones autocompactantes en España, la reglamentación a considerar es la Instrucción del Hormigón Estructural EHE, que incluye, para el año 2008, especificaciones de los hormigones autocompactantes.

Las Normas UNE 83361 (Ensayo de escurrimiento), UNE 83362 (Ensayo de la caja en L) y UNE 83364 (Ensayo de escurrimiento en embudo en V) describen los ensayos que sirven para identificar los hormigones autocompactantes.

55. Anejo 17, “*Hormigón Autocompactante*”. Instrucción EHE, Ministerio de Fomento, 2008
56. Norma ASTM–C1610 “Standard test method for static segregation of Self-Consolidating Concrete using column technique”
57. Norma ASTM-C1611 “Standard test method for slump flow of Self-Consolidating Concrete”.
58. UNE 83361:07. Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez. Ensayo del escurrimiento.
59. UNE 83362:07. Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Ensayo del escurrimiento con el anillo japonés.
60. UNE 83363:07. Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Método de la caja en L.
61. UNE 83364:07. Hormigón autocompactante. Determinación del tiempo de flujo. Ensayo del embudo en V.
62. UNE EN 14651/2005. Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).

ANEXOS