

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tesisenred.net](http://www.tesisenred.net)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

# Caracterización de las propiedades del hormigón autocompactante asociadas al esqueleto granular

tesis doctoral realizada por:

Ana Carolina Parapinski dos Santos

dirigida por:

Antonio Aguado de Cea

Luis Agulló Fite

Barcelona, junio de 2010

Universitat Politècnica de Catalunya  
Departamento de Ingeniería de la Construcción

TESIS DOCTORAL



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, me gustaría agradecer a Dios por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y, por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de desarrollo de la tesis.

Mi más amplio agradecimiento al doctor Antonio Aguado de Cea, director de esta tesis, por la oportunidad de estudiar y madurar no solo en el ámbito intelectual pero también en el personal, por el aporte de sus conocimientos científicos, por el constante apoyo y dedicación y, sobre todo, les doy las gracias por la motivación de seguir adelante.

De igual manera me gustaría dar las gracias al doctor Luis Agulló quien ha participado de forma muy cercana en todas las fases de desarrollo de esta tesis y sobre todo, por su apropiada orientación que en mucho me ha guiado para obtener este resultado final.

Asimismo, me gustaría agradecer hoy y siempre a mi familia porque a pesar de la distancia ustedes me brindan el ánimo, el apoyo y la alegría que me dan la fortaleza necesaria para seguir adelante. A mi esposo y amigo, Noé, por su gran paciencia, dedicación, cariño, apoyo, motivación y alegría, y principalmente, por compartir y perseguir junto a mí mis sueños.

También un especial agradecimiento al Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España, por la beca FPI otorgada para desarrollar mis estudios. Así como a la empresa PROMSA S.A., por el convenio de colaboración con la UPC, en el que se enmarcó esta tesis; especialmente a Domènec Masò, quien con su experiencia ha permitido acortar el trabajo, aportando una gran colaboración.

A mis inestimables amigos y compañeros del departamento de Ingeniería de Construcción y del doctorado, en especial a Betty, Felipe, Filipe, Selma, Mabel, Georgia, Álvaro, Miguel, Sérgio, Sandra y a todos aquellos que se han agregado al grupo durante estos años.

Un especial agradecimiento a todas aquellas personas que han convivido conmigo, ya sea compartiendo piso o simplemente compartiendo buenos momentos, en especial a Cibely, Elke Patty, Flávio, Agnés, Marc, Rosmary, Nayara, Juliana, Claudia y Myrthes.

Igualmente agradezco al doctor Surendra Shah, por la oportunidad de desarrollar mi estancia en Northwestern University, y a mis compañeros Zoe, Giri, Shijo, Cris, Mark, Amedeo, Cristine, Raissa, Paramita, que a pesar del poco tiempo, me han brindado la oportunidad de conocerlos.

Me gustaría agradecer todo el apoyo del personal docente y administrativo del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la UPC. Igualmente, quiero hacer presente mi reconocimiento a todo el personal del Laboratorio de Tecnología de Estructuras.

A lo largo de este tiempo de trabajo he contado con el apoyo y colaboración de muchas personas, seguramente muchas más de las que pude nombrar en este texto. A todas ellas, quiero dejar registrada mi gratitud. Muchas gracias por haberme enseñado, compartido, apoyado o simplemente por haber estado a mi lado durante este tiempo.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	4
1.3. METODOLOGÍA EMPLEADA Y ESTRUCTURACIÓN DE LA TESIS .....	5
 <b>CAPÍTULO 2: ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....</b>	 <b>9</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	9
2.2. EL HORMIGON AUTOCOMPACTANTE .....	10
2.2.1. Definición del Hormigón Autocompactante.....	10
2.2.2. Antecedentes.....	11
2.3. MATERIALES CONSTITUYENTES.....	12
2.3.1. Conglomerantes .....	13
2.3.2. Finos .....	13
2.3.3. Áridos.....	15
2.3.4. Aditivos Superplastificantes .....	15
2.3.5. Agentes Modificadores de Viscosidad.....	16
2.4. MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN .....	17
2.4.1. Método de Okamura et al. ....	18
2.4.2. Modificaciones y adaptaciones del método de Okamura et al. ....	19
2.4.3. Método del CBI.....	20
2.4.4. Método del JSCE .....	21
2.4.5. Método del LCPC .....	21
2.4.6. Método de dosificación UPC .....	22
2.4.7. Otros métodos.....	22
2.5. PROPIEDADES DE UN HAC EN ESTADO FRESCO .....	24
2.5.1. Características y ensayos normalizados .....	24
2.5.2. Ensayos no normalizados .....	28
2.5.3. Reología .....	29
2.6. PROPIEDADES DE UN HAC EN ESTADO ENDURECIDO.....	36
2.6.1. Resistencia a compresión .....	37
2.6.2. Resistencia a tracción .....	38
2.6.3. Módulo de Elasticidad .....	38
2.6.4. Adherencia.....	39

2.7. DEFORMACIONES DIFERIDAS .....	41
2.7.1. Retracción.....	41
2.7.2. Retracción en HAC.....	44
2.7.3. Fluencia.....	46
2.8. SÍNTESIS DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	51
<b>CAPÍTULO 3: PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>53</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	53
3.2. BASES TEÓRICAS.....	54
3.3. SISTEMA DE PUESTA EN OBRA .....	56
3.4. CAMPAÑAS DE CONTRASTACIÓN EXPERIMENTAL.....	57
3.4.1. Planificación General.....	57
3.4.2. Caracterización en estado fresco: 1ª campaña experimental.....	58
3.4.3. Caracterización en estado endurecido: 2ª campaña experimental .....	59
3.4.4. Caracterización Reológica: 3ª campaña experimental.....	66
3.4.5. Estudios de segregación – 4ª campaña .....	67
3.4.6. Dosificaciones empleadas .....	68
3.4.7. Proceso de amasado.....	70
3.5. INCIDENCIAS EN EL DESARROLLO DE LOS ENSAYOS .....	71
3.5.1. Ensayo de Adherencia .....	71
3.5.2. Ensayo de Fluencia .....	73
3.6. RESUMEN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS .....	77
<b>CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN EN ESTADO FRESCO .....</b>	<b>79</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	79
4.2. ESTUDIO DE LAS VARIACIONES DEL CONTENIDO DE AGUA.....	80
4.2.1. Dosificaciones.....	80
4.2.2. Resultados de los Ensayos.....	81
4.2.3. Dificultad de identificar la segregación .....	81
4.2.4. Ecurrimiento .....	83
4.2.5. Límite superior de validez del ensayo de escurrimiento: modelo del cono.....	87
4.2.6. Ecurrimiento con anillo japonés .....	89
4.2.7. Aire Ocluido y Densidad .....	91
4.2.8. Medidas reológicas (tensión umbral “ $\tau_0$ ” y viscosidad plástica “ $\eta$ ”) .....	92
4.2.9. Correlaciones de los resultados reológicos con el escurrimiento.....	95
4.2.10. Resultados de resistencia a compresión .....	96

---

4.3. MODELO TEÓRICO.....	98
4.3.1. Bases de partida y ecuación del modelo.....	98
4.3.2. El parámetro A.....	100
4.3.3. El parámetro B.....	100
4.3.4. Los parámetros C y k.....	102
4.3.5. El parámetro n.....	104
4.3.6. Aplicación del modelo para predecir escurrimientos.....	105
4.3.7. Comprobación a través de regresión no lineal.....	106
<b>CAPÍTULO 5: PROPIEDADES MECÁNICAS.....</b>	<b>109</b>
5.1. INTRODUCCIÓN.....	109
5.2. DOSIFICACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE ENSAYOS.....	110
5.3. RESULTADOS EN ESTADO FRESCO.....	112
5.3.1. Escurrimiento.....	112
5.3.2. Escurrimiento con Anillo Japonés.....	114
5.3.3. Caja L.....	116
5.3.4. Densidad y Aire Ocluido.....	117
5.4. RESULTADOS EN ESTADO ENDURECIDO.....	118
5.4.1. Resistencia a compresión.....	118
5.4.2. Módulo de deformación.....	124
5.4.3. Comportamiento a tracción.....	129
5.4.4. Adherencia.....	133
<b>CAPÍTULO 6: DEFORMACIONES DIFERIDAS.....</b>	<b>137</b>
6.1. INTRODUCCIÓN.....	137
6.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS DOSIFICACIONES.....	138
6.3. RESULTADOS DE RETRACCIÓN.....	139
6.3.1. Características específicas.....	139
6.3.2. Análisis conjunto entre las series – Retracción Autógena.....	140
6.3.3. Análisis conjunto entre las series – Retracción Total.....	141
6.3.4. Comparación de los resultados de retracción total con las normativas.....	143
6.3.5. Propuesta para el coeficiente de consistencia del modelo del ACI 219.....	148
6.3.6. Corrección de la retracción autógena medida en base al modelo el EC-2.....	149
6.4. RESULTADOS DE FLUENCIA.....	151
6.4.1. Características específicas.....	151
6.4.2. Análisis conjunto entre las series – Fluencia.....	152



---

6.4.3. Comparación de los resultados de fluencia con las normativas .....	156
<b>CAPÍTULO 7: ENSAYO DE PENETRACIÓN .....</b>	<b>159</b>
7.1. INTRODUCCIÓN .....	159
7.2. ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA SEGREGACIÓN .....	160
7.2.1. Planteamiento metodológico .....	160
7.2.2. Ensayos en fresco .....	160
7.3. ENSAYO DE PENETRACIÓN UPC – PROMSA .....	163
7.3.1. Estudios preliminares .....	163
7.3.2. El diseño del aparato .....	165
7.4. CAMPAÑA DE CONSTRASTACION UPC.....	167
7.5. CAMPAÑA DE CONSTRASTACIÓN.....	171
7.5.1. Dosificaciones .....	171
7.5.2. Resultados y análisis.....	173
<b>CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>179</b>
8.1. INTRODUCCIÓN .....	179
8.2. CONCLUSIONES GENERALES.....	180
8.3. CONCLUSIONES ESPECIFICAS .....	181
8.3.1. Relativas al estado fresco del HAC .....	181
8.3.2. Relativas al estado endurecido del HAC.....	182
8.3.3. Relativas a las deformaciones diferidas .....	183
8.3.4. Relativas al ensayo de penetración propuesto .....	184
8.4. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN .....	184
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>187</b>
<b>ANEJO A CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS .....</b>	<b>205</b>
<b>ANEJO B DETALLES EXPERIMENTALES .....</b>	<b>243</b>
<b>ANEJO C MODELOS DE CÁLCULO DE RETRACCIÓN Y FLUENCIA .....</b>	<b>267</b>
<b>ANEJO D DETALLES EXPERIMENTALES DE LA 4ª CAMPAÑA .....</b>	<b>297</b>

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1 – Tabla resumen de los métodos de dosificación propuestos .....	20
Tabla 2.2 – Tabla resumen de los métodos de dosificación propuestos .....	23
Tabla 2.3 – Requisitos generales para la autocompactabilidad – (Tabla A17.2 EHE–08) .....	26
Tabla 2.4 – Clases de escurrimiento – (Tabla A17.3 EHE–08) .....	27
Tabla 2.5 – Clases de viscosidad – (Tabla A17.4 EHE–08) .....	27
Tabla 2.6 – Clases de resistencia al bloqueo – (Tabla A17.5 EHE–08) .....	27
Tabla 2.7 – Ensayos de caracterización en fresco no normalizados (BIBM et al, 2005) .....	28
Tabla 2.8 – Comparación de parámetros reológicos de HAC en distintos países (Adaptado de Wallevik 2003) .....	34
Tabla 3.1 – Dosificaciones empleadas de HAC en diversas obras.....	55
Tabla 3.2 – Objetivos de la primera campaña experimental realizada.....	58
Tabla 3.3 – Ensayos realizados. ....	60
Tabla 3.4 – Dosificaciones empleadas en la 1ª campaña experimental (kg/m <sup>3</sup> ) .....	68
Tabla 3.5 – Dosificaciones empleadas en las 2ª y 3ª campañas experimentales (kg/m <sup>3</sup> ) .....	69
Tabla 3.6 – Resumen de los ensayos realizados en cada campaña experimental .....	78
Tabla 4.1 – Tabla Resumen de las dosificaciones (en kg/m <sup>3</sup> ).....	81
Tabla 4.2 – Resultados del estudio de las variaciones del contenido de agua .....	82
Tabla 4.3 – Temperatura y HR referente a los días de hormigonado .....	85
Tabla 4.4 – Variable “D” en función de la altura “H” en la simulación del ensayo escurrimiento. ....	88
Tabla 4.5 – Resultados Reológicos– tensión umbral y viscosidad plástica .....	93
Tabla 4.6 – Valores de los parámetros obtenidos por regresión no lineal .....	106
Tabla 5.1 – Dosificaciones empleadas (kg/m <sup>3</sup> ).....	111
Tabla 5.2 – Resumen de las probetas y sus características.....	111
Tabla 5.3 – Resumen de la planificación de probetas por amasada .....	112
Tabla 5.4 – Resultados de los ensayos de escurrimiento (cm) .....	113
Tabla 5.5 – Resultados del ensayo de escurrimiento con anillo japonés.....	115
Tabla 5.6 – Tabla Resumen de los ensayos de Caja L.....	117
Tabla 5.7 – Tabla Resumen de los ensayos de densidad y aire ocluido.....	118
Tabla 5.8 – Resistencia a compresión en probetas cilíndricas (LTE) .....	119
Tabla 5.9 – Resistencia a compresión en probetas cúbicas (PROMSA) .....	121
Tabla 5.10 – Relación entre probetas cilíndricas x cúbicas.....	122
Tabla 5.11 – Coeficiente $\beta_{cc}$ para las diferentes edades (en días) .....	123
Tabla 5.12 – Módulo de Deformación del HAC (GPa) a diferentes edades. ....	124
Tabla 5.13 – Diferentes formulaciones del Módulo de Deformación Secante (MPa) .....	125

---

Tabla 5.14 – Módulo de deformación según resultados experimentales y distintos códigos (GPa). .....	127
Tabla 5.15 – Coeficiente $\beta_{cc}$ para las diferentes edades – módulo de elasticidad .....	129
Tabla 5.16 – Tracción Indirecta $F_t$ (MPa). Ensayo Barcelona, brasileño y flexo–tracción. ....	130
Tabla 5.17 – Relación de Resistencias – Tracción/Compresión (en %) .....	132
Tabla 5.18 – Resultados del ensayo de adherencia $\sigma_{adher}$ , $\sigma_{rot}$ (en MPa) y $P_{rot}$ (en KN).....	134
Tabla 6.1.– Características de las dosificaciones .....	138
Tabla 6.2. – Regresión no lineal – retracción total .....	142
Tabla 6.3. – Regresión no lineal – retracción autógena.....	150
Tabla 6.4 – Regresión no lineal – Fluencia .....	155
Tabla 7.1 – Resultados del ensayo propuesto.....	164
Tabla 7.2 – Dosificaciones empleadas.....	167
Tabla 7.3 – Resultados del ensayo de penetración.....	168
Tabla 7.4 – Dosificaciones empleadas ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).....	172
Tabla 7.5 – Resumen de los resultados de los ensayos de segregación .....	174

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diferentes vistas de HAC .....	3
Figura 2.1 – Relación entre superficie específica de los finos, y cantidad de material fino incorporado al hormigón (sólo resultados óptimos) Aguilar y Barrera, (2003). ....	14
Figura 2.2 – Mecanismo de Bloqueo (adaptado de Skarendahl y Petersson, 2000) .....	25
Figura 2.3 – Curvas de flujo de distintos hormigones. (Adaptado de Wallevik, 2003) .....	29
Figura 2.4 – Influencia de dosificación en el comportamiento reológico de un HAC (Adaptado de Emborg, 1999) .....	32
Figura 2.5 – Diferentes HAC con umbral de cizallamiento similar .....	36
Figura 2.6 – Propuesta para medir el umbral de cizallamiento. (Roussel, 2007) .....	36
Figura 2.7 – Retracción plástica y autógena.....	42
Figura 2.8 – Reversibilidad de la retracción (Adaptado de Mindess et al, 2003).....	44
Figura 2.9 – Fluencia y recuperación de fluencia.....	46
Figura 2.10 – Fluencia y recuperación de fluencia (adaptado de Santos, 2005) .....	47
Figura 2.11 – Efecto Pickett (Adaptado de Bazant y Wittmann, 1982).....	48
Figura 2.12 – Distribución no lineal de tensiones – HC X HAC.....	49
Figura 3.1 – Esquema de los dos tipos de esqueleto granular.....	54
Figura 3.2 – a) Determinación del Módulo de Elasticidad b) Ensayo Barcelona.....	61
Figura 3.3 – Ensayo de Adherencia. a) Vista del ensayo b) Sensor LVDT.....	62
Figura 3.4 – Ensayo de Adherencia. a) Probeta rota con mordaza B) Detalle mordaza .....	62
Figura 3.5 – Galga embebida y bases extensométricas utilizadas para las medidas de retracción y fluencia.....	63
Figura 3.6 – a) Probeta de retracción autógena. b) Probeta de retracción total.....	64
Figura 3.7 – Bastidor de carga usado en el ensayo de fluencia .....	65
Figura 3.8 – Detalle del gato rotulado abierto .....	65
Figura 3.9 – Refrentado mediante resina epoxi.....	65
Figura 3.10 – Viscosímetro .....	66
Figura 3.11 – Curva de flujo .....	66
Figura 3.12 – Probetas de adherencia. a) Antes del hormigonado. b) Acabado inadecuado... ..	71
Figura 3.13 – Detalle del apoyo en el ensayo de adherencia.....	72
Figura 3.14 – Detalle de la chapa metálica y neopreno del ensayo de adherencia.....	73
Figura 3.15 – Fisuras en el ensayo de fluencia situadas junto a las rótulas.....	74
Figura 3.16 – Detalle del acabado del mortero de relleno. ....	74
Figura 3.17 – Detalle de la probeta después del 3er intento de carga. ....	75
Figura 3.18 – Esquema de la inestabilidad producida por la presencia de dos rótulas en el bastidor de carga. ....	76
Figura 4.1 – HAC segregado (D3–202). A) Ensayo de escurrimiento. B) Probeta rota.....	83

Figura 4.2 – HAC segregado con diagnóstico visual preciso (D3–217). .....	83
Figura 4.3 – Resultado de los ensayos de escurrimiento sin segregación. a) Dosificación continua. b) Dosificación discontinua .....	84
Figura 4.4 – Resultados del ensayo de escurrimiento del conjunto de series a) Dosificación continua. b) Dosificación discontinua .....	86
Figura 4.5 – Simulación del ensayo de extensión de flujo. ....	87
Figura 4.6 – Interpretación altura mínima en el centro del cono: a) Granulometría continua y b) Granulometría discontinua .....	88
Figura 4.7 – Resultado del ensayo de escurrimiento con y sin anillo. ....	90
Figura 4.8 – Resultados de aire ocluido y densidad. ....	91
Figura 4.9 – Curvas de flujo medida a través del reómetro “BML Viscometer 3” .....	92
Figura 4.10 – Parámetros reológicos medidos comparados con la propuesta de Nielson y Wallevik (2003) .....	93
Figura 4.11 – Escurrimiento en función de: a) Tensión umbral b) Viscosidad Plástica. ....	95
Figura 4.12 – T50 en función de: a) Tensión umbral b) Viscosidad Plástica. ....	96
Figura 4.13 – Resistencia a compresión 28 días: a) Dosif. continua b) Dosif. discontinua .....	97
Figura 4.14 – Resistencia a compresión 28 días: a) C3xD3 b) C4xD4 .....	98
Figura 4.15 – Influencia de la relación agua/finos en el escurrimiento. ....	100
Figura 4.16 – Escurrimiento x relación agua/finos para diferentes valores de B. ....	102
Figura 4.17 – Escurrimiento x relación agua/finos para diferentes valores de k. ....	103
Figura 4.18 – Escurrimiento x relación agua/finos para diferentes valores de C. ....	104
Figura 4.19 – Escurrimiento x relación agua/finos para diferentes valores de n. ....	105
Figura 4.20 – Regresión no lineal de los resultados experimentales. ....	106
Figura 5.1 – Comparación de los valores de escurrimiento. Series C–30 y D–30. ....	113
Figura 5.2 – Comparación de los valores de escurrimiento. Series C–60 y D–60. ....	113
Figura 5.3 – Ensayo de escurrimiento con anillo, en hormigones de 30 MPa: a) C30 y b) D30	115
Figura 5.4 – Ensayo de escurrimiento con anillo, en hormigones de 60 MPa: a) C60 y b) D60	115
Figura 5.5 – Ensayo de la caja L para el D60. ....	117
Figura 5.6 – Comparación de resultados de resistencia a compresión entre laboratorios .....	120
Figura 5.7 – Comparación la forma de la probeta .....	121
Figura 5.8 – Comparación de los valores de módulo de deformación medidos. ....	125
Figura 5.9 – Comparación del módulo de deformación medido con el obtenido mediante distintas formulaciones. ....	128
Figura 5.10 – Evolución de la tracción indirecta. a) Ensayo Barcelona b) Ensayo brasileño. ....	130
Figura 5.11 – Roturas en 2, 3 y 4 partes. Ensayo Barcelona .....	133
Figura 5.12 – Ensayo de Adherencia a) $\sigma_{adher}$ b) $\sigma_{rot}$ .....	134
Figura 5.13 – Ensayo de adherencia a 3 días serie C30. ....	135
Figura 6.1 – Comparación de la retracción autógena entre las distintas series .....	140

---

Figura 6.2 – Comparación de la retracción total entre las distintas series .....	141
Figura 6.3 – Comparación de la retracción total con base de datos de Agranati (2008) .....	143
Figura 6.4 – Comparación de la retracción total con modelos de cálculo. ....	145
Figura 6.5 – Comparación de la retracción de secado con el modelo del EC-2 .....	146
Figura 6.6 – Comparación de la retracción total medida con la obtenida según el modelo B3147	
Figura 6.7 – Modelo ACI 219 modificado. ....	148
Figura 6.8 – Corrección de la retracción autógena. ....	149
Figura 6.9 – Comparación de deformaciones por fluencia ( $\epsilon_d$ ) .....	152
Figura 6.10 – Comparación de deformaciones a) Coeficiente de fluencia ( $\phi$ ) b) Fluencia Específica (SC) .....	154
Figura 6.12 – Comparación de los resultados de fluencia con base de datos .....	156
Figura 6.13 – Deformaciones de fluencia – comparación con las normativas.....	158
Figura 7.1 – Columna de segregación – ASTM C1610 .....	161
Figura 7.2 – Plato colector y columna empleada. ....	162
Figura 7.3 – Método de ensayo de estabilidad de tamiz GMT .....	162
Figura 7.4 – Ensayo de penetración (Bui et al, 2002) .....	163
Figura 7.5 – Cilindro empleado en el posible ensayo de segregación del HAC.....	164
Figura 7.6 – Ensayo de penetración a) Principio de Arquímedes P=E b) Resultado 4ª amasada. .....	165
Figura 7.7 – Resultados preliminares del ensayo propuesto .....	165
Figura 7.8 – Aparato propuesto para el ensayo de segregación.....	166
Figura 7.9 – Ensayo de segregación .....	166
Figura 7.10 – Resultados del ensayo de penetración.....	168
Figura 7.11 – Ensayo de escurrimiento – Serie D4–192.....	169
Figura 7.12 – Efectos que actúan en el ensayo propuesto .....	170
Figura 7.13 – Resultados del ensayo de penetración .....	170
Figura 7.14 – Resultados del ensayo de penetración– Serie D4 .....	171
Figura 7.15 – Comparación del ensayo Propuesto X Columna, Tamiz y Penetración.....	175
Figura 7.16 – Ensayo propuesto X escurrimiento. ....	176



# **CAPÍTULO 1:**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1. ANTECEDENTES**

Como es conocido, el proceso de fabricación del hormigón está compuesto por distintas etapas: dosificación y mezcla de los materiales, transporte, puesta en obra, compactación y curado, siendo estas dos últimas fundamentales en el comportamiento mecánico y de durabilidad del hormigón resultante. Con respecto a la compactación, un factor distorsionador puede ser el factor humano, como consecuencia de la falta de formación de los operarios, siendo conocido que el Sector de la Construcción suele ser un sector de acogida de mano de obra barata en el paso del sector agrario al sector industrial, o, actualmente, un primer empleo de la inmigración. Así pues, surge la necesidad de desvincular las prestaciones del hormigón de los posibles errores humanos en la etapa de compactación.

La necesidad de dar respuesta a esta problemática, potenció el desarrollo, a fines de la década de los ochenta, de un nuevo tipo de hormigón en el que la



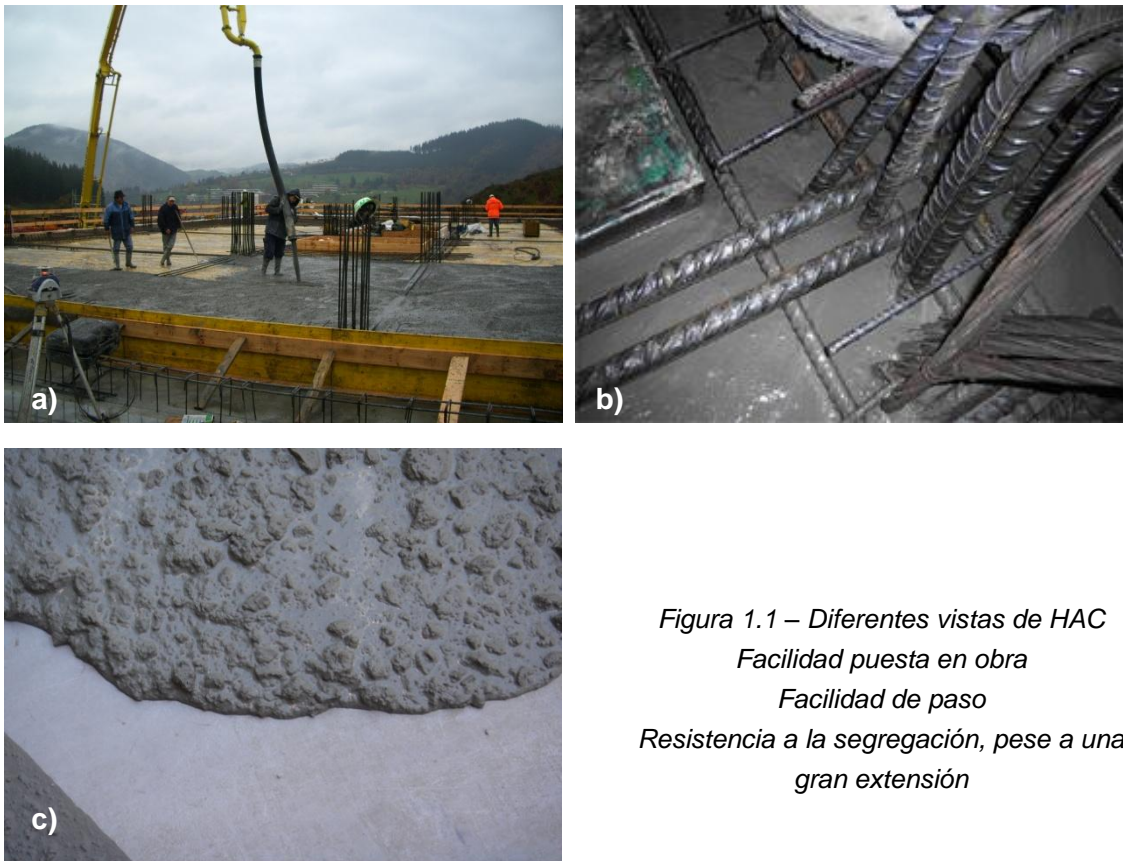
compactación externa no se fuese necesaria. Este hormigón resultante se conoce como Hormigón Autocompactante (HAC) y, se caracteriza por su alto grado de trabajabilidad y su capacidad de fluir a través de elementos estructurales densamente armados simplemente por la acción de su propio peso, rellenando todos los espacios de forma adecuada, sin segregarse.

Por otro lado, con la eliminación de la fase de compactación (usualmente realizada mediante vibrado) y de la limitación que conlleva (altura máxima de cada tongada, etc.) se reduce en gran medida los tiempos de hormigonado además de generar una serie de beneficios como: el mayor rendimiento de la mano de obra, la reducción de ruido ambiente, la mejora de las condiciones de salud y seguridad para los trabajadores.

Para ilustrar estas ideas, en la figura 1a se muestra, por un lado, la facilidad de puesta en obra que representa este tipo de hormigones siendo adaptable a incorporar otros tipos de componentes, por ejemplo, fibras (al que corresponde la foto), áridos ligeros, etc. La figura 1b muestra la versatilidad para pasar por zonas con alta congestión de armaduras, mientras que en la figura 1c, se muestra el labio de avance de un hormigón de estas características, donde se puede observar que no existe segregación a pesar de una gran extensión de flujo.

Por esta razón, el HAC es una solución atractiva tanto en prefabricados como *in situ*, ya sea en obra civil o en edificación. Sin embargo, el desarrollo no es equilibrado y así, mientras que en prefabricación el 70 % corresponde a HAC, esta cifra disminuye de forma significativa en construcción *in situ*, siendo variable en cada uno de los países. En los países del norte de Europa, como Dinamarca, este porcentaje disminuye a un 25% mientras que en el caso de España el valor se reduce aún más alcanzando sólo un 2% (Borralleras, 2008).

Este comportamiento puede responder en el caso de la prefabricación (el hormigón se prepara en la planta) a una sinergia positiva de intereses, por un lado, la reducción de contaminación acústica favorece los intereses de los trabajadores, mientras que por otro, el menor deterioro de los moldes, repercute de forma positiva en el empresario. En el caso de construcción *in situ* la situación no es tan clara, ya que al ser el suministro del hormigón, usualmente externo, los espacios abiertos y los encofrados no tan repetitivos, no hay tanta ventaja como en el caso anterior, por lo que la razón de su empleo hay que buscarla en la complejidad de determinadas zonas de hormigonado, o bien de altos volúmenes que interese reducir tiempos de puesta en obra.



*Figura 1.1 – Diferentes vistas de HAC  
Facilidad puesta en obra  
Facilidad de paso  
Resistencia a la segregación, pese a una  
gran extensión*

Los métodos iniciales de dosificación de estos hormigones respondieron, con frecuencia, a extrapolaciones de criterios de los hormigones convencionales adaptados a criterios empíricos, incidiendo principalmente en las características del material en fresco. Con posterioridad se han desarrollado numerosos trabajos en esta dirección fundamentados, principalmente, en estudios de laboratorio teniendo en cuenta los materiales (principalmente los finos), las características de estos (químicas y físicas) y como estas afectan a las propiedades del hormigón. A pesar de estos esfuerzos, en la actualidad, no existe una metodología única a nivel mundial, para dosificar un HAC. Además cabe resaltar que los métodos existentes no consideran como una variable el sistema de puesta en obra (vertido mediante cubilote o bien por bombeo).

La principal diferencia en la dosificación de este tipo de hormigones (HAC) con respecto a un hormigón convencional (HC) es el gran aporte de finos y el significativo papel de los aditivos químicos específicos (principalmente superplastificantes y modificadores de viscosidad). Ello conduce a un esqueleto granular en el que los áridos representan entre un 60 y un 70% del volumen final del hormigón, pudiendo venir el mismo influenciado por el sistema de puesta en obra, sin que los precedentes

tomen consideración de este aspecto. Todo ello hace que estos hormigones tengan una mayor sensibilidad de sus propiedades en función de su composición y de las características de los materiales constituyentes.

Dada la elevada trabajabilidad que presentan los HAC en estado fresco, ha sido necesario adaptar los ensayos para la caracterización y control de los mismos, con lo que han aparecido diversos ensayos tales como: escurrimiento (o extensión de flujo) (UNE 83361:2007); escurrimiento con anillo japonés (UNE 83362:2007); caja L (UNE 83364:2007); embudo V (UNE 83365:2007), aparte de otros que no han sido normalizados en España. Sin embargo, la medida del riesgo de segregación es compleja y no hay un ensayo mundialmente aceptado para ello, principalmente en los hormigones muy fluidos, por lo que se entiende que es un camino por el que avanzar.

Dado que los HAC tienen, básicamente, los mismos componentes que los HC, los resultados esperables en estado endurecido deben ser en principio similares, aunque influenciados, tanto por el esqueleto granular como por la composición y cantidad de pasta. En el anejo 17 de la EHE08 titulado *Recomendaciones para la utilización del HAC*, no aborda en profundidad este tema, permitiendo utilizar los mismos modelos y formulaciones que en HC si bien hace una breve reflexión de que puede ser diferente, para finalizar diciendo que en el caso de, por ejemplo, la fluencia sea un factor crítico, se deben realizar ensayos específicos. En consecuencia, se debe profundizar en la dirección de la caracterización mecánica de estos hormigones y verificar que los modelos utilizados representan a los mismos o incorporar nuevos modelos.

Para ahondar en todo ello, se ha desarrollado la presente tesis doctoral, enmarcada en la línea de investigación de Tecnología de Hormigón. En su desarrollo se ha contado con el apoyo de un convenio de investigación (CTT 6511) firmado entre la empresa PROMSA del grupo Cements Molins y la Universitat Politècnica de Catalunya. Por otro lado, para desarrollar el tema de los ensayos de segregación se ha tenido la oportunidad de realizar una estancia en Northwestern University (U.S.A).

## 1.2. OBJETIVOS

En base a lo anterior, el **objetivo principal** de esta tesis doctoral es analizar la influencia del esqueleto granular del hormigón autocompactante, asociado al sistema de puesta en obra, sobre las propiedades del hormigón autocompactante en estado fresco, en estado endurecido y en relación a su comportamiento diferido.

Para llegar a este objetivo es necesario cubrir diferentes etapas, que en sí mismas, representan **los objetivos específicos** del presente trabajo y que sin su obtención no se hace posible la consecución del objetivo principal anteriormente mencionado, los cuales son:

- Hacer una revisión crítica y sintética del estado actual del conocimiento en este campo para conocer las lagunas existentes y superar algunas de ellas en el desarrollo del trabajo de investigación propio.
- Establecer las bases teóricas que darán lugar a la vinculación del sistema de puesta con el esqueleto granular.
- Analizar la influencia del esqueleto granular en las propiedades del estado fresco, utilizando los ensayos específicos para caracterizar la autocompactabilidad, la habilidad de paso entre armaduras y la resistencia a la segregación.
- Desarrollar un nuevo ensayo fiable para determinar la segregación, especialmente en hormigones de una elevada extensión de flujo.
- Analizar la influencia del esqueleto granular en las propiedades del estado endurecido, utilizando los ensayos convencionales para caracterizar cada una de sus propiedades y la influencia del tiempo en ellas.
- Analizar la influencia del esqueleto granular en las deformaciones diferidas del hormigón (retracción y fluencia).

### 1.3. METODOLOGÍA EMPLEADA Y ESTRUCTURACIÓN DE LA TESIS

Para alcanzar los objetivos propuestos, se han desarrollado distintos trabajos los cuales dan contenido a esta tesis, estructurada en ocho capítulos, el primero de los cuales corresponde a esta Introducción, y tres anejos. A continuación se describe la metodología seguida en cada uno de los siguientes capítulos.

En el **Capítulo 2** se aporta una panorámica general sobre el estado de conocimiento actual del HAC en que se incluyen los antecedentes que dieron lugar a su desarrollo; asimismo se analizan las diferencias entre los materiales constituyentes del mismo y de un hormigón convencional (HC). Con posterioridad, se resumen los principales métodos de dosificación y se analizan las propiedades tanto en estado

fresco como en estado endurecido y, finalmente, se hace una síntesis del capítulo donde se resaltan las lagunas puestas en evidencia a lo largo del capítulo que se pretende cubrir en esta tesis.

Tras el estado del conocimiento sobre los diferentes aspectos que inciden en la dosificación y caracterización del HAC, en el **Capítulo 3**, se presenta en su primera parte, las bases teóricas en las que se ha apoyado la determinación de los tipos de esqueleto granular a estudiar y la asociación con el sistema de puesta en obra. Con posterioridad, se define el programa de trabajo seguido, señalando los materiales, equipos e instalaciones utilizados en las 4 campañas experimentales realizadas. En total se ha fabricado 6.360 litros hormigón distribuidos en 71 amasadas, lo que representa un importante esfuerzo experimental.

En este capítulo 3 se explican y detallan los aspectos metodológicos asociados al desarrollo de cada una de las campañas experimentales realizadas, así como las dosificaciones empleadas en cada caso, con objeto de favorecer la reproducibilidad de estos ensayos, independientemente de las personas, el lugar o el tiempo, principio básico de cualquier investigación.

El **Capítulo 4** presenta los resultados, de las campañas experimentales realizadas, correspondientes a las propiedades del hormigón autocompactante en estado fresco. En primer lugar, se analiza la influencia del contenido de agua en las propiedades en fresco de las dosificaciones planteadas mediante ensayos de carácter ingenieril (escurrimiento con y sin anillo). En dicho estudio se observa una dificultad para identificar la segregación de la mezcla de hormigón en el ensayo de escurrimiento, cuando el valor de este es elevado.

Con posterioridad, se presenta el análisis de los parámetros reológicos (tensión umbral y viscosidad plástica) en el que se incluye la discusión de como el contenido de agua modifica dichos factores y se estudia la vinculación entre los parámetros reológicos medidos y los resultados de los ensayos ingenieriles. Finalmente, se plantea un modelo del comportamiento en estado fresco del HAC en función de los cambios del contenido de agua, basado en una función exponencial, y se exponen los ajustes de los parámetros de la función propuesta realizados en base a los resultados obtenidos.

Dando continuidad al estudio, el **Capítulo 5** presenta los resultados obtenidos, en cada una de las campañas experimentales, de las principales propiedades del hormigón en estado endurecido y su evolución en el tiempo en las edades contractuales, principalmente, 28 días. Entre estas propiedades están: la resistencia a

compresión y a tracción, el módulo de deformación, y la adherencia. Cabe recordar que esto se ha hecho con dos esqueletos granulares diferentes que responden a dos filosofías de puesta en obra diferentes: vertido mediante cubilote o con bomba.

El **Capítulo 6** se centra en el estudio de las propiedades diferidas del HAC con cada uno de los esqueletos, representadas por la retracción y fluencia. La primera parte de este capítulo está dedicada al estudio de la retracción, separando las medidas de retracción autógena y retracción total para cada una de las series estudiadas; siendo el periodo de medida de 600 días, lo que representa una serie larga en este tipo de ensayos. Con posterioridad, se realiza la contrastación con los modelos de previsión de las normativas actuales y se incluye un factor de ajuste para uno de los modelos refleje el comportamiento medido.

En la segunda parte del capítulo, se presenta el estudio de la fluencia, de forma análoga al de la retracción. En ambas partes, los modelos utilizados para la contrastación son los que se presentan en las siguientes normativas: EHE (2008), CEB-FIP (1990), ACI 209R (1992), EC-2 (1992) y el modelo B3 (Bazant y Baweja, 1995).

Teniendo en cuenta los problemas observados, en el capítulo 4, para evaluar la representatividad de la medición de la segregación para valores altos del escurrimiento, en el **Capítulo 7** se presenta un nuevo método para resolver este problema, el cual pueda emplearse como criterio para la aceptación o no de un hormigón autocompactante in situ. La contrastación de los resultados se ha hecho en dos campañas experimentales, una en la UPC y otra realizada en *Northwestern University* (U.S.A.) en la que se han estudiado 5 tipos de ensayos diferentes, incluido el propuesto, mostrando los resultados la bondad de la propuesta.

En el **Capítulo 8** se exponen las conclusiones derivadas de los distintos trabajos realizados. Estas se exponen en forma de unas conclusiones generales que responden al objetivo principal propuesto y unas conclusiones específicas que obedecen a diferentes aspectos concretos de los trabajos desarrollados. Seguidamente, se presentan las diferentes líneas futuras de investigación que permitirían una continuidad y mayor profundización de varios de los aspectos abordados en la presente tesis doctoral.

En el apartado de **Referencias Bibliográficas** se recogen las principales fuentes bibliográficas consultadas en el transcurso del presente trabajo.

Por último, en el **Anejo A** se presentan las características de los materiales empleados en las distintas campañas experimentales, mientras que en el **Anejo B** se resumen los modelos de estimación de la retracción y fluencia utilizados en el capítulo 6; para finalizar, en el **Anejo C** se muestra la documentación fotográfica de la campaña experimental de segregación.

## **CAPÍTULO 2:**

# **ESTADO DEL CONOCIMIENTO**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

El Hormigón Autocompactante (HAC) representa una evolución en la tecnología del hormigón, ya que el proceso de compactación externa se elimina completamente al emplear este tipo de hormigón. Ello se caracteriza por su alto grado de trabajabilidad y su capacidad de fluir a través de elementos estructurales densamente armados simplemente por la acción de su propio peso, rellenando todos los espacios de forma adecuada, sin segregarse. De modo que, el HAC permite obtener: beneficios económicos (aumento de productividad y reducción de costes); beneficios tecnológicos (estructuras complejas y/o con alta cuantía de armadura); y beneficios relacionados a la reducción de ruidos provenientes de la vibración.

En la actualidad se están desarrollando numerosas investigaciones a nivel nacional e internacional con el objetivo de mejorar la técnica y conocimiento de las propiedades del HAC. En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica de las



principales líneas de trabajo en relación al HAC, enfatizando en los métodos de dosificación, en las propiedades del HAC en estado fresco y en las propiedades mecánicas del mismo en relación a un concreto vibrado.

En primer lugar se presentan la definición del HAC y los antecedentes que dieron lugar a su desarrollo. Con posterioridad, se analizan los materiales constituyentes y sus diferencias en relación a un hormigón vibrado, así como los métodos de dosificación buscando enfatizar sus consideraciones para el diseño del HAC. También, se analizan las propiedades en estado fresco y en estado endurecido del HAC, en relación a un hormigón vibrado y, para finalizar, se hace una síntesis del capítulo donde se resaltan los puntos que se pretende cubrir en esta tesis.

## **2.2. EL HORMIGON AUTOCOMPACTANTE**

### **2.2.1. Definición del Hormigón Autocompactante**

El hormigón autocompactante, se puede definir como aquel hormigón, que es capaz de fluir en el interior del encofrado, llenándolo de forma natural, pasando entre las barras de armadura, y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso, sin presentar segregación de los áridos gruesos (Okamura, 1997).

Estas prestaciones son consecuencia de la fluidez, viscosidad y cohesión apropiadas en las mezclas de estos hormigones y que dan lugar a las tres propiedades básicas del HAC: capacidad de relleno, capacidad de paso y resistencia a segregación. La capacidad de relleno o fluidez no limitada, se refiere a la capacidad del HAC de fluir y rellenar completamente todos los espacios del encofrado, por su propio peso sin vibración. La capacidad de paso es la posibilidad del HAC de fluir a través del armado sin segregación o bloqueos. La resistencia a segregación o estabilidad, es la capacidad del HAC para mantener homogénea su composición, durante el transporte y la puesta en obra.

En el año 2000, Okamura et al. (2000) definen como “hormigón autocompactante de altas prestaciones” aquél hormigón que además de lo anterior también satisface a los dos requisitos citados a continuación. Primero, los efectos derivados de la generación de calor, endurecimiento o retracción por secado deben ser mínimo y, segundo, la permeabilidad del hormigón frente la penetración del oxígeno, cloruros y agua debe ser mínima. Dicha definición se da en el contexto de la primera década de investigaciones en HAC (1989–1999), cuando los primeros HAC

diseñados dieron como resultado hormigones de altas prestaciones debido a los cambios necesarios en la dosificación para obtener la autocompactabilidad (Skarendahl y Petersson, 1999). Dado los buenos resultados experimentados en la práctica ingenieril (ya sea en prefabricados o en aplicaciones *in situ*) surge la necesidad de un desarrollo de HAC también en bajas prestaciones (a partir de 30 MPa) (Gómez y Maestro, 2007).

Actualmente, la definición del HAC se da únicamente en función de su estado fresco, ya que se considera que el HAC *añade a las propiedades del hormigón convencional, en cualquiera de las clases resistentes, la propiedad de autocompactabilidad* (EHE-08).

### 2.2.2. Antecedentes

Durante la década de los años 80 en Japón, los problemas asociados a la falta de homogeneidad y, consecuentemente pérdida de durabilidad del hormigón, tuvieron una gran importancia en numerosas estructuras. La principal causa de este problema fue asociada con una mala compactación del hormigón. En una situación de reducción de trabajadores calificados, la solución para el problema de durabilidad fue desvincular, en la etapa de vibración, la calidad del hormigón de posibles errores humanos.

Inicialmente, la tarea parecía fácil, pues ya se habían utilizado con éxito hormigones sin compactación en los hormigonados sumergidos, y en los hormigonados de recintos estacos. Sin embargo, la cantidad de cemento utilizada en estos casos era elevada, y normalmente este procedimiento se hacía para el hormigón masa, o sea, sin la presencia de armaduras. Con la introducción de los aditivos superplastificantes fue posible el diseño de mezclas fluidas en estado fresco, sin la necesidad de una muy elevada cantidad de cemento.

Como respuesta a estos problemas, se desarrolló el concepto de Hormigón Autocompactante (HAC), introducido inicialmente en Japón en el año 1988 tal como se ha dicho por Okamura (1999), el cual ha experimentado notables avances en las últimas décadas. A partir de este período, numerosas investigaciones se han llevado a cabo en diferentes países, con el objetivo de encontrar una dosificación óptima y económica, que garantice un buen comportamiento del hormigón fresco, así como sus propiedades mecánicas (Skarendahl y Petersson, 1999; Ozawa y Ouchi, 2001; Wallevik y Nielson 2003; Shah, 2005; De Schutter y Boel, 2007, entre otros).

El rápido desarrollo experimentado, especialmente en elementos prefabricados, se debe a las grandes ventajas que presenta el HAC frente al hormigón convencional, debido principalmente a sus propiedades en fresco. Esto conduce a la posibilidad de realizar proyectos más complejos y exigentes en lo que respecta al diseño, y puesta en obra. Asimismo, presenta un coste global reducido, pues el mayor coste de material y ecofrados que requiere este hormigón, se compensa con un menor coste de personal y equipos asociados a la compactación, además de la reducción de los plazos de ejecución de modo considerable. (Benedict y Worsfold, 2005)

Las ventajas del HAC también inciden en los aspectos medioambientales, al reducir los ruidos, especialmente importante en plantas de prefabricación y obras en entornos urbanos (Pacios, 2003); y sobretodo, en aspectos relativos al ambiente de trabajo y la salud laboral, mejorando las condiciones ambientales y eliminando los riesgos laborales imputables a la compactación.

Sin embargo, la dosificación de este tipo de hormigón es más compleja que la de un hormigón vibrado (Sedran, 1999) debido a la necesidad de encontrar un equilibrio entre sus propiedades en fresco que dependen de distintos mecanismos: elevada trabajabilidad, estabilidad después de transportado, y capacidad de paso entre armaduras sin retención de los áridos. Una alta trabajabilidad, suele requerir un elevado volumen de pasta, el cual conduce a un incremento de la retracción y de la fluencia. Además, los diferentes materiales existentes en el mercado y sus diferencias entre distintas regiones geográficas, hacen el proceso de dosificación aún más complejo.

### **2.3. MATERIALES CONSTITUYENTES**

Los materiales utilizados en los hormigones autocompactantes, son los mismos que los empleados en los hormigones de compactación convencional (en España se siguen los requisitos de la UNE 83.001:2000 y de la EHE-08). En este tipo de hormigón, la regularidad y el control, tienen una importancia especial, pues las propiedades del HAC se muestran más sensibles a pequeñas variaciones que las de un hormigón de compactación convencional. (Skarendahl y Petersson, 2000)

Los HAC, requieren un mayor aporte de finos para garantizar la trabajabilidad y consecuentemente la autocompactabilidad, considerándose como finos, todos aquellos materiales con diámetro menor que 0.125 mm, incluyendo la fracción

correspondiente de la arena. Además, es imprescindible el uso de un aditivo superplastificante.

### **2.3.1. Conglomerantes**

La condición de autocompactabilidad se consigue, tal como se ha mencionado anteriormente, gracias a un alto contenido de finos. En sus orígenes, los HAC contenían exclusivamente cemento, lo que conducía a mezclas muy ricas, en las que la finura del cemento condicionaba las condiciones de viscosidad requeridas para evitar la segregación. Sin embargo, con ello se incrementan los costes y el impacto ambiental.

Con los avances realizados en el diseño de HAC, se empezaron a emplear otros materiales como adición de finos activos (cenizas volantes, humo de sílice, escoria de horno alto, etc). Esta circunstancia hace que la finura del cemento pase a ser propiedad de segundo orden de importancia, y que básicamente se puedan utilizar todos los cementos estándar. Por lo tanto, no existen en principio, requisitos específicos en cuanto el tipo de cemento a utilizar en un HAC, siendo los criterios de selección similares a los empleados para un hormigón convencional (Gettu y Agulló, 2004), relacionados al tipo de aplicación. Normalmente los cementos I – 42.5 y I – 52.5 (y su variante R) son utilizados para prefabricado, y aplicaciones donde se demande elevada resistencia inicial, y los cementos tipo II, para hormigón preparado con mayor demanda de mantenimiento de la consistencia.

No obstante, existen referencias sobre el uso de cementos no convencionales en la literatura técnica, por la necesidad de características especiales (Bilberg, 1999.), como un cemento con alto contenido de belita que provoca menor calor de hidratación o cementos esféricos relacionados a las propiedades en fresco.

La cantidad mínima de cemento debe satisfacer la demanda de finos, y de tal modo, que ésta, esté equilibrada con la cantidad de adición, y con la demanda de agua. Esta cantidad es relativa, ya que estará en relación al tipo de adición empleada (básicamente si es activa o no).

### **2.3.2. Finos**

El elevado aporte de finos en el HAC garantiza la apropiada cohesión a la mezcla, necesaria para evitar la segregación de los áridos gruesos y la exudación de agua. Se entiende por finos, todo el material con diámetro menor que 0,125 mm, incluyendo el cemento, la fracción de arenas y las adiciones.

Un contenido de finos adecuado sitúa en el entorno de  $550 \text{ kg/m}^3 \pm 5\%$  (Santos et al, 2006), o del 23%, en peso, de la masa del hormigón (Anejo 17 de la EHE-08). Si se requiere un hormigón de la gama baja de resistencias, es preciso ir al mínimo de conglomerante con un papel importante del filler, mientras que si se necesita un hormigón de alta resistencia, se tiene que ir a una dosificación alta de conglomerante.

Además, el contenido de finos depende de la naturaleza del mismo, es decir de sus propiedades. Una de las principales propiedades de los finos es su superficie específica. Con relación a esto Aguilar y Barrera (2003) exponen una correlación entre el contenido de finos y la superficie específica, tal como se observa en la Figura 2.1. La curva indica que la cantidad óptima de finos, depende del tipo de finos empleado, es decir, de la superficie específica que esté presente, pero con valores alrededor de los  $555 \pm 5\% \text{ Kg/m}^3$ , confirmando los valores citados anteriormente.

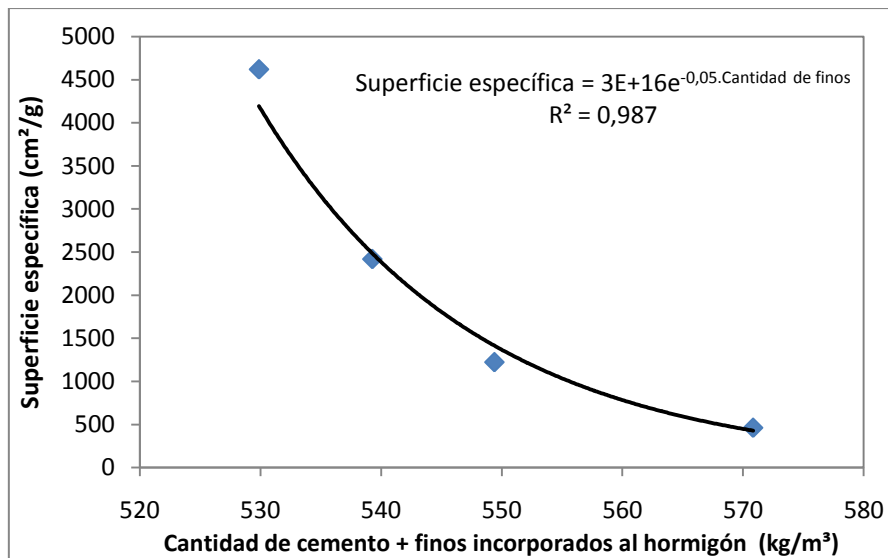


Figura 2.1 – Relación entre superficie específica de los finos, y cantidad de material fino incorporado al hormigón (sólo resultados óptimos) Aguilar y Barrera, (2003).

Los finos, debido al efecto filler, ocupan los espacios que de otro modo estarían ocupados por agua, densificando la estructura final. Además, estos actúan como centros de nucleación, acelerando los procesos de hidratación del cemento a edades tempranas, en especial de  $C_3S$  (Moosberg-Bustnes et al. 2004; Poppe et al. 2005; Ye et al. 2007). Ahora bien, este efecto beneficioso sobre la resistencia es posible siempre que su contenido sea limitado, pues si aumenta mucho la superficie específica de los áridos en relación al contenido de cemento la eficiencia aglomerante del cemento puede disminuirse (Topçu y Ugurlu, 2003).

Sobre la naturaleza de la adición, no existe limitación: cenizas volantes, filler calizo (o de otra naturaleza), escoria de alto horno, microsílíce, etc. Existen en la literatura técnica una gran cantidad de investigaciones, que engloban la utilización de diversos materiales como adiciones en el HAC (1<sup>o</sup>–1999, 2<sup>o</sup>–2001, 3<sup>o</sup>–2003, 4<sup>o</sup>–2005 y 5<sup>o</sup>–2007 International RILEM Symposium of Self Compacting Concrete entre otros), pero no se ahondara en el tema, dado que no es el objetivo de esta investigación.

### **2.3.3. Áridos**

Los criterios empleados para los áridos en la fabricación de un hormigón vibrado, sirven para el HAC. El tamaño máximo del árido grueso, normalmente no sobrepasa los 20 mm, estando usualmente comprendidos entre 12 y 16 mm. Esta limitación se impone por dos motivos:

1. Para poder obtener mayor uniformidad en el movimiento, y menor riesgo de bloqueo en el flujo.
2. Asociada a los criterios de proyecto para garantizar el hormigonado en zonas con una alta cantidad de armadura, donde los espacios entre barras son pequeños.

Sin embargo, se puede utilizar un tamaño máximo superior, siempre y cuando se garantice la uniformidad del flujo, sin bloqueo ni segregación.

No existen limitaciones en cuanto a la naturaleza de las arenas empleadas. Se recomienda emplear arenas con granulometrías continuas, y preferiblemente, sin formas lajosas (típico de las arenas silíceas machacadas). Generalmente, el contenido de arena puede representar el 60–50 % de la cantidad de árido total, en función de la naturaleza y cantidad de la adición empleada y de cemento y de las características de la grava.

Si la arena presenta un cierto aporte de finos ( $\phi < 0,125\text{mm}$ ), se puede reducir la demanda de adición y cemento, para obtener la cantidad de finos demandados. Asimismo se puede emplear arenas correctoras para satisfacer la demanda de finos.

### **2.3.4. Aditivos Superplastificantes**

En la actualidad, prácticamente la totalidad de los HAC incorpora en su composición uno a mas aditivos. La adecuada selección del aditivo es importante para

la fabricación con éxito del HAC, de forma general, antes de su selección se recomienda conocer sus funciones y dosificaciones de trabajo recomendadas y sus limitaciones. Respecto a los superplastificantes se han empleado diferentes tipos, entre ellos, los naftalenos, las melaninas y los policarboxilatos. (Hartmann, 2002). Los policarboxilatos, son los aditivos más adecuados para su aplicación en el HAC, por presentar una elevada eficiencia (Hartmann, 2002 y Gettu y Agulló, 2004). Este tipo de aditivo, crea una capa de adsorción de gran volumen, alrededor de las partículas de cemento, debido a sus cadenas laterales que impide la floculación, y facilita la alta fluidez de la pasta de cemento, reduciendo la cantidad de agua hasta un 40%.

### **2.3.5. Agentes Modificadores de Viscosidad**

Los agentes modificadores de viscosidad, (AMV) son aditivos químicos que mejoran la cohesión del hormigón, limitando la pérdida de agua por exudación y minimizando la tendencia de segregación. Una de sus principales aplicaciones es el HAC (Roncero y Magarotto, 2008).

Su empleo es necesario, siempre que los finos no sean capaces de aportar suficiente cohesión a la mezcla. Asimismo, los AMVs pueden ser usados como controladores de las variaciones en las características de los materiales, es decir, permitiendo 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 y, por ello, su empleo puede contribuir a homogeneizar la calidad de estos hormigones y facilitar su producción (Borsoi et al, 2006). En cualquier caso se debe señalar que son totalmente necesarios en algunas aplicaciones como HAC ligero con fibras (Klein et al, 2010).

Además, en algunos casos puede ser necesario desarrollar HAC con bajo contenido en finos, para ello, se requiere el empleo de AMVs que permitan un control eficiente de la reología. Sin embargo, hay que tener en cuenta el coste de los aditivos (normalmente muy superior a los otros componentes) y, que en ese caso, se está recorriendo a procesos químicos (aditivos) para sustituir a un esqueleto granular adecuado.

Asimismo, la compatibilidad entre aditivos (AMVs – superplastificantes) debe ser evaluada para evitar cualquier tipo de problemas, como un retraso en el fraguado o una elevada cantidad de aire ocluido.

## 2.4. MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

Actualmente, no existe una metodología única para dosificar un HAC a nivel mundial. Diversos son los investigadores que se destacan en la literatura a este nivel, con propuestas de metodologías para la obtención de mezclas estables, algunos de los cuales se muestran en los siguientes subapartados. La diferencia de estos métodos con respecto a los métodos tradicionales, es que los métodos para dosificar un HAC, se fundamentan en una base esencialmente empírica. (Gettu y Agulló, 2004).

En el HAC, la dosificación tiene como objetivo principal atender los requisitos de fluidez, resistencia a la segregación y la capacidad de paso, es decir, las propiedades en el estado fresco.

Para obtener estas propiedades, se limita el volumen de árido grueso, para mejorar la capacidad de paso entre el armado. Consecuentemente, se incrementa el volumen de la pasta, asociado a una baja relación agua /finos, y con un aditivo superplastificante se obtiene la fluidez y la resistencia a segregación.

Varios tipos de materiales han sido utilizados de modo satisfactorios en el HAC, dependiendo del tipo de aplicación, de las características necesarias (ciclos de hielo–deshielo, resistencia a agentes químicos, resistencia inicial, etc.), y del origen de los distintos componentes. Es por ello, que es muy difícil concebir una dosificación universal de HAC (Skarendahl y Petersson, 2001).

Los modelos de dosificación se desarrollan en base a diferentes necesidades, pero se puede identificar dos diferencias principales en el proceso de diseño de las mezclas de un SCC para un hormigón vibrado (Skarendahl y Petersson, 2001):

- La primera consideración para un HAC, es que obtenga propiedades de autocompactabilidad satisfactorias. Estas características están gobernadas normalmente por el contenido de pasta, y a veces por la relación agua/finos. La resistencia a compresión es controlada por la combinación de los diferentes finos (cemento portland, cenizas volantes, escoria, polvo de piedra, etc.)
- El número de posibles combinaciones de materiales para un HAC, representa que debe conciliarse un gran número de variables, y sus interacciones normalmente dificultan una previsión con suficiente seguridad. Después de conocidas las propiedades de cada componente, se requiere una segunda etapa de ensayos, a veces intensivos, de combinaciones viables.



Normalmente, esto se realiza primeramente en morteros, para después realizarlos en hormigones.

En los apartados siguientes, se presenta un resumen de algunos métodos de dosificación presentados hasta la fecha. Inicialmente, se presentan los primeros métodos propuestos más detalladamente (pues son la base de los demás), y el método propuesto en la UPC, para con posterioridad, presentar una tabla resumen con algunos de los muchos métodos propuestos en los últimos años en diferentes países.

#### **2.4.1. Método de Okamura et al.**

El primer método de dosificación propuesto fue resultado de los extensivos trabajos realizados en la Universidad de Tokio por Okamura, Ozama y sus coautores (Ozawa et al, 1990. Ozama y Okamura 1994). Este método se aplica a un número limitado de componentes, incluyendo el árido grueso (5–20 mm), árido fino con tamaño máximo de 5 mm y cemento con un bajo calor de hidratación. El uso de agentes modificadores de viscosidad no fue contemplado. Normalmente, se añade a la mezcla un aditivo incorporador de aire, para garantizar la resistencia a los ciclos de hielo y deshielo y, también, para reducir el contenido de cemento.

El método considera que el hormigón está dividido en dos fases: árido grueso y mortero. El volumen del árido grueso, se fija en un 50% del volumen sólido del hormigón, mientras que el volumen de árido fino, se fija en un 50% del volumen del mortero (considerando como árido las partículas más grandes que 0.09 mm, y como finos las partículas inferiores a este valor). La relación final agua/finos y el contenido de superplastificantes, se ajustan a través de ensayos en morteros, (escurrimiento y embudo–V) para garantizar algunos parámetros de autocompactabilidad propuestos.

En este método se adopta un escurrimiento de 650 mm como criterio de aceptación, ajustándose el contenido de superplastificante hasta obtenerla. La autocompactabilidad se consideraba satisfactoria, si el tiempo de escurrimiento en el ensayo de Embudo–V se situaba entre 10 y 20 segundos. También se empleó el ensayo de la caja en U, fijándose el criterio de una altura final mínima de 300 mm.

No hay mención de la resistencia a compresión del hormigón en este método, pero como el cemento es el único material fino utilizado, y las relaciones agua/cemento resultantes son bajas, la resistencia final obtenida es adecuada para numerosas aplicaciones estructurales. Asimismo, este método no considera la influencia del sistema de la puesta en obra.

#### 2.4.2. Modificaciones y adaptaciones del método de Okamura et al.

Con el objetivo de hacer las mezclas más eficientes en relación a la cantidad de pasta, y ampliar la gama de materiales utilizados, varios investigadores propusieron modificaciones al método de Okamura et al, entre los que cabe señalar a:

- Universidad Tecnológica de Kochi/ Universidad de Tokio:

Edamatsu, Nishida y Ouchi (1999), ajustaron el método de determinación de la cantidad necesaria de los áridos finos en la pasta (propusieron que el valor sea fijado en un 40% del volumen), en base a las diferencias entre las propiedades de forma y distribución granulométrica, y a los diferentes tipo de materiales utilizados como finos, entre ellos: cemento portland, escoria de alto horno, cenizas volantes y filler calizo.

Ouchi, Hibino, Okamura y Ozawa (Ouchi et al, 1997; Ozawa et al, 2000) ajustaron la relación agua/finos y la dosificación del superplastificante, determinando cada uno de estos parámetros independientemente, con lo que disminuyeron los ensayos necesarios. Por otro lado, no se hace referencia a aplicación de aditivos modificadores de viscosidad.

- Universidad de Delft

En los trabajos de la Universidad de Delft, emplearon el método de Okamura aplicando con materiales holandeses, utilizando un tamaño máximo del árido grueso de 16 mm (Pelova, Takada y Walraven, 1998). Concluyeron que el contenido de este material, puede aumentarse a un 60% del volumen de los sólidos, correspondiendo al punto de máximo empaquetamiento. Con este contenido de árido grueso, se necesita un 10% menos de pasta, resultando en una mezcla más eficiente. El método también se hizo aplicable a los otros materiales holandeses ensayados, como el humo de sílice, las cenizas volantes de la gasificación del carbón y cenizas volantes micronizadas.

- University College London

En este método se definen algunos límites para las dosificaciones de HAC en base a los resultados de un extensivo programa de ensayos de laboratorio, tal como se muestra en la Tabla 2.1. Cabe resaltar que no se considera el empleo de agentes de viscosidad. (Domone, 2000; Chai, H. 1998; Domone y Chai, 1996).

En ella se puede observar que la principal diferencia con el método de Okamura et al, es el rango del contenido de arena (variable entre 30% y 50% del volumen del mortero), y diferentes rangos de valores para cada componente en función del tamaño del árido (árido 5–20 mm o árido 5–10 mm).

Tabla 2.1 – Tabla resumen de los métodos de dosificación propuestos

	Árido 5–20 mm		Árido 5–10 mm	
Contenido de árido grueso (Kg/m <sup>3</sup> )	0,5 x PA*		0,5 a 0,54 x PA*	
Contenido máximo de agua (Kg/m <sup>3</sup> )	200		200	
Relación agua/finos en peso	0,28 a 0,4		0,28 a 0,5	
Relación agua/(finos + árido fino)	0,12 a 0,14		0,12 a 0,17	
Volumen de pasta (l/m <sup>3</sup> )	0,38 a 0,42		0,38 a 0,42	
Volumen de arena/Volumen de mortero (Va/Vm)	Agua/finos	Va/Vm	Agua/finos	Va/Vm
	<0,3	0,4	<0,3	0,4
	0,3–0,34	0,4–0,45	0,3–0,34	0,4–0,45
	0,34–0,4	0,45–0,47	0,34–0,4	0,45–0,47
	0,4–0,5	No usar	0,4–0,5	>0,47

\*PA– peso unitario del árido compactado en estado saturado con superficie seca.

### 2.4.3. Método del CBI

El procedimiento propuesto por Peterson et al (1996), es conocido como el método del CBI (Swedish Cement and Concrete Research Institute). La principal diferencia con el método de Okamura et al, es como se determina el contenido de los áridos y después el mortero. Este método tiene tres fases, en la primera se determina el volumen mínimo de pasta teniendo en cuenta las propiedades de los áridos (proporción óptima entre el árido grueso y fino), criterios de durabilidad, y las características de aplicación. En la segunda fase, se obtiene la composición de la pasta basándose en la caracterización reológica del mortero y, en la tercera fase, se verifican las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido.

Para la determinación del volumen mínimo de pasta, se utiliza un modelo empírico que define el riesgo de bloqueo de cada fracción del árido y el rango de tamaños del mismo teniendo en cuenta el espacio a través del cual el hormigón tiene que fluir (entre barras de armadura). En este método se considera adecuado un escurrimiento de 70 cm, y se evalúa la estabilidad, observando la tendencia de segregación en los bordes de este ensayo. La capacidad de paso es medida con la Caja en L, y se considera que el coeficiente de bloqueo debe ser superior a 0,8.

El método suele conducir hormigones con una resistencia relativamente elevada, apropiados para numerosas aplicaciones estructurales.

#### 2.4.4. Método del JSCE

La sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE), propusieron en 1998, (referenciada en Skarendahl, 2001) un procedimiento de dosificación, que hace una distinción entre los hormigones que obtienen la autocompactabilidad, basados únicamente en el aporte de finos, de los que tienen la adición de un aditivo modificador de viscosidad, y de los que tienen ambos. Además, clasifica los HAC en 3 grupos según el grado de autocompactabilidad. Los parámetros de dosificación, dependen del tipo del HAC.

El tamaño máximo del árido grueso utilizado es de 20 mm o 25 mm., y su contenido depende del grado de autocompactabilidad requerida, variando de un 28% a 35% en volumen del hormigón. El contenido de finos, se sitúa entre los 13 y 19% en volumen del hormigón. El contenido de aire está situado sobre los 4,5%. En cualquier caso los contenidos definitivos se ajustan mediante pruebas sobre el HAC fresco y endurecido.

Este es el primer método que considera los aditivos modificadores de viscosidad, obteniéndose dosificaciones con un contenido de agua más elevado y con un contenido de finos más bajo. El mismo ha sido fruto de las primeras aplicaciones prácticas del HAC en Japón.

#### 2.4.5. Método del LCPC

Sedrán y de Larrard (1999) desarrollaron en el *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) en Paris, una metodología de dosificación para obtener una mezcla optima (bajo contenido de pasta) con materiales locales, de modo que fuera lo más simple y eficiente posible. El método se basa en un nuevo tipo de reómetro y en el "modelo de suspensión sólida", propuesto por los autores.

Con el reómetro BTRHEOM se caracteriza diferentes parámetros del hormigón fresco, considerándolo como un fluido Bingham. Para facilitar los cálculos matemáticos se implementó el modelo de suspensión sólida en un programa computacional. Así, se optimiza el esqueleto granular, por un análisis de interacciones matemáticas de los diferentes componentes, obteniéndose un máximo empaquetamiento (menor contenido de vacíos). Además, se considera las condiciones de confinamiento del hormigón, teniendo en cuenta un efecto de pared.

Con este planteamiento, se hace una relación con el sistema de puesta en obra, ya que durante el bombeo, el hormigón es forzado a pasar por una tubería

estrecha, comparada con las dimensiones del molde, modificándose el empaquetamiento asociado al sistema de puesta en obra, como es el caso de un vertido directo en relación al bombeo.

El tipo de cemento, superplastificante y filler, se deciden en base a la experiencia local, por ejemplo, si se requiere una mejor resistencia a 28 días, se utiliza como filler las cenizas volantes. Además, en el procedimiento de optimización, se fija inicialmente las relaciones cemento/filler y agua/cemento.

A través de ensayos en el hormigón fresco, se ajustan la relación agua/cemento y el contenido de superplastificante, utilizando el ensayo del cono de Marsh. Se calcula la resistencia a compresión, empleando la ecuación de Feret. Si la resistencia no corresponde a la deseada, se repita la optimización con otra combinación de conglomerante. La verificación final, se realiza con algún ensayo de habilidad de paso, como por ejemplo el ensayo de la Caja en U.

Los autores enfatizan el uso de esqueletos granulares continuos, aunque esto resulte en un contenido de agua ligeramente superior, debido a la tendencia a segregación de las dosificaciones discontinuas.

#### **2.4.6. Método de dosificación UPC**

Investigadores de la Universidad Politécnica de Cataluña (Gomes 2002, Gomes et al. 2002) han desarrollado una metodología de dosificación de HAC de altas resistencias, utilizando materiales españoles y técnicas de ensayos sencillas. En dicha propuesta, se determina la dosis de saturación del superplastificante, para la pasta constituida por cemento, agua (baja relación agua/cemento 0.33–0.40) y finos, utilizando el ensayo del cono de Marsh. Posteriormente, mediante el ensayo del mini slump se fija la relación filler/cemento, considerando una pasta de fluidez alta y cohesión moderada. Por otro lado, se obtiene la relación arena/grava (de estos componentes secos), con el mínimo contenido de vacíos sin compactar. Con esta relación arena/grava, se fabrican hormigones con distintos volúmenes de pasta, tomando como mezcla optimizada, la que cumple los requisitos de autocompactabilidad y resistencia, con el mínimo contenido de pasta.

#### **2.4.7. Otros métodos**

Además de los métodos detallados hasta aquí, muchos otros métodos han sido desarrollados por investigadores en varios países, con características propias. En la

Tabla 2.2 se presenta un resumen de algunos de estos métodos, pudiéndose obtener una información complementaria en las referencias citada en la misma tabla.

Tabla 2.2 – Tabla resumen de los métodos de dosificación propuestos

Método	Referencia	Comentarios
Universidad de Rostock, Alemania	Marquardt <i>et al.</i> 2001	Se basa en el método del CBI, determinando el contenido total de agua en función de la demanda “óptima” de agua de la mezcla, medida por la potencia eléctrica de un motor.
Universidad de Sherbrooke, Canadá.	Khayat <i>et al.</i> 1999	Proponen un modelo estadístico para reducir la cantidad de ensayos para el ajuste de la dosificación del HAC. El modelo se basa en correlaciones matemáticas, entre las propiedades de un HAC observadas en ensayos.
Universidad de Wollongong, Australia.	Bui y Montgomery 1999.	Dosificación de un HAC de altas prestaciones, considerándolo como un material de dos fases (sólida y líquida). Propone expresiones para calcular el contenido mínimo de pasta.
Higher Int. of Construction Engineering, Bulgaria.	Roshavelov, 1999.	Propone una metodología basada en el Modelo de empaquetamiento por densidad lineal (LPDM), sustituyendo los ajustes semi-empíricos por una teoría de física.
CTG, LM <sup>2</sup> S. Francia	Nachbaur <i>et al.</i> 2005	Proponen la aplicación del CEM (Método del hormigón equivalente) para hormigones fluidos para los HAC. El método consiste en hacer un hormigón equivalente con áridos de tamaño máximo 4 mm (arenas), simplificando de este modo los ensayos necesarios.
Universidad Nacional de Ciencia y Tecnología de Taiwan	Hwang y Tsai, 2005	Los autores proponen la aplicación del método DMDA (Densified Mixture Design Algorithm) utilizado para hormigones fluidos, incorporando conceptos geométricos para obtener la máxima compacidad.
Factor de empaquetamiento. Taiwan	Su <i>et al.</i> 2001	La principal consideración es rellenar con pasta los vacíos del árido sin compactar. Se adopta un PF (factor de empaquetamiento) que refleja la pérdida de la máxima compacidad para el HAC. El PF varía de acuerdo con la especificación del HAC propuesto por la JSCE. Se presentan algunas expresiones para el cálculo de los constituyentes, y se verifica mediante ensayos.
Universidad del Porto. Portugal	Nunes y Nunes <i>et al.</i> 2005	Basado en el Método de Okamura, utiliza materiales portugueses, variando los intervalos de aceptación. Hace una correlación con ensayos con reómetros, concluyendo que los ensayos propuestos inicialmente tienen buena fiabilidad.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil.	Tutikian 2004	Basado en un método brasileño para dosificar hormigones vibrados, se hace algunas adaptaciones incluyendo la adición de aditivos y finos, hasta obtener un HAC. El objetivo es dosificar un HAC de forma más económica posible.

## 2.5. PROPIEDADES DE UN HAC EN ESTADO FRESCO

La principal diferencia de un HAC con los hormigones convencionales (HC) es su comportamiento en estado fresco, ello conlleva a cambio de mentalidad con relación a la evaluación de dichas propiedades. El ensayo de asentamiento en el cono de Abrams, tal como se emplea en los HC, deja de tener validez para evaluar la condición en estado fresco de los HAC. Por ello, en diferentes grupos de investigadores han desarrollado infinidad de métodos de ensayo que intentan caracterizar el comportamiento en estado fresco de estos hormigones.

### 2.5.1. Características y ensayos normalizados

Por definición, los HAC deben cumplir con tres parámetros en estado fresco: capacidad de relleno, capacidad de paso y resistencia a la segregación.

La capacidad de relleno está relacionada con la movilidad y fluidez del hormigón. El hormigón tiene que deformarse y moldearse al encofrado únicamente bajo la acción de su propio peso y sin la ayuda de medios mecánicos externos. Para obtener una capacidad de relleno adecuada es necesario reducir la fricción entre las partículas sólidas y mejorar la deformabilidad de la pasta.

La fricción entre las partículas sólidas de la mezcla (árido grueso y fino) reduce la deformabilidad del hormigón. Para reducir la fricción es necesario reducir el contacto entre las partículas, disminuyendo el volumen de áridos, y por lo tanto aumentando el volumen de pasta, optimizando de esta forma el esqueleto granular. En los HAC ello se da, principalmente, con el aumento de finos y con el uso de aditivos superplastificantes. Los superplastificantes reducen la tensión de inicio de flujo del hormigón y mejoran su fluidez sin perjudicar la viscosidad. La utilización de agua para mejorar el flujo del hormigón tiene el inconveniente de que también reduce la viscosidad de la mezcla, aumentando el riesgo de segregación.

El segundo parámetro es la capacidad de paso. Esto se refiere a la capacidad del hormigón para atravesar las capas de armaduras u otros objetos que se quiere dejar embebidos en el hormigón. El grado necesario de esta característica depende de la cantidad de armadura, la separación entre barras, y de los otros obstáculos que tiene que atravesar el hormigón. El bloqueo del hormigón se produce cuando el tamaño máximo del árido es demasiado grande y/o cuando el contenido del árido grueso es demasiado elevado. En la Figura 2.2 se puede ver cómo funciona el mecanismo de bloqueo.

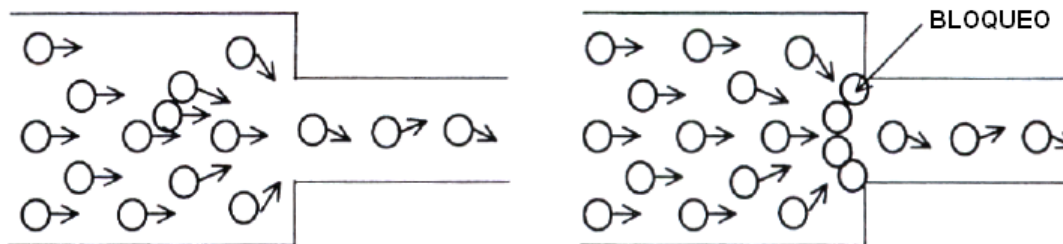


Figura 2.2 –Mecanismo de Bloqueo (adaptado de Skarendahl y Petersson, 2000)

Una forma de mejorar la capacidad de paso es aumentar la viscosidad de la mezcla reduciendo el riesgo de segregación. Esto se obtiene disminuyendo la relación agua/finos y/o utilizando aditivos modificadores de viscosidad. Otra forma es disminuir el tamaño máximo del árido grueso y la cantidad de árido.

El tercer parámetro es la resistencia a la segregación. La segregación del hormigón ocurre cuando los componentes del hormigón se separan y su distribución no es homogénea. La segregación del hormigón se puede manifestar de varias formas, como exudación, separación del árido grueso, o distribución no uniforme de los poros de aire. El HAC, al ser más fluido, está más propenso a la segregación que el hormigón convencional.

La resistencia a la segregación está relacionada con la viscosidad de la mezcla. El hormigón tiene que tener un nivel adecuado de viscosidad para mantener la composición homogénea de la mezcla. Una mezcla altamente viscosa tampoco es buena, porque reduce demasiado la velocidad de deformación, y el hormigón fluye muy despacio. Se puede mejorar la resistencia a segregación de la mezcla de varias formas:

- Reduciendo el contenido de árido.
- Reduciendo el tamaño máximo del árido grueso.
- Reduciendo la relación agua/finos.
- Utilizando aditivos modificadores de viscosidad (AMV).

Dichas características requieren métodos de ensayos distintos a los tradicionales para evaluar las propiedades de este tipo de hormigón. La utilización del Cono de Abrams daría resultados próximos a los 30 cm y no discriminaría distintos comportamientos. Otros métodos tradicionales tampoco son aplicables. Por ello, la caracterización de la autocompactabilidad se realiza a través de métodos de ensayo específicos que permiten evaluar las prestaciones del material en términos de:



fluidez, mediante ensayos de escurrimiento según UNE 83.361 o de ensayos de escurrimiento en embudo en V, según UNE 83.364;

resistencia al bloqueo, mediante ensayos del escurrimiento con anillo J, según UNE 83.362 y mediante ensayos de la caja en L, según UNE 83.363.

resistencia a la segregación, en España no existen ensayos normalizados para evaluar la resistencia a la segregación, mientras que en E.E.U.U la resistencia a segregación se mide en base al ensayo de la columna, según la ASTM C1610. Por otro lado, las “Directrices Europeas del Hormigón Autocompactante” (BIBM et al, 2005) recomiendan el ensayo del Tamiz (anejo B4 de la misma), tal como se comenta en el siguiente apartado. En el capítulo 7 de esta tesis se propone un ensayo rápido para la medida de la resistencia a segregación y se hace una comparativa con los dos ensayos citados y con el ensayo de penetración propuesto por Bui et al (2002).

Además la resistencia a segregación se puede apreciar de forma visual a partir del comportamiento del material en el ensayo del escurrimiento (ASTM C1611). En el cual debe observarse si la distribución del árido grueso es uniforme y si ocurre algún tipo de segregación o exudación en el perímetro de la “torta” final del ensayo. Sin embargo, para los HAC de elevada fluidez (escurrimiento > 750 mm) dicho ensayo y, incluso el ensayo del embudo V no presentan la suficiente precisión para detectar de forma correcta la segregación (Locke et al, 2003).

En base a los diferentes métodos de ensayo, el Anejo 17 de la EHE-08 establece los rangos admisibles de los parámetros de autocompactabilidad que deben cumplirse, simultáneamente para todos los ensayos especificados, tal como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 – Requisitos generales para la autocompactabilidad – (Tabla A17.2 EHE-08)

Propiedad	Ensayo	Parámetro medido	Rango admisible
Fluidez	Escurrecimiento	$T_{50}$	$T_{50} \leq 8 \text{ seg}$
		$d_f$	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 850 \text{ mm}$
	Embudo en V	$T_V$	$4 \text{ seg} \leq T_V \leq 20 \text{ seg}$
Resistencia al bloqueo	Caja en L	$C_{bL}$	$0,75 \leq C_{bL} \leq 1,00$
	Escurrecimiento con anillo J	$d_{Jf}$	$\geq d_f - 50 \text{ mm}$

Los rangos establecidos en dicha tabla son muy amplios, ya que abarcan toda la fase de autocompactabilidad posible. Es por ello que la misma normativa especifica diferentes clases para los HAC en función de escurrimiento (AC-E), de la viscosidad

(AC–V) y de la resistencia al bloqueo (AC–Rb), tal como se muestra en las tablas 2.4 a 2.6.

Tabla 2.4 – Clases de escurrimiento – (Tabla A17.3 EHE–08)

Clase	Criterio, según UNE 83.361
AC–E1	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 650 \text{ mm}$
AC–E2	$650 \text{ mm} < d_f \leq 750 \text{ mm}$
AC–E3	$750 \text{ mm} < d_f \leq 850 \text{ mm}^{(*)}$

Tabla 2.5 – Clases de viscosidad – (Tabla A17.4 EHE–08)

Clase	Criterio por el ensayo de escurrimiento, según UNE 83.361	Criterio alternativo por el ensayo del embudo en V, según UNE 83.364
AC–V1	$2'5 \text{ seg} < T_{50} \leq 8 \text{ seg}$	$10 \text{ seg} \leq T_v \leq 20 \text{ seg}$
AC–V2	$2 \text{ seg} < T_{50} < 8 \text{ seg}$	$6 \text{ seg} \leq T_v \leq 10 \text{ seg}$
AC–V3	$T_{50} \leq 2 \text{ seg}^{(*)}$	$4 \text{ seg} \leq T_v \leq 6 \text{ seg}^{(*)}$

Tabla 2.6 – Clases de resistencia al bloqueo – (Tabla A17.5 EHE–08)

Clase	Exigencia de la característica	Criterio por el ensayo del anillo J, según UNE 83362 (*)	Criterio por el ensayo de caja en L, según UNE 83363
AC–RB1	Exigible cuando el tamaño máximo del árido sea superior a 20 mm o el espesor de los huecos por los que pase el hormigón esté comprendido entre 80 y 100 mm	$d_{Jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$ , con un anillo de 12 barras	$\geq 0,80$ , con 2 barras
AC–RB2	Exigible cuando el tamaño máximo del árido sea igual o inferior a 20 o el espesor de los huecos por los que pase el hormigón esté comprendido entre 60 y 80 mm	$d_{Jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$ , con un anillo de 20 barras	$\geq 0,80$ , con 3 barras

(\*) donde  $d_f$  representa el escurrimiento en el ensayo según UNE 83361 y  $d_{Jf}$  representa el escurrimiento en el ensayo del anillo J, según UNE 83362

Asimismo, la EHE considera que la clase de autocompactabilidad AC–E1 como la más adecuada para la mayor parte de los elementos estructurales que se construyen habitualmente. En particular se recomienda su empleo en los siguientes casos:

- estructuras no muy fuertemente armadas,
- estructuras en las que el llenado de los encofrados es sencillo, el hormigón puede pasar por huecos amplios y los puntos de vertido del mismo no exige que se desplace horizontalmente largas distancias en el interior del encofrado;

- elementos estructurales en que la superficie no encofrada se separa ligeramente de la horizontal.

Por su parte, la misma EHE–08 recomienda la clase de autocompactabilidad AC–E3 en los siguientes casos:

- Estructuras muy fuertemente armadas.
- Estructuras en los que el llenado de los encofrados es muy difícil, el hormigón debe pasar por huecos muy pequeños y los puntos de vertido del mismo exigen que se desplace horizontalmente distancias muy largas en el interior del encofrado.
- Elementos estructurales horizontales en los que es muy importante conseguir la autonivelación del propio hormigón.
- Elementos estructurales muy altos, de gran esbeltez y muy fuertemente armados.

### 2.5.2. Ensayos no normalizados

Aunque actualmente existan algunos ensayos normalizados, se ha desarrollado una amplia gama de métodos de ensayo para medir y caracterizar las propiedades del HAC en estado fresco. En la Tabla 2.7 se muestran los ensayos recogidos por *BIBM et al* (2005) agrupados por la propiedad a la que valoran.

Tabla 2.7 – Ensayos de caracterización en fresco no normalizados (*BIBM et al*, 2005)

Propiedad	Método de Ensayo	Valor medido
Fluidez	Caja de Kajima	Llenado visual
	Embudo en V	Tiempo de flujo
	Embudo en O	Tiempo de flujo
	Orimet	Tiempo de flujo
Capacidad de paso (resistencia al bloqueo)	Caja en U	Diferencia de altura
	Caja de Kajima	Capacidad de paso visual
Resistencia a segregación	Penetración	Profundidad
	Segregación en tamiz	Porcentaje de retención

Ningún ensayo por si solo puede medir todos los parámetros clave, por lo que se requiere una combinación de los mismos para caracterizar plenamente una mezcla de HAC.

### 2.5.3. Reología

La reología es la ciencia que estudia la deformación y flujo de los materiales vinculando las relaciones entre esfuerzo aplicado, deformaciones y tiempo. Desde hace años se han construido diferentes viscosímetros para estudiar al hormigón fresco, que posibilitaron un mayor conocimiento del material y de los factores que lo modifican. (Ferron, 2008). Los estudios de reología han permitido interpretar el comportamiento del hormigón bombeado, el hormigón de altas prestaciones y, más recientemente, la caracterización y diseño del HAC. (Ferraris, 1999)

La reología del HAC se diferencia de la de otros tipos de hormigón tal como puede verse en la Figura 2.3. Un hormigón de alta resistencia (HAR) posee mayor viscosidad plástica que el hormigón convencional (HC), en gran parte debido a su relación agua/ligante, y una menor tensión umbral de cizallamiento. En el HAC el umbral de cizallamiento es prácticamente nulo y aunque contiene gran cantidad de finos como el HAR, incorpora mayor cantidad de agua lo que tiene un efecto positivo en la viscosidad (Esping, 2007).

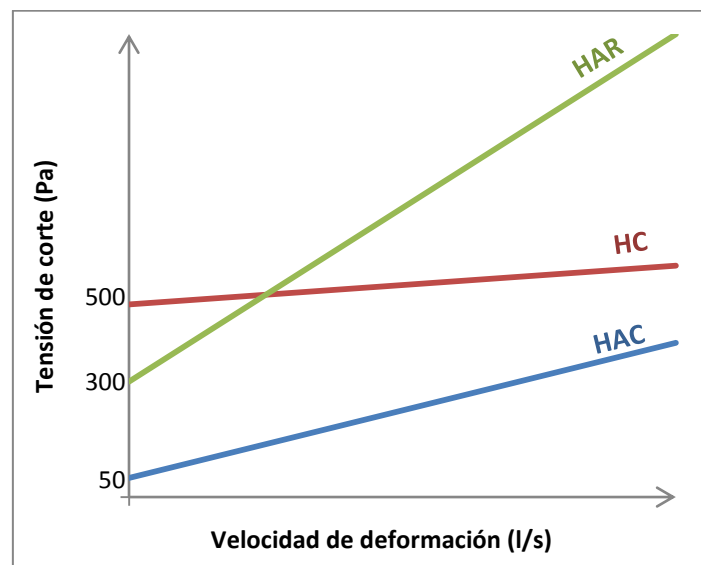


Figura 2.3 – Curvas de flujo de distintos hormigones. (Adaptado de Wallevik, 2003)

#### Principios de la reología de un HAC

El comportamiento de la pasta de hormigón es bastante diferente a una suspensión de sólidos inertes, aunque esté esencialmente constituida por agua y partículas de cemento. Las fuerzas de atracción entre las partículas dan lugar a la

formación de flóculos, poco tiempo después del contacto con el agua se producen rápidas reacciones que dan lugar a disolución de iones y luego comienzan a formarse productos hidratados sobre las superficies de las partículas (Zerbino et al, 2006). Estas membranas que se forman en torno a los flóculos se rompen durante el amasado lo que justifica que el esfuerzo necesario para mover el sistema vaya cambiando en función de la velocidad de deformación (Beupré y Mindess, 1998).

Este fenómeno depende de la energía de mezclado, en especial, para las pastas de cemento. En hormigón, la presencia de áridos favorece el mecanismo de ruptura de los flóculos disminuyendo el efecto del método de amasado. Este hecho se señala como una de las principales dificultades para comparar la respuesta reológica entre pasta y hormigones. (Ferraris y Martys, 2003).

En cualquier caso, el comportamiento reológico de un hormigón está fuertemente marcado por la reología de la pasta. Para describir este comportamiento se han utilizado hasta el momento una diversidad de modelos que relacionan la velocidad de deformación con la tensión de cizallamiento o tensión de corte ( $\tau$ ) aplicada (Banfill, 2003. Ferraris, 1999). Los más comúnmente empleados son el modelo de Bingham (ecuación 1.1) y el de modelo de Herschel–Bulkley (ecuación 1.2):

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma} \quad (1.1)$$

$$\tau = \tau_{app} + \eta_{app} \cdot \dot{\gamma}^A \quad (1.2)$$

donde:

- “ $\tau$ ” es la tensión de corte,
- “ $\tau_0$ ” y “ $\tau_{app}$ ” son la tensión umbral y umbral aparente respectivamente;
- “ $\eta$ ” y “ $\eta_{app}$ ” la viscosidad y la viscosidad aparente respectivamente;
- “ $\dot{\gamma}$ ” la velocidad de deformación,
- “ $K$ ” el coeficiente de viscosidad aparente,
- “ $A$ ” es la constante que indica el grado del comportamiento “no-newtoniano”.

El modelo más utilizado es el de Bingham, principalmente porque sus parámetros pueden medirse independientemente, aunque De Larrard et al (1998) han propuesto que algunos de los hormigones (dentro los cuales aparece el HAC) podrían estar mejor descritos por el modelo de Herschel–Bulkley.

Aunque simple, el modelo reológico de Bingham da una buena idea del comportamiento básico del material. Al intentar poner en movimiento el hormigón se precisa vencer una resistencia, " $\tau_0$ ", debido al rozamiento entre las partículas. Además, una vez iniciado el movimiento, se requiere seguir aumentando la fuerza aplicada al fluido, debido a la cohesión entre las partículas.

Esta resistencia posterior se mide a través de la viscosidad, " $\eta$ ". El hormigón autocompactable frente a un hormigón convencional presenta una tensión de inicio de flujo inferior, similar a la que presentan los hormigones fluidos; pero a diferencia de éstos, en los que la viscosidad es menor que la de un hormigón convencional, la viscosidad del hormigón autocompactable es mayor incluso que la de los hormigones convencionales, asegurando la cohesión. Sin embargo, es necesario destacar que aunque una baja tensión de inicio de flujo es un objetivo común en cualquier aplicación con hormigón autocompactable, la viscosidad puede variar de forma considerable dependiendo de la técnica de producción y de la aplicación (Wallevik, 2003).

#### Factores que modifican el comportamiento reológico

La mayoría de los cambios que se producen en la composición de la mezcla afectan su respuesta reológica (Beupré y Mindess, 1998). Zerbino et al (2006), apuntan que uno de los principales cambios es el contenido de agua, que afecta de forma inversa la viscosidad plástica y la resistencia al flujo, así a mayor contenido de agua ambos parámetros se reducen de forma significativa. Los autores también citan que la mayoría de los aditivos modifican de forma notoria los parámetros reológicos, siendo difícil predecir su comportamiento.

Tattersall y Banfill (1983) y Banfill (1981) comprobaron que la tensión umbral " $\tau_0$ " y la viscosidad plástica " $\eta$ " son funciones exponenciales del contenido de agua y superplastificantes. Por su lado, Roy y Asaga (1979) cuantificaron los cambios entre distintos procedimientos de amasado y, concluyeron que entre el proceso más intenso y el menos intenso los valores de " $\tau_0$ " y " $\eta$ " disminuyeron del orden de un 60%.

A su vez, Carlswald et al (2003) han estudiado los efectos del aire ocluido, del humo de sílice, del filler calizo y de humedad en la reología, encontrando que el contenido de aire ocluido aumenta el escurrimiento, reduce la viscosidad plástica " $\eta$ ", pero tiene poco efecto sobre la tensión umbral " $\tau_0$ ". El humo de sílice hace más densa la mezcla aumentando considerablemente la " $\tau_0$ ", aumentando moderadamente la viscosidad y disminuyendo significativamente el escurrimiento. Por el contrario, el filler

calizo presentó pequeños efectos en la viscosidad y en el escurrimiento, pero aumento la " $\tau_0$ ".

Del mismo modo, Khayat et al. (2003) mostraron que la incorporación de humo de sílice, escoria de horno alto o cenizas volantes pueden aumentar la fricción interna de la pasta de cemento y el valor de la tensión umbral. Mientras que, Geiker et al (2002) han observado que altos contenidos de árido grueso aumentan la tensión umbral y la viscosidad plástica. Además, debido a la fricción interna, los áridos sostienen parte de la estructura interna de la mezcla en fresco y restringen la segregación.

Emborg (1999) concluye que, partiendo de una amasada de referencia, un aumento en la dosificación de agua, un mayor porcentaje de árido grueso o la reducción del contenido en cemento disminuyen tanto el esfuerzo inicial de corte de la mezcla como su viscosidad. Una reducción en el volumen de filler utilizado también reducen los mismos parámetros, pero de manera más acentuada cuando se trata del esfuerzo de corte.

Por otra parte, dosificaciones elevadas de superplastificantes también reducen el esfuerzo de corte inicial de la amasada, pero a la vez aumentan la viscosidad de la misma. En el caso de sustituir áridos rodados por áridos de machaqueo, la amasada tiene una tendencia a aumentar tanto su esfuerzo de corte inicial como su viscosidad. La utilización de aditivos agentes de viscosidad es capaz de aumentar la viscosidad de la mezcla manteniendo de manera controlada el esfuerzo de corte inicial. Estos resultados se resumen de forma cualitativa en la Figura 2.4.

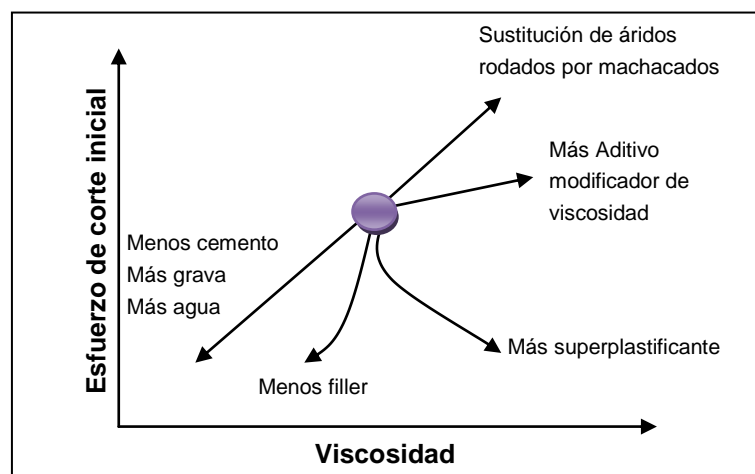


Figura 2.4 – Influencia de dosificación en el comportamiento reológico de un HAC  
(Adaptado de Emborg, 1999)

Debido a las importantes variaciones causadas por el contenido de agua, superplastificante (SP) y por la relación “finos/áridos totales”, Bonen et al (2007) recomiendan añadir aditivos modificadores de viscosidad (AMV) como estrategia para disminuir estas variaciones. Los autores afirman que aún en pequeñas cantidades los AMV aumentan de modo significativo la viscosidad y la cohesión de la mezcla, controlando los fuertes efectos causados por la variación de agua y de SP.

### Medida de los parámetros

Para medir los parámetros reológicos “ $\tau_0$ ” y “ $\eta$ ” existen diferentes tipos de reómetros (viscosímetros). Entre ellos merecen citarse: flujo entre platos paralelos, flujo rotacional entre dos cilindros coaxiales, flujo a través de capilares o tuberías, flujo rotacional entre dos platos paralelos o entre cono y plato (Banfill et al, 2001).

Ferraris (1999) expone un estado del arte sobre los métodos utilizados para analizar las propiedades reológicas de hormigones de altas prestaciones, donde describe los varios tipos de reómetros y el funcionamiento de cada uno (BML, BTRheom, Cemagref-IMG, Two Point UK). En un estudio comparativo, los autores concluyen que todos los equipos confrontados dan lugar a resultados que deben considerarse adecuados y, en tal sentido, pueden usarse para valorar la respuesta reológica del hormigón. Los resultados que obtuvieron difieren en los valores absolutos de “ $\tau_0$ ” y “ $\eta$ ”, pero las tendencias son similares.

Los estudios sobre reología no siempre alcanzan las mismas conclusiones y las propuestas para los valores de “ $\tau_0$ ” y “ $\eta$ ” pueden llegar a ser muy distintos, como se aprecia en la Tabla 2.8 (Wallevik 2003).

Las diferencias observadas en dicha tabla pueden deberse a varios factores entre los cuales se puede destacar los distintos tipos de equipos y procedimientos utilizados que hacen que la comparación de los resultados puede ser poco representativa.



Tabla 2.8 – Comparación de parámetros reológicos de HAC en distintos países  
(Adaptado de Wallevik 2003)

	Finos (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	“ $\tau_0$ ” (Pa)	“ $\eta_0$ ” (Pa.s)
Suecia	>550	180	0–30	50–100
Holanda	>550	190	0–10	50–120
Japón	>550	170	0–30	50–120
Francia	?	?	0–10	>60
Suiza	<450	200	0–50	10–20
Noruega	<450	170	10–50	30–45
Islandia	<450	180	10–50	20–40
Dinamarca	<450	160	30–60	<40
Reino Unido	>500	210	10–50	50–80
Alemania	>500	180	0–10	60–90
Estados Unidos	>500	190	0–20	40–120

### Los parámetros reológicos y los ensayos ingenieriles

La medida directa de los parámetros reológicos no siempre es posible, ya que es totalmente dependiente de un reómetro, que es un equipo complejo y costoso y, normalmente, solo se encuentra en laboratorios muy especializados. Con objeto de solucionar este problema, se han desarrollado modelos de medida indirecta de la tensión umbral “ $\tau_0$ ” a partir de resultados de ensayos considerados ingenieriles.

En esta dirección, Brower y Ferraris (2003), en un estudio comparativo de distintos reómetros, observaron que el umbral de cizallamiento se relaciona bien con las medidas del ensayo de asentamiento. Esta observación se confirma con la de otros autores, convenientemente sintetizadas en un estudio llevado a cabo por Saak et al (2004) que concluye que el asentamiento posee una ley potencial negativa con el umbral de cizallamiento y es independiente de la viscosidad. Del mismo modo, Nielson y Wallevik (2003) encontraron buena correlación entre estos ensayos y, además observaron una buena relación entre la viscosidad y el T50, embudo en V y el ensayo de Orimet. Los autores concluyen que el ensayo de escurrimiento por sí solo no puede definir un buen o mal HAC.

Wallevik (2006) ha analizado la relación entre el asentamiento y la tensión umbral para diferentes tipos de hormigones, sugiriendo que la misma depende del volumen de matriz, lo que se atribuye a que los obstáculos que imponen el esqueleto granular que afectan el flujo crecen cuando se reduce el contenido de la matriz. La

vinculación entre el asentamiento y la tensión umbral resulta más afectada cuanto más trabajable sea el hormigón como es el caso del HAC. En el mismo trabajo también se hace referencia de la baja correlación que existe entre el asentamiento y la viscosidad plástica.

En un estudio experimental Carlswärd et al. (2003) observaron que el aire afecta principalmente la viscosidad, modificando el escurrimiento, lo que implica que el escurrimiento no depende únicamente del umbral de cizallamiento. Además, observaron que el tipo de árido tiene mayor efecto en el tiempo de paso por el embudo V que en el escurrimiento, y mayor incidencia en la viscosidad plástica que en el umbral de cizallamiento, de lo que concluyeron que la fracción fina del árido es el parámetro principal.

Otro factor importante en un HAC es el tipo del superplastificante, Koyata y Comman (2005) observaron que para el mismo valor de escurrimiento pueden aparecer diferencias en la tensión umbral o en la viscosidad debidas a la estructura del tipo de superplastificante.

En un estudio con un viscosímetro BML, Utsi et al. (2003) encuentran dispersiones bastante grandes al relacionar los parámetros reológicos con los ensayos ingenieriles. Para extensiones de flujo menores que 650 mm, los autores obtienen correlaciones bastantes buenas con el umbral de cizallamiento, pero para valores mayores esta correlación prácticamente no existe. El T50 se relacionó de forma aceptable con la viscosidad, principalmente cuando se compara con otros ensayos, si bien los autores señalan cierta dificultad en obtener resultados precisos. Por otro lado, el embudo en V también presentó resultados que se relacionan de forma aceptable con la viscosidad.

Por su parte, Roussel (2007) explica que la tensión umbral de cizallamiento no puede relacionarse con el ensayo de escurrimiento debido a sus dimensiones, puesto que no se obtiene un flujo homogéneo. El autor ilustra esta afirmación comparando dos HAC con el mismo umbral de cizallamiento: el primero, compuesto por una pasta de cemento muy fluida y un gran contenido de áridos intermedios (Figura 2.5.a); el segundo, con una pasta de cemento menos fluida y con un menor contenido de árido pero de mayores dimensiones (Figura 2.5.b). El escurrimiento del primero HAC será mayor que del segundo, tal como ilustra la Figura 2.5.

El autor expone que esto puede estar en función de que, en el primer hormigón la contribución del esqueleto granular en el umbral de cizallamiento influye más que la pasta, mientras que en el segundo hormigón ocurre lo contrario. Como solución a esto

problema, propone un ensayo denominado “LCPC BOX” o “ensayo de la caja LCPC”, tal como se muestra en la Figura 2.6. Dicho ensayo consiste en medir la distancia que obtiene un flujo de hormigón en una caja de 150 x 200 x 1200 mm, pero que aún no ha sido totalmente validado.

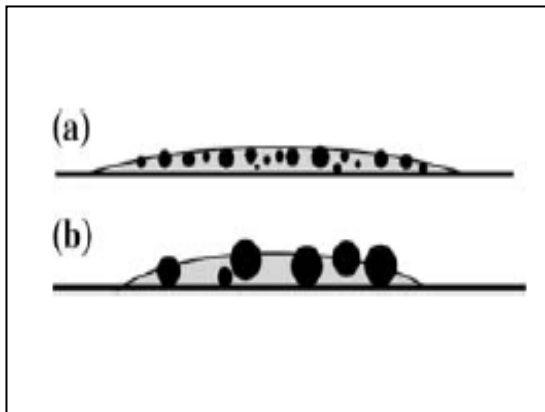


Figura 2.5 – Diferentes HAC con umbral de cizallamiento similar



Figura 2.6 – Propuesta para medir el umbral de cizallamiento. (Roussel, 2007)

## 2.6. PROPIEDADES DE UN HAC EN ESTADO ENDURECIDO

Al igual que en estado fresco, conviene analizar las diferencias que las dosificaciones de un HAC y de un hormigón vibrado introducen en las propiedades del hormigón en el estado endurecido. Así, el elevado contenido de finos, y consecuentemente el menor contenido de árido grueso, cambian significativamente el esqueleto granular de un HAC en relación a un hormigón vibrado. Esto puede alterar la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, dado que este es función de los módulos de elasticidad de los componentes.

El grado de empaquetamiento de un HAC se mejora en relación a hormigón vibrado, debido a que el incremento de finos conduce a una menor porosidad en la zona de transición, entre los áridos y la pasta. Consecuentemente, la resistencia a tracción se puede incrementar, debido a que la transferencia de tensión se proporciona por: la adhesión de la matriz de cemento, la adherencia en la zona de transición, y por fricción y el empaquetamiento de los áridos. En los apartados siguientes, se hace un análisis del comportamiento de cada propiedad en un HAC, en relación a un hormigón vibrado.

### 2.6.1. Resistencia a compresión

En general, las normas nacionales e internacionales clasifican el hormigón en base a su resistencia a compresión, pues se considera como la propiedad de referencia del estado endurecido para muchas aplicaciones.

Cuando se trata de un hormigón autocompactante, la resistencia a compresión es consecuencia del aporte de finos, que garantizan la autocompactabilidad en el estado fresco, puesto que la resistencia a compresión depende de las propiedades de la pasta de cemento y de la adherencia en la zona de transición, propiedades que mejoran por el elevado contenido de finos ya mencionado.

Durante la dosificación del HAC, la resistencia a compresión se ajusta por el tipo de fino utilizado y no por su cantidad. Si se precisa de un hormigón de la gama baja de resistencias, se tiene que ir al mínimo de conglomerante con un papel importante del filler, mientras que si se necesita un hormigón de alta resistencia, se tiene que ir a una dosificación alta de conglomerante. El tipo de cemento, también contribuye para la obtención de la resistencia necesaria.

Según la normativa europea EN 200–1, la resistencia a compresión se determina en probetas cilíndricas ( $\phi 150/300$  mm) o en probetas cúbicas (150x150x150 mm). Para un hormigón vibrado, la resistencia de la probeta cilíndrica es aproximadamente de un 80% a 83% de la resistencia obtenida en la probeta cubica, según la citada instrucción, si bien depende de la resistencia.

Para el HAC, esta relación no es tan clara; König et al (2003) han observado que la diferencia entre los tipos de probetas se disminuye, mientras se aumenta el contenido de arenas finas (se acerca al 100%). Holschemacher (2004) ha encontrado relaciones entre la resistencia de la probeta cilíndrica/cúbica, variando entre 0.9 y 1.00. Domone (2007) ha observado en varios estudios, que esta relación cambia de 0.8 a 1.00, con el incremento de resistencia de 30 MPa a 90 MPa.

La evolución de la resistencia a compresión con el tiempo puede considerarse equivalente a la de un hormigón de compactación convencional, según la EHE–08. Sin embargo, hay que considerar, en algunos casos, la posibilidad de un retraso en la ganancia de resistencia inicial debido a las dosis mayores de aditivos utilizados.

### 2.6.2. Resistencia a tracción

Considerando, por un lado, que el aporte de finos en un HAC necesario para lograr la autocompactabilidad resulta en una mejor microestructura de la pasta con una matriz más densa de cemento y, una menor y más distribuida red de poros; y, por otro lado, que la resistencia a tracción del hormigón depende en gran parte de la adherencia entre la pasta de cemento y los áridos dentro de la zona de transición; se puede considerar que el HAC presenta una resistencia a tracción ligeramente superior a un HC.

En este sentido, Holschemacher (2004) observó valores de resistencia a tracción indirecta del HAC superiores a un hormigón convencional, principalmente, cuando se utiliza cenizas volantes o humo de sílice. Del mismo modo, Sonebi y Bartos (1999) y Felekoglu et al (2007) también obtienen valores superiores de resistencia a tracción indirecta para el HAC.

Sin embargo, se puede obtener un hormigón vibrado con la misma microestructura de la pasta de cemento sin que sea autocompactante (por ejemplo, aportando finos, usual en hormigones de elevada resistencia), y por lo tanto, con diferencias mínimas de comportamiento a tracción. En esta dirección están los trabajos de Bosiliskov (2003), Turcry et al. (2006) y Fava et al (2003). Asimismo, Domone (2007) hace un análisis de varios ensayos de la literatura técnica, no encontrando diferencia aparente entre el comportamiento del HAC en relación al hormigón convencional, para los mismos valores de resistencia a compresión.

### 2.6.3. Módulo de Elasticidad

Debido a que los hormigones autocompactantes contienen un mayor volumen de pasta que el hormigón de compactación convencional, y teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad de la pasta es menor que el de los áridos, se podría prever un módulo de elasticidad ligeramente menor para el caso del hormigón autocompactante. Este efecto debe ser más acentuado en primeras edades, y es de fundamental importancia en estructuras pretensas, puesto que la relación entre la resistencia a compresión y la flecha debida al pre-tensado (o post-tensado) se ve alterada. Sin embargo, dicha diferencia tiende a ser mayor para la gama baja de resistencias y disminuir para la gama alta de resistencias, ya que en la gama alta de resistencia de HC es usual reducir el tamaño máximo del árido e incorporar finos.

En la literatura técnica hay numerosas referencias sobre este tema, si bien los resultados son dispersos. En la línea de raciocinio anterior, Holschemacher (2004) ha observado que, la media de los valores propuestos por el CEB-FIP-90 para

hormigones vibrados equivale al límite superior de los valores obtenidos experimentalmente para el HAC. Del mismo modo, Jacobs and Hunkeler (1999) obtuvieron valores reducidos de módulo, para la misma resistencia a compresión. Turcry et al. (2006) obtuvo valores del módulo de elasticidad del HAC entre un 2% y 8% menores que el correspondiente hormigón vibrado, para la misma resistencia. La diferencia de pasta en este estudio, no era tan grande entre los dos hormigones para producir diferencias significantes.

Asimismo, Domone (2007) compara los resultados de distintas investigaciones experimentales, y obtiene que para hormigones en la gama de bajas resistencias la diferencia entre el módulo de un HAC y un HV es del orden de un 40%, mientras que esta diferencia baja hasta un 5% en la gama de altas resistencias, tal como se ha comentado anteriormente.

Por su parte, Erik y Pentti (1999) obtienen un módulo de elasticidad del HAC similar al de un hormigón convencional, y sin reflejar la gran diferencia de resistencia a compresión (HAC = 84 MPa y HV= 58,5 MPa). En este caso, se puede interpretar que el HAC presenta un menor módulo para la misma resistencia a compresión y, dado a la diferencia de resistencias se igualan los valores del módulo. También, Persson (1999 y 2001) y Assié (2003) presentan valores similares del módulo de elasticidad del HAC con respecto al módulo de un HC, considerando el mismo rango de la resistencia a compresión.

Muchos factores pueden explicar las diferencias de resultados obtenidos, principalmente, las variaciones entre las dosificaciones, los distintos materiales utilizados como finos, el tipo y tamaño máximo de los áridos, el esqueleto granular, entre otros.

#### **2.6.4. Adherencia**

Cabe recordar que la adherencia se compone de tres fenómenos: la adhesión, el rozamiento y el acuñamiento. Es de esperar que la adhesión a las armaduras en los HAC sea mayor debido al mayor contenido de pasta y al uso de AMVs, en relación a adherencia de un HC de características similares. Por su parte, el rozamiento será similar en ambos hormigones, aunque en los HC ello puede ser negativamente afectado por la exudación de la pasta de cemento debida al vibrado. Sin embargo, la adherencia por acuñamiento en el caso del HAC será menor debido a la menor cantidad de árido grueso, que es el responsable de este fenómeno. En base a ello se puede esperar que la adherencia en los HAC sea similar o ligeramente superior que en un HC.

No obstante, así como para el módulo de elasticidad dicha diferencia tiende a ser mayor para la gama baja de resistencias y disminuir para la gama alta de resistencias, ya que en los HC de alta resistencia se mejora la microestructura de la pasta de cemento responsable por la adhesión.

Actualmente, existen dos modos de medir la adherencia en hormigones armados: ensayos de arrancamiento (conocidos en inglés por: “*pull-out*” según Rilem, 1994) y ensayos de flexión, conocido como el ensayo de la viga, según la UNE 36740:98. El ensayo de arrancamiento, es un ensayo simple y de bajo coste, que da una idea precisa del comportamiento de anclaje. Este ensayo sirve principalmente, de modo comparativo, pues el modo de arrancar la armadura no reproduce las condiciones reales de sollicitación (Mori, 2002). Por otro lado, el ensayo de la viga, es un ensayo más complejo, que emplea una probeta prismática armada, sometida a flexión. Además de eliminar pequeñas imprecisiones, este ensayo representa las condiciones reales de la actuación del momento flector, y de esfuerzo cortante, obteniendo resultados absolutos. Sin embargo, la medida experimental de la adherencia puede resultar en un gran número de dificultades experimentales (Almeida Filho, 2006).

Entre las investigaciones encontradas en la literatura (Sonebi y Bartos, 1999; König *et al*, 2001; Schiessl y Zilch, 2001; Almeida Filho, 2006; Valcuende y Parra, 2008), la mayoría confirma la hipótesis de que los HAC presentan una adherencia superior a los HC, con valores entre un 16 a 40% mayores medidos en el ensayo de flexión (Sonebi y Bartos, 1999). Asimismo, el HAC presenta la ventaja frente a un HC de no presentar el efecto de la dirección del flujo del hormigonado y, de la adherencia ser menos sensible a las propiedades del árido grueso, responsable por el acuñaamiento, que tiene menor parcela de contribución en los HC (Schiessl y Zilch, 2001)

Otro problema muy conocido para el HC es el efecto de la posición de la armadura (“*top-bar effect*”), fruto del vibrado y exudación. En HAC este efecto es mucho menos marcado (Valcuende y Parra, 2008) dado a la mayor homogeneidad del mismo. Asimismo, los autores comprueban la hipótesis anterior de que la diferencia de adherencia de un HAC y un HC se reduce de un 30% a un 10% para resistencias superiores a los 50 MPa.

Si bien, la adherencia es mayor en un HAC que un HC dado a la mejor adhesión producida por una mejor envoltura de las barras de armadura, ello puede ocasionar una rotura frágil en la interface hormigón-acero (Almeida Filho, 2006).

## 2.7. DEFORMACIONES DIFERIDAS

El hormigón sufre cambios de volumen durante toda su vida útil, desde el momento de su fabricación. Dichas variaciones son consecuencia de la interacción de diversos fenómenos físico-químicos (retracción) como mecánicos fruto las deformaciones que ocurren bajo cargas permanentes (fluencia).

En general se consideran a la fluencia y la retracción como dos fenómenos relacionados. Esto se debe a las similitudes entre los dos tipos de deformaciones: las curvas de desarrollo con la edad son semejantes y, los factores que influyen son similares. Ambos son fenómenos que ocurren en la pasta y el árido tiene la función de retener dichas deformaciones (Acker, 2001; Mehta y Monteiro, 2008), si bien, el origen y los mecanismos que causan la retracción y fluencia aún no son totalmente comprendidos (Bazant, 2001).

En los siguientes apartados se describen de forma más detallada los fenómenos de la retracción y fluencia, incluyendo una descripción general de cada fenómeno, los mecanismos que lo originan y los factores que influyen sobre él, con especial referencia al HAC, apoyándose en diversos estudios experimentales disponibles en la literatura técnica.

### 2.7.1. Retracción

La retracción es una deformación que reduce el volumen inicial de la pieza debido a una serie de fenómenos físicos-químicos que ocurren tanto a tempranas edades como a lo largo del tiempo. Es difícil dar una clasificación donde se expongan todos los mecanismos que propician una disminución del volumen de la pasta de cemento sin la aplicación de tensiones, pero diversos autores parecen coincidir en que los principales son: la retracción plástica, la retracción autógena, y la retracción por secado.

La retracción plástica, también llamada retracción capilar, está relacionada con las deformaciones por asentamiento plástico en estado fresco y actúa durante las primeras horas después de verter al hormigón (Mehta y Montero, 2008). En general, como el hormigón aún no presenta rigidez, la retracción plástica no suele resultar en mayores problemas, con excepción de algunos elementos donde la geometría de la pieza genera asentamientos diferenciales del hormigón fresco y ocasiona tensiones que dan lugar a grietas.



En relación con el HAC, Turcry et al. (2002) y Hammer (2003), indican que este hormigón, al tener mayor volumen de pasta y superplastificante, es más susceptible a la retracción plástica.

La retracción autógena está relacionada con las reacciones químicas entre el cemento y el agua. El volumen de los productos resultantes de la hidratación es menor que el volumen original del cemento deshidratado y del agua provocando la deformación de la pasta hidratada del cemento, y consecuentemente, del hormigón (Bibm et al, 2005); en la figura 2.7 se muestra un esquema de este proceso. En hormigones con bajos contenidos de agua y con microestructura densa, el agotamiento del agua libre debido a la hidratación del cemento produce humedades internas bajas, que pueden provocar retracciones significativas, especialmente en hormigones de altas resistencias.

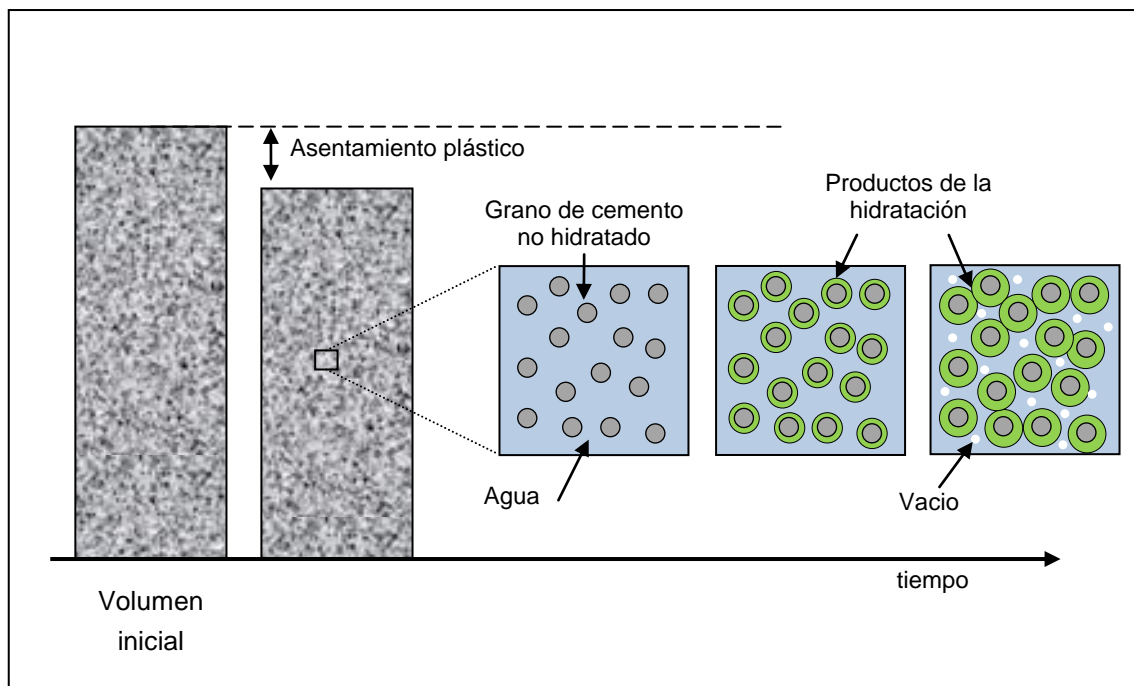


Figura 2.7 – Retracción plástica y autógena

En un hormigón convencional, los valores de la retracción autógena suelen ser pequeños, Bazant (1988) la estima en aproximadamente un 5% del máximo valor que alcanza la de secado por lo que es partidario incluso de despreciarla. Sin embargo, en el caso de hormigones de alta resistencia (HAR), la retracción autógena pueden ser significativa, con valores de hasta 0,7 mm/m (Neville, 1995). Ello responde a que en estos tipos de hormigón la relación agua/cemento ( $a/c$ ) es baja, alterando la cinética de la hidratación del cemento. En este sentido, según Acker y Ulm (2001), la retracción

autógena está por debajo de los 100  $\mu\text{m}/\text{m}$  para hormigones con relación a/c mayores que 0,45. Si bien, para valores menores que 0,40, la retracción autógena aumenta significativamente.

Las medidas de la retracción autógena son complicadas considerando que las reacciones de hidratación del cemento empiezan con el proceso de fabricación del hormigón. Aitcin (1999) señala que el incremento de la retracción autógena es muy elevado en el primer día. Por ello se hace necesario medir la retracción autógena que se desarrolla durante las 24 horas siguientes al hormigonado para aclarar sus mecanismos (Nawa y Horita, 2004).

La evolución de la retracción autógena en el tiempo está directamente relacionada con la cinética de la hidratación del cemento, que también controla la evolución de la resistencia mecánica del hormigón (Acker y Ulm, 2001). La retracción autógena tiende a incrementarse con temperaturas elevadas, alto contenido de cemento, cementos más finos, y con cementos que tienen alto contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  y  $\text{C}_4\text{AF}$ . Todos estos factores también aceleran el proceso de hidratación. La utilización de adiciones, como la ceniza volante, tiende a disminuir la retracción autógena. (Metha y Monteiro, 2008).

La retracción de secado está relacionada con movimiento del agua hacia el exterior, siendo que su origen se encuentra en la microestructura de la pasta de cemento. Es la componente fundamental de la retracción del hormigón endurecido (Fernandez, 2003)

El proceso de secado empieza con la pérdida de agua libre que se encuentra en los poros capilares. En esta fase se forma un gradiente interno de humedad por el cual el agua adsorbida al gel de sílice se desplaza hacia los poros. En caso que la humedad relativa baje del 45%, el hormigón sigue perdiendo agua y el agua absorbida en la superficie del gel de sílice C-S-H empieza a ser afectada. A continuación se pierde el agua interna del gel C-S-H y por último tiene lugar la descomposición del gel (Mindess et al, 2003)

La retracción puede ser reversible o irreversible (Figura 2.8). La retracción reversible es la parte de la retracción que se recupera cuando el hormigón vuelve a estar en contacto con el agua, por otra parte la retracción irreversible es atribuida a los cambios en la microestructura que tiene lugar durante el proceso de secado descrito, fruto de los cambios físicos o químicos en la pasta. En general se atribuye estos cambios a la reorganización de gel de C-S-H debido al secado (Mindess et al, 2003).

La retracción irreversible es la diferencia final en largo de la probeta después de que ha sido secada y otra vez saturada en agua. El envejecimiento de la pasta reduce la cantidad total de la retracción por secado. Pastas más maduras y pastas secadas a temperaturas elevadas se retraen menos para una humedad relativa dada. El proceso de envejecimiento afecta mayoritariamente a la componente irreversible de la retracción.

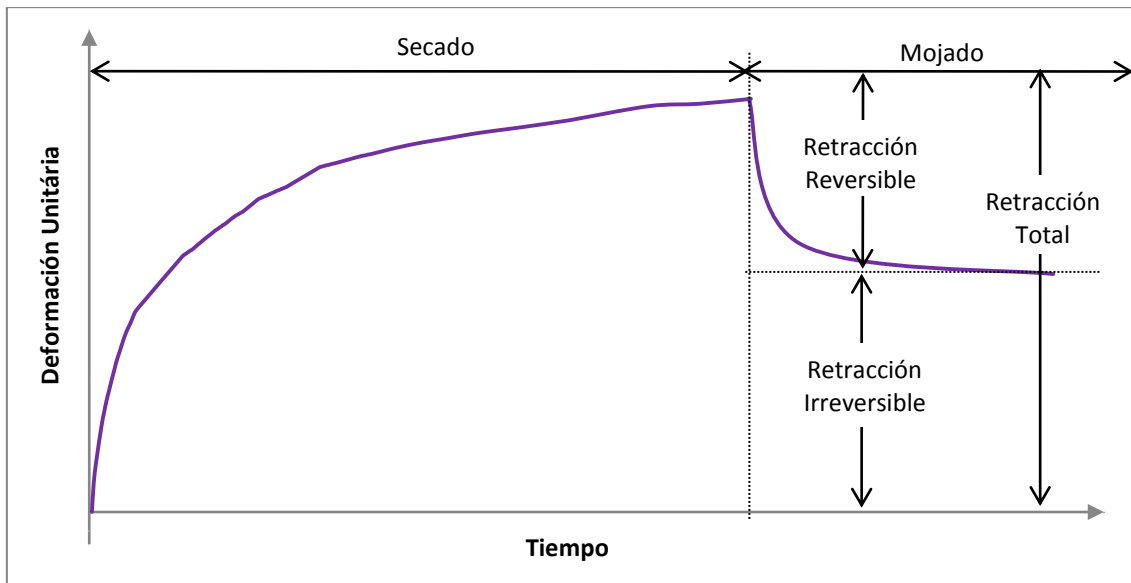


Figura 2.8 – Reversibilidad de la retracción (Adaptado de Mindess et al, 2003)

### 2.7.2. Retracción en HAC

La exudación de agua prácticamente no existe en un HAC debido a la mayor cantidad de finos presentes en su dosificación y su alta resistencia frente a la segregación. Aunque ello se puede considerar positivo, en la retracción el efecto puede resultar inverso, ya que muchas veces el agua de exudación compensa el agua que se evapora en estado fresco y, consecuentemente, evita la fisuración por retracción plástica. A ello se suma las bajas relaciones agua/cemento normalmente empleadas. Por ello, el curado cobra especial importancia en el hormigón autocompactante, especialmente en estructuras con altas relaciones superficie/volumen.

En el HAC, más fácilmente que en un hormigón convencional, puede darse una combinación de factores que podrían conducir a una significativa retracción autógena. Entre otros factores están un contenido de cemento superior y el uso de un cemento

más fino (conducentes a un mayor calor de hidratación), la mayor cantidad de material fino en general y las bajas relaciones agua/finos. (EHE-08, Anejo 17).

En este sentido están los trabajos de Rols, et al. (1999), Assie et al. (2003) y Reinhardt et al (2008). Los valores de retracción para el HAC pueden ser hasta de un 50 % superiores que HC con equivalente contenido de cemento (Rols et al, 1999). A igualdad de resistencias Assie et al. (2003) observaron una diferencia de un 10% para la retracción total y un 20% para la retracción autógena.

Por otra parte, cuando se comparan hormigones con resistencia elevada, normalmente el HC presenta retracción superior al HAC del orden de 30 a 35% a los 150 días (Sonebi et al. 2000). Si se trata de una resistencia 63 MPa, Mortsell y Rodum (2001) obtuvieron un valor de retracción al final de 84 días de 660  $\mu\text{m}/\text{m}$  para el HAC y 700  $\mu\text{m}/\text{m}$  para el HC, un 6% superior.

Asimismo, la retracción se ve afectada por el tipo de material fino utilizado. En ese sentido, Khrapko (2005) ha estudiado la influencia de las adiciones en el HAC comparándolas con una mezcla similar de HC. Ha obtenido que la retracción al final de 56 días ha sido menor en el HAC con cenizas volantes, seguido por el HAC sin adiciones, seguido por el HC y por último el HAC con polvo de cantera. El autor concluye que la retracción del hormigón depende de su composición específica y no si es HAC o HC. Del mismo modo, Rocco et al (2008) ha obtenido que para los mismos niveles de resistencia., que los HC y que HAC con escoria de alto horno han presentado valores de retracción total y autógenas similares, mientras que los HAC con filler calizo han presentado valores ligeramente inferiores.

Además del tipo de fino empleado, sus características específicas también influyen en la retracción del HAC. En este sentido, cuanto mayor la finura del material mayor será la retracción (Song et. al (2001– estudio realizado con escoria de horno alto).

De modo general se puede observar que todos los parámetros de diseño de una mezcla influyen en la retracción del hormigón después de endurecido. Sin embargo, la mayor parte de la retracción de debe a la pasta de cemento y cuanto mayor es su contenido en una mezcla, mayor será la retracción; independiente de la autocompactabilidad (Loser y Leeman, 2009), un aumento de un 12% del volumen de pasta aumenta en la misma proporción la retracción (12 meses a una HR = 50%; Hammer, 2007).

### 2.7.3. Fluencia

A la diferencia de la retracción, la fluencia es el aumento de deformación bajo carga constante. Es importante su consideración en el análisis estructural porque dichas deformaciones pueden alcanzar valores varias veces mayores que aquellos correspondientes a la deformación instantánea originada por la aplicación de la carga.

La fluencia en el hormigón fue considerada por primera vez a principios de siglo (Woolson, 1905). Durante el último siglo, distintos investigadores estudiaron los factores que influyen, Glanville (1930), Davis et al. (1934) Rüsck (1975), Neville (1996), Bazant y Baweja (2000), entre otros.

La deformación del hormigón debido a la aplicación de una carga se descompone en dos partes: elástica instantánea y diferida en el tiempo. La deformación elástica instantánea disminuye a medida que la edad del hormigón en el momento de la carga aumenta como resultado del incremento del módulo de elasticidad con la edad. La fluencia se calcula descontando la deformación elástica de la deformación total. Aunque la deformación instantánea también incluye un componente diferido durante la aplicación de la carga, lo usual es designar la deformación durante la aplicación de la carga como elástica y las adicionales como fluencia, tal como se puede apreciar en la Figura 2.9.

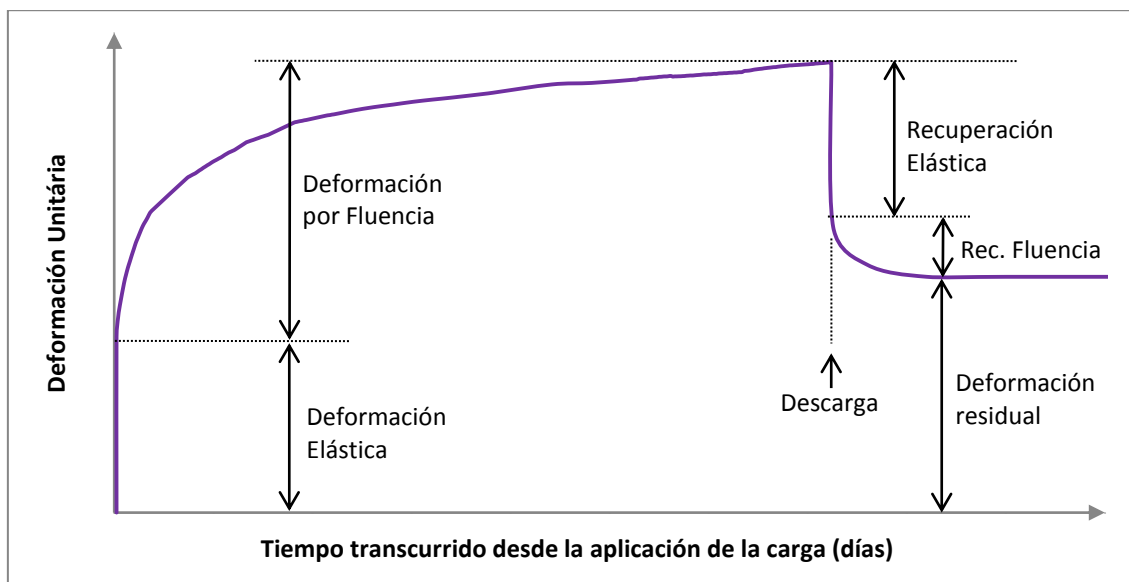


Figura 2.9 – Fluencia y recuperación de fluencia

La curva de descarga (recuperación de fluencia) se parece a la de carga (fluencia), pero la de recuperación se acerca mucho más rápido al valor máximo. El

retorno de la fluencia no es completo y esta no constituye un fenómeno reversible, de tal modo que cualquier aplicación de carga, aunque sólo dure 1 día, causa una deformación residual (Neville, 1995).

Según Neville (1995), las deformaciones diferidas bajo carga (fluencia) se puede dividir en fluencia básica y fluencia con secado. La fluencia básica es la deformación que ocurre cuando el material se carga en condiciones de humedad constante, mientras que la fluencia con secado se define como la deformación en exceso a la fluencia básica que se observa cuando el mismo material se somete a secado durante el proceso de carga.

El contenido de agua o la humedad tienen un papel fundamental en el comportamiento diferido del hormigón (Acker y Ulm, 2001). Al realizar ensayos sin intercambio de humedad (fluencia básica), cuanto menor es el contenido de agua evaporable en la muestra menor es la fluencia, incluso puede llegar a ser despreciable (Tamtsia y Beaudoin, 2000). Por el contrario, si los ensayos se realizan considerando el secado de la pieza, mientras mayor es el secado mayor es la fluencia sufrida. Ello está relacionado con la propiedad de incompresibilidad del agua, tal como se muestra en la figura 2.10.

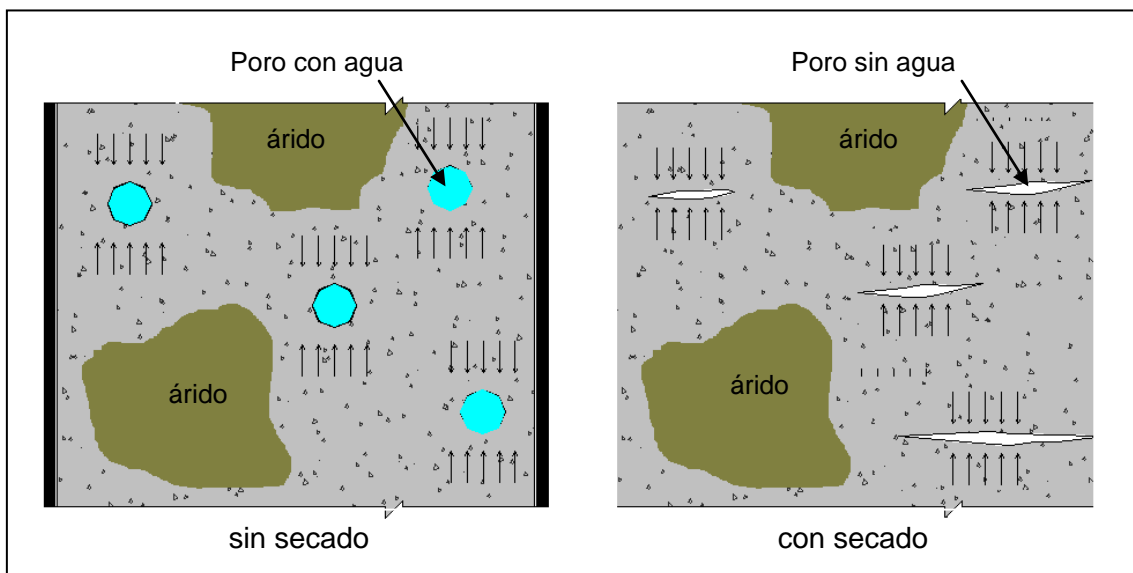


Figura 2.10 – Fluencia y recuperación de fluencia (adaptado de Santos, 2005)

En ella se puede observar que, si los poros del hormigón están llenos de agua, la misma transmite las tensiones no permitiendo que el poro se deforme. Por otro lado, si el agua tiene para donde salir (secado), ocurre la deformación del poro.

Por ello, cuando el hormigón es sometido simultáneamente a la aplicación de una carga sostenida y al secado, la deformación total difiere de la suma por separado de la retracción y fluencia básica. Dicho fenómeno se conoce como efecto Pickett (Pickett, 1942) y se puede apreciar en la Figura 2.11.

Esta diferencia es generalmente muy apreciable y puede ser interpretada como una fluencia inducida por retracción o bien como retracción inducida por las tensiones (Bazant y Wittman, 1982).

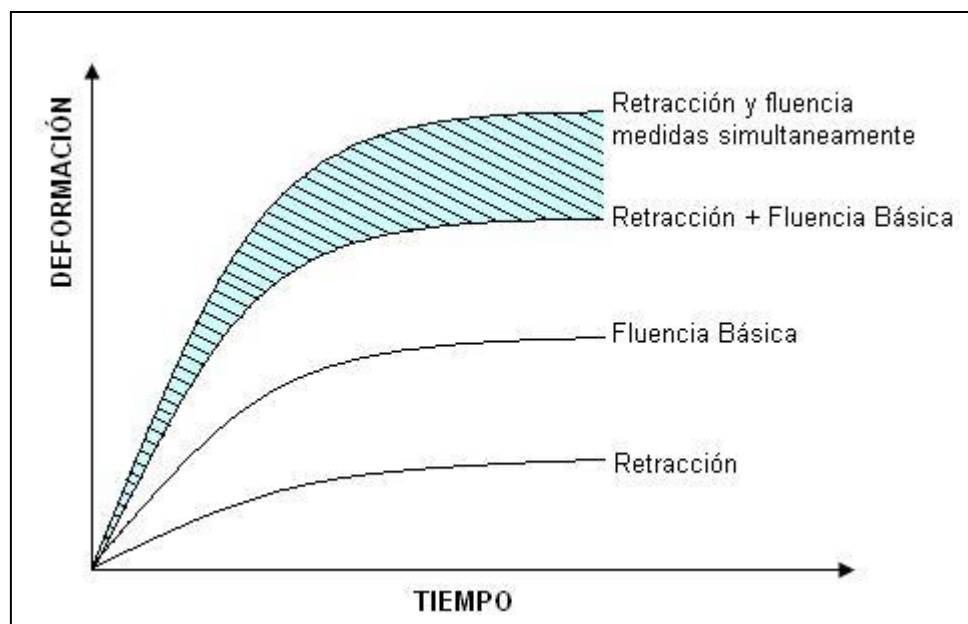


Figura 2.11 – Efecto Pickett (Adaptado de Bazant y Wittmann, 1982)

En general, los factores que influyen sobre la fluencia son similares a los que influyen sobre la retracción, aunque en este caso también están los factores relacionados con la carga aplicada. Se puede considerar que los factores relacionados con mayor resistencia del hormigón y menor porosidad, disminuyen las deformaciones por fluencia. También hay que recordar que no todos los parámetros influyen de la misma manera sobre la fluencia básica y de secado.

### Fluencia en HAC

Debido al mayor contenido de pasta de los hormigones autocompactantes, parece claro esperar que la fluencia sea superior a la de un HC. Sin embargo, el HAC presenta un mejor empaquetamiento del conjunto de forma tal que la distribución interna es más uniforme y consecuentemente se puede reducir algo la fluencia, según figura 2.12.

En este sentido Vieira y Bettencourt (2003) obtuvieron un coeficiente de fluencia para el HAC 15% superior al de un HC con resistencia de aproximadamente 45MPa (adiciones de ceniza volante y caliza en el HAC). Asimismo, la fluencia básica ha sido un 25% superior después de 180 días. Ello responde a que el HC presenta más poros, y la presencia del agua en ellos lo favorece en mayor porcentaje, aumentando el efecto Pickett.

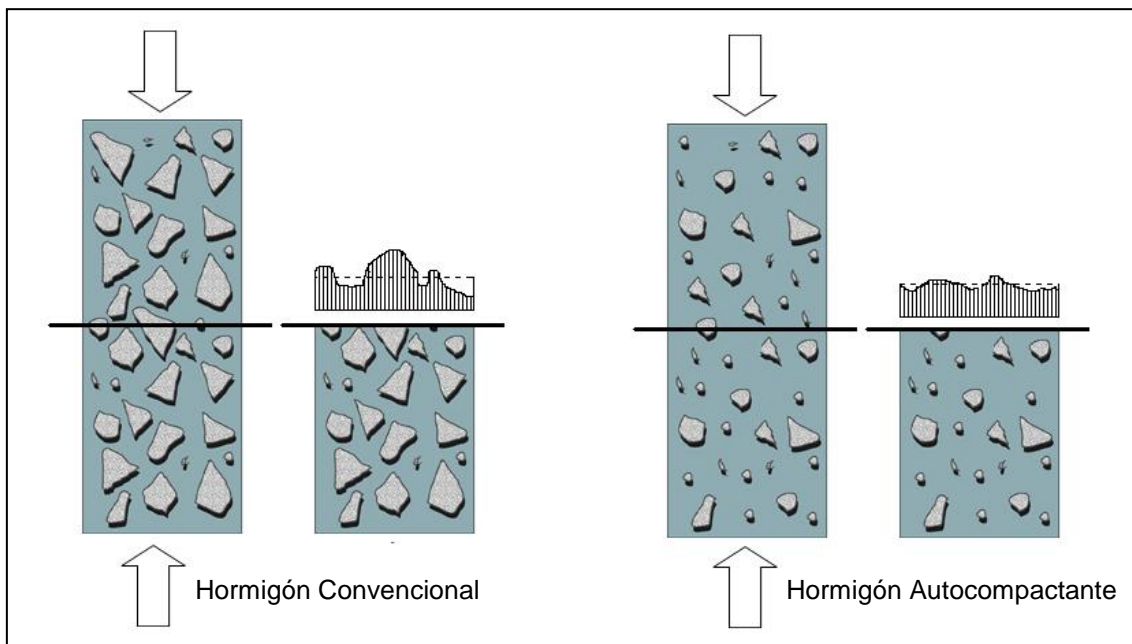


Figura 2.12 – Distribución no lineal de tensiones – HC X HAC

No obstante, la fluencia del HAC puede ser mayor si se aplica la carga a tempranas edades, fruto de la mayor diferencia de rigidez (deformabilidad) de los áridos y de la pasta a estas edades puede amplificar el efecto de la distribución no lineal de tensiones.

Sin embargo, si el HC presenta el mismo volumen de pasta del HAC (usual en hormigones de altas prestaciones) no hay razón para que la fluencia presente alguna diferencia entre ellos. Así que, la EHE-08 considera que el comportamiento en fluencia del HAC es equivalente al de un hormigón de compactación convencional. En este sentido, están las investigaciones de Mortsell y Rodum (2001); Froust y Pons (2003); Chopin, et al. (2003); Yehia et al (2008) que concluyen que para hormigones de similares características no existen diferencias notables entre la fluencia.

Ahora, para la gama muy alta de resistencia, las diferencias entre las dosificaciones de un HC y un HAC se reducen, ya que se disminuye el tamaño



máximo del árido y se incorporan finos en ambos hormigones. Pero, el HC puede sufrir una influencia negativa en el vibrado debido a la exudación de la pasta, lo que resultaría en una fluencia ligeramente superior, tal como observa Persson (2005b) para hormigones de resistencia entre 85 – 111 MPa.

No obstante, existen en la literatura técnica estudios que obtienen una fluencia ligeramente inferior para el HAC, aunque ello no es esperado. Entre ellos se puede citar los trabajos de Kavanaugh et al (2008), que han realizado un estudio con diferentes resistencias y diferentes edades de carga, simulando los procesos empleados en la industria de pretensados y prefabricados. Los autores obtuvieron valores de fluencia del HAC iguales o inferiores al HC. Asimismo, Raghavan et al. (2002) han comparado la fluencia de HAC con ceniza volante y aditivos modificadores de la viscosidad (VMA), con un HC sin ceniza volante. Los autores concluyeron que la deformación por fluencia del HC fue mayor que la deformación del HAC, aunque el comportamiento obtenido en las deformaciones elásticas ha sido inverso.

Además, existen otras variables que alteran la fluencia como el tipo de finos empleado, que dependiendo de su naturaleza disminuye o aumenta la fluencia del hormigón, sin estar necesariamente relacionado con la autocompactabilidad. En ese sentido, cuanto mayor el contenido de filler calizo mayor es la fluencia (Seng y Shima, 2005 y Poppe y de Schutter, 2005). En relación a la escoria de horno alto, cuanto mayor la finura, menor es la fluencia (Song *et al*, 2001); y, a una misma cantidad, la fluencia es menor para mezclas con escoria de que en las mezclas con cenizas volantes (Kavanaugh *et al*, 2008).

La mayor parte de las investigaciones que estudian los efectos de la dosificación en la fluencia de los HAC se centra en estudiar los tipos de finos, su naturaleza y sus características físicas; sin embargo en la literatura técnica son reducidos los estudios que consideran la influencia del esqueleto granular en la fluencia del HAC. No obstante, como ya se ha comentado, la fluencia ocurre en la pasta de cemento y los áridos tienen la función de retenerla, con lo que se puede concluir que el esqueleto granular posee un papel importante en la fluencia de los HAC. En ese sentido se puede citar el trabajo de Chopin, et al. (2003) que ha observado que la fluencia en HAC ha reducido un 25% al aumentar la relación grava/arena de un 0,94 a 1,21. Lo que es esperado, ya que a un mayor contenido de grava, menor será el volumen de pasta y menor la fluencia.

Se puede observar que los varios resultados de la comparación entre HAC y HC son distintos; dicha comparación es complicada, ya que depende de la variable que se fija para lograrla. Es decir, si se fija la resistencia a compresión, el HAC

presentará un mayor contenido de finos y por ello, posiblemente mayor fluencia. Si se realiza dos dosificaciones similares en contenidos de finos una autocompactante y otra no, probablemente la fluencia será similar entre ellos.

Aunque existen diversas normativas en el ámbito internacional para predecir la fluencia en hormigones convencionales, la mayoría de los investigadores coinciden que dichas normativas subestiman los valores de fluencia en HAC. En los estudios de Song et al. (2001) los resultados medidos se compararon con valores calculados utilizando los modelos de estimación ACI-209, JSCE 95, AASHTO 94, CEB-FIP-90 y BP; mientras que en los estudios de Mazzotti et al (2007) se ha comparado los valores medidos con el modelo del CEB-FIP, siendo que ambos estudios concluyeron que los modelos subestiman en gran medida la fluencia de los HAC. Sin embargo, en muchos casos las normativas también subestiman los valores de fluencia en HC (Agranati, 2008), por lo que no se puede considerar que un HAC presenta una mayor fluencia que un HC en base a las normativas actuales.

## **2.8. SÍNTESIS DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO**

De acuerdo al estado del conocimiento expuesto a lo largo del capítulo, se identifican los puntos que pretenden constituir la aportación de esta tesis; los cuales son:

1. La mayoría de los métodos de dosificación no consideran el sistema de puesta en obra del HAC en la etapa de diseño de la mezcla;
2. No se ha observado en la literatura técnica la influencia del esqueleto granular en las propiedades del HAC, sin tener en cuenta el tipo de material fino aportado;
3. La segregación en los HAC es una propiedad difícil de controlar y compleja; aunque existan distintas propuestas de ensayo, no hay un ensayo mundialmente aceptado.
4. Son reducidas las investigaciones encontradas que miden la adherencia del en valores absolutos;

5. Existen pocas referencias de trabajos de retracción y fluencia en HAC edades superiores a los 180 días, considerando que la evolución de dichas propiedades a partir de esta edad es similar a los HC.

## **CAPÍTULO 3:**

# **PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **3.1. INTRODUCCIÓN**

En el capítulo anterior se han revisado los diferentes aspectos que inciden en la caracterización del hormigón autocompactante (HAC), así como los procedimientos utilizados para su dosificación. En él se ha observado que a pesar de los diversos métodos propuestos de dosificación para este tipo de hormigón, no existe un consenso único en cuanto a la proporción de los materiales empleados debido a la influencia de la naturaleza de los mismos. Además, la influencia del sistema de puesta en obra raramente es considerada en los métodos de dosificación de este tipo de hormigón.

Como consecuencia, se ha decidido estudiar la influencia de las proporciones de los áridos en las propiedades del HAC tanto en estado fresco como en estado endurecido y su vinculación correlación con el sistema de puesta en obra. Por ello, se han realizado 4 amplias campañas experimentales, 2 de ellas dirigidas a analizar las propiedades en estado fresco, una orientada a estudiar la evolución de las

propiedades mecánicas en el tiempo (resistencia a compresión, resistencia a tracción indirecta mediante 2 tipos de ensayo, flexo-tracción, módulo de deformación, tensión de adherencia, retracción autógena y total, y fluencia), y otra dirigida a estudiar la segregación del HAC. En total se ha fabricado 6,360 litros hormigón distribuidos en 71 amasadas, lo que representa un esfuerzo experimental importante.

En este capítulo se presenta los aspectos metodológicos asociado al desarrollo de cada una de las campañas experimentales realizadas. En primer lugar se presentan las bases teóricas en las que se ha apoyado la determinación de los tipos de esqueleto granular a estudiar y la asociación con el sistema de puesta en obra. En segundo lugar, se presentan el programa experimental y los objetivos que han guiado el estudio realizado en esta tesis doctoral en el ámbito del convenio CTT 6511 entre la Universitat Politècnica de Catalunya y la empresa PROMSA del grupo Cementos Molins. Finalmente, se exponen los procedimientos de ensayo que se han utilizado y las dosificaciones empleadas en cada caso. Los resultados obtenidos se exponen y analizan en los capítulos siguientes.

### 3.2. BASES TEÓRICAS

Los métodos de dosificación existentes para el hormigón autocompactante (citados en el apartado 2.4. del capítulo anterior), normalmente conducen a dos tipos distintos de esqueleto granular. O bien, un esqueleto continuo, en el cual las proporciones entre la cantidad de arena, de gravilla y de grava disminuyen de forma gradual; o bien, un esqueleto discontinuo, en que la proporción de gravilla es más pequeña que la de grava y de arena, tal como puede verse en la figura 3.1. (Santos et al, 2006)

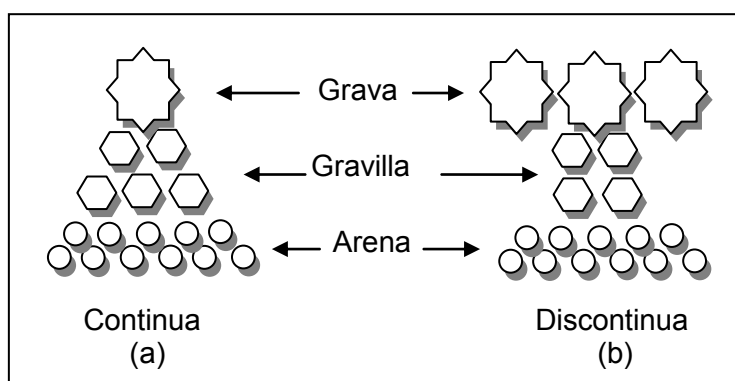


Figura 3.1 – Esquema de los dos tipos de esqueleto granular

En un análisis de las experiencias realizadas con HAC en el ámbito español, se ha puesto de manifiesto una tendencia en la utilización del esqueleto discontinuo. Esto puede responder al hecho de que se asocia este tipo de esqueleto granular en hormigones convencionales a una puesta en obra por bombeo, extendiendo este criterio también a los HAC, los cuales para las aplicaciones in situ se colocan en obra, normalmente, mediante bombeo.

A manera de ejemplo de dosificaciones correspondientes a dos tipos de puesta en obra, en la tabla 3.1 se muestran las dosificaciones del HAC del viaducto de Navia (Vazqueriza, 2006), en el ámbito de la obra civil puesto en obra mediante bombeo y, el hormigón de la Ciudad de la Justicia de Barcelona y Hospitalet de Llobregat (Sempere, 2006), en el ámbito de edificación puesto en obra mediante cubilote. Para el caso del viaducto de Navia, se muestran dos hormigones de prestaciones mecánicas diferentes (45 y 70 MPa, respectivamente). Asimismo, se incluye en dicha tabla la dosificación realizada por PROMSA (Masó, 2005) para las vigas pretensadas del Ayuntamiento de Mollet, en el ámbito de edificación puesto en obra mediante bombeo.

Tabla 3.1 – Dosificaciones empleadas de HAC en diversas obras

DOSIFICACIÓN	Viaducto de Navia		Ciudad de la Justicia	Ayuntamiento de Mollet
	HAC-45	HP-70	HA-35/20/B	HP-35/10/F
Hormigón proyecto	HAC-45	HP-70	HA-35/20/B	HP-35/10/F
Cemento (en kg)	I 42,5 R: 450		I 52,5 R: 450	I 42,5 R: 400
Pigmento (en kg)	—	—	5,0	—
Agua (en l)	190	140	207	165
0/5 mm (en kg)	912	841	1000	780
5/12 mm (en kg)	818	1035	545	958
12/20 mm (en kg)	—	—	100	
Aditivo	Glenium C303 SCC		Sikament 177	Glenium C303 SCC
	1,5% s/c	1,5% s/c	4,0 l	2,0 l
Otros aditivos y/o adiciones	Nanosílice	Microsílice	S.V. 5-900	
	0,5% s/c	50 kg	6,5 l	4,5 l
Relación a/c	0,39	0,28	0,46	0,41

Tal como puede observarse, la dosificación de la Ciudad de la Justicia, corresponde a una estructura triangular del esqueleto granular, de acuerdo con la figura 3.1a; mientras que las dosificaciones del Viaducto de Navia, se corresponden con una estructura de máxima compacidad entre dos componentes (en el entorno del 50%), que se asemeja con una estructura rectangular del esqueleto, como se señala en la figura 3.1b. En esta dirección, también apunta la dosificación realizada para la

obra del Ayuntamiento de Mollet. La razón de este comportamiento, puede encontrarse en el menor rozamiento que se produce durante el bombeo.

### 3.3. SISTEMA DE PUESTA EN OBRA

La asociación del esqueleto granular con el sistema de puesta en obra se basa en el hecho de que la dosificación de un hormigón autocompactante influye, por un lado en su condición de autocompactabilidad, y por otro lado, está condicionada por el sistema de puesta en obra. Esta evidencia no está suficientemente estudiada y recogida en la literatura técnica donde existe un cúmulo de experiencias (dosificaciones de obras concretas o experiencias de laboratorio) pero no un planteamiento metodológico al respecto, tal como puede verse en la documentación asociada a los congresos nacionales e internacionales de esta temática<sup>1</sup>.

La influencia del sistema de puesta en obra en la dosificación de un hormigón es muy clara, por ejemplo, en el caso del hormigón proyectado se emplea una menor cantidad de árido grueso (en favor del mayor contenido de finos), ya que es la fracción que mayor rebote produce. De forma similar, para un HAC, el factor principal es garantizar la autocompactabilidad, sin embargo habrá que tener presente cómo se pondrá en obra este hormigón, ya que al no existir compactación posterior debe cumplirse dos funciones: la del transporte durante la puesta en obra sin segregación y posteriormente la resistencia necesaria (y demás propiedades mecánicas).

En este sentido, el sistema de puesta en obra puede influir en las características del hormigón ya sea a nivel de material o introduciendo defectos de acabado (Pacios et al, 2008). Una comparación entre dos sistemas de puesta en obra (bombeo y cubilote) puede encontrarse en Nunes *et al.* (2005) para el hormigonado de paneles de 5 m. de altura x 1 m. de largo x 0,20 m. de ancho. Cabe resaltar que se ha utilizado la misma dosificación para ambos sistemas basada en el método Japonés (Okamura, 1999). Los autores señalan la presencia de una mayor segregación para la puesta en obra por bombeo, frente a un vertido con un cubilote. Como consecuencia de ello, también se puso de manifiesto una pérdida de resistencia más acentuada entre las diferentes alturas del panel ejecutado por bombeo. Esta diferencia se puede justificar por la energía aportada a la masa de hormigón durante el bombeo. Es por

---

<sup>1</sup> 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, 2008; 1º, 2º, 3º, 4º, 5º y 6º International RILEM Symposium on SCC, entre otros.

ello que se plantea que el esqueleto granular debe estar asociado al sistema de puesta en obra.

Para un HAC puesto en obra mediante cubilote, se requiere que la granulometría del esqueleto granular responda a una estructura piramidal, de forma tal, que el porcentaje de la fracción de árido disminuye a medida que aumenta el tamaño máximo del árido (figura 3.1.a). Esta forma es más estable que la que correspondería a un HAC colocado mediante bombeo (figura 3.1.b).

Si por un lado, el hormigonado en plantas de prefabricados se hacen normalmente mediante cubilotes, por otro lado, en la construcción in situ, es más usual el empleo de sistemas de puesta en obra mediante bombeo. Por ello, se entiende que es necesario plantear las posibilidades de los dos sistemas de puesta en obra, y las condiciones que ello implica en la dosificación.

### **3.4. CAMPAÑAS DE CONTRASTACIÓN EXPERIMENTAL**

#### **3.4.1. Planificación General**

Una vez expuestas las bases teóricas y la correlación existente entre las dosificaciones y el sistema de puesta en obra, en este apartado se exponen los objetivos principales de cada campaña experimental, así como los ensayos realizados en cada una de ellas y los aspectos relativos a la metodología seguida.

Para caracterizar las diferencias de los dos tipos de esqueleto granular, se han desarrollado tres campañas experimentales en PROMSA y en la UPC con objetivos distintos. La primera ha consistido en caracterizar el HAC principalmente en estado fresco sometido a variaciones del contenido de agua. La segunda ha tenido como objetivo la caracterización de las propiedades estructurales, mientras que la tercera ha estado dirigida al estudio de las propiedades reológicas.

Además, se ha realizado una cuarta campaña experimental en *Northwestern University* con diferentes áridos para evaluar la segregación en estado fresco de distintos HAC. A continuación se presenta en detalle los objetivos de cada campaña y los ensayos realizados.



### 3.4.2. Caracterización en estado fresco: 1ª campaña experimental

En la primera campaña experimental el objetivo principal ha sido analizar la diferencia entre los dos esqueletos granulares propuestos, buscando la cantidad de agua ideal para que no se produjera segregación y al mismo tiempo que el hormigón tuviera una trabajabilidad entre 60 y 70 cm medidos por el ensayo de escurrimiento. En total se han fabricado 2 m<sup>3</sup> de hormigón autocompactante, divididos en 20 amasadas de 100 litros cada.

Todos los ensayos correspondientes a estas amasadas se hicieron en las instalaciones del laboratorio de PROMSA, localizado en la Carretera N-340 nº 2 en Sant Vicenç Dels Horts empleando la amasadora de eje vertical modelo MMV 250 con skipe del fabricante Mizar, técnicas de mezclado S.L.

En esta campaña se han desarrollado 4 series de ensayos, cuyos objetivos se muestran en la Tabla 3.2.

*Tabla 3.2 – Objetivos de la primera campaña experimental realizada*

Serie de Amasadas	Fecha fabricación	Nº de Amasadas	Objetivos
1ª	27/11/2006	5	Analizar la diferencia entre los dos esqueletos granulares.
2ª	20/02/2007	5	Repetir, principalmente, los ensayos para la dosificación discontinua.
3ª	03/04/2007	6	Englobar un rango más amplio de las variaciones del agua repitiendo para la misma dosificación discontinua empleada en la campaña anterior. Cuestionamiento del ensayo extensión de flujo. Estudios de segregación
4ª	03/05/2007	4	Englobar un rango más amplio de las variaciones del agua repitiendo la misma dosificación continua empleada en campañas anteriores. Propuesta nuevo ensayo de segregación complementario al de extensión flujo

Para cada una de las amasadas se realizaron los siguientes ensayos:

- Ensayo de escurrimiento: UNE 83361 (2007);
- Ensayo de escurrimiento con el anillo japonés: UNE 83362 (2007);
- Aire Ocluido: UNE 12350-7 (2001)
- Densidad: UNE 12350-6 (2006)
- Resistencia a Compresión a 3, 7 y 28 días: UNE 12390-3 (2003) (2 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm por edad, según norma UNE 12390-1 (2001) y curadas según UNE 12390-2 (2001))

Los resultados del ensayo de escurrimiento presentan una curva característica en función de las variaciones de agua, tal como puede verse en el estudio del HAC fresco expuesto en el capítulo 4. Ello ha dado lugar a profundizar en el mismo y desarrollar un nuevo modelo de previsión del comportamiento en fresco del HAC.

Por otro lado, para valores elevados del ensayo de escurrimiento se ha observado una dificultad para detectar el punto a partir del cual el hormigón presenta segregación a partir del ensayo de escurrimiento, dado que la química del hormigón (aditivos) cohesionan el mismo, por lo que aparentemente no existe segregación, pero en la práctica después al fabricar las probetas si se observa dicha segregación. En consecuencia se cuestiona el ensayo de escurrimiento para hormigones muy fluidos y se propone un nuevo ensayo alternativo para estudiar el tema de la segregación conforme se expone en el capítulo 7.

### **3.4.3. Caracterización en estado endurecido: 2ª campaña experimental**

Una vez terminada la primera campaña experimental, se ha desarrollado una 2ª campaña con el objetivo de profundizar en las diferencias de los dos esqueletos granulares en las características del hormigón en estado endurecido. Para ello, se ha trabajado con dos niveles de resistencia, para cada tipo de esqueleto granular, lo que ha dado lugar a cuatro dosificaciones distintas de HAC.

Tal como se ha comentado, esta campaña experimental ha sido desarrollada en dos etapas; la primera en las instalaciones del laboratorio de PROMSA, anteriormente citadas, donde se fabricaron los hormigones, se realizaron los ensayos de caracterización en fresco y el ensayo de resistencia a compresión. La segunda etapa, se desarrolló en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras (LTE) del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universitat Politècnica de Catalunya, donde se realizaron los ensayos de caracterización del HAC en el estado endurecido.

En esta campaña se han fabricado 3,3 m<sup>3</sup> de hormigón, divididos en 22 amasadas de 150 litros cada una, configurando una muestra total de 420 probetas. Para cada dosificación se han realizado 5 amasadas válidas, en las que se ha utilizado el ensayo de escurrimiento (norma UNE 83361 – 2007) como parámetro de control. Las amasadas de una misma dosificación han sido realizadas de modo consecutivo, por los mismos operarios, con objeto de minimizar cualquier tipo de variación. Los ensayos realizados en el estado endurecido y las normas utilizadas se resumen en la tabla 3.3.

Los ensayos de resistencia a compresión, módulo de elasticidad, flexo-tracción, tracción indirecta, se realizaron en el equipo IBERTEST serie MHE con cuatro columnas y rótula autoblocante. El ensayo de adherencia se realizó en el equipo INSTRON 8500 (*Servo-hydraulic testing system with a stiff frame and under closed-loop control*)

Tabla 3.3 – Ensayos realizados.

Ensayos	Norma	Equipo
Resistencia a compresión	UNE 12390-3	IBERTEST
Módulo de Deformación	UNE 83316	IBERTEST
Flexo-Tracción	UNE 12390-5	IBERTEST
Trac. Indirecta (Brasileño)	UNE 12390-6	IBERTEST
Trac. Indirecta (Barcelona)	UNE 83515	IBERTEST
Adherencia "Beam-test"	UNE 36740	INGSTRON
Retracción	UNE 83318	-
Fluencia	ASTM C 512	Bastidor de carga

El ensayo de **resistencia a compresión** del hormigón, se hizo según las directrices de la norma UNE 12390-3 en 5 diferentes edades (3, 7, 28, 90 y 180 días), y en dos tipos de probetas: cúbica (10x10x10 cm) y cilíndrica (15x30 cm) (según la UNE 12390-1). El ensayo en probetas cúbicas, ha sido realizado en 2 probetas por edad en las instalaciones de PROMSA, mientras que el ensayo en probetas cilíndricas, fue realizado en 2 probetas por edad en PROMSA, y en 3 probetas por edad en el LTE.

Para el ensayo del **módulo de deformación**, se ha seguido las directrices de la norma UNE 83316 (1996), en 5 diferentes edades (3, 7, 28, 90 y 180 días), ensayando 3 probetas por edad. Para las medidas de deformación del hormigón, se utilizaron 3 sensores LVDT, (Linear Variable Differential Transformer) en un conjunto con dos anillos fijados en el hormigón, tal como se indica en la Figura 3.2a.

El ensayo de resistencia a **flexo-tracción**, responde a las directrices de la norma UNE 12390-5 (2001) en 2 edades (7 y 28 días), ensayando 3 probetas por edad, mientras que la determinación de la tracción indirecta se realizó según el **Ensayo Brasileño**, UNE 12390-6 (2001) (que corresponde a ASTM C-496). Para ello se ensayaron 2 probetas por edad en 5 diferentes edades (3, 7, 28, 90 y 180 días).

Para la tracción indirecta se ha utilizado el Ensayo Barcelona (Norma UNE 83515, el cual consiste en la aplicación de una carga centrada en ambas caras de una probeta, mediante dos punzones de 37,5 mm de diámetro. La probeta cilíndrica posee 15 cm. de diámetro y 15 cm. de altura. La aplicación de la carga se controla mediante

el desplazamiento del pistón de la prensa, a una velocidad de 0,5 mm./min. En los casos de hormigones sin fibras, el ensayo termina en el momento de la rotura del hormigón, ya que no hay la contribución de las fibras. Más detalles sobre este ensayo puede consultarse en Saludes (2006) y Molins et al (2009). El ensayo Barcelona se realizó en 5 probetas por edad a 5 diferentes edades (3, 7, 28, 90 y 180 días). La Figura 3.2b muestra una probeta ensayada.

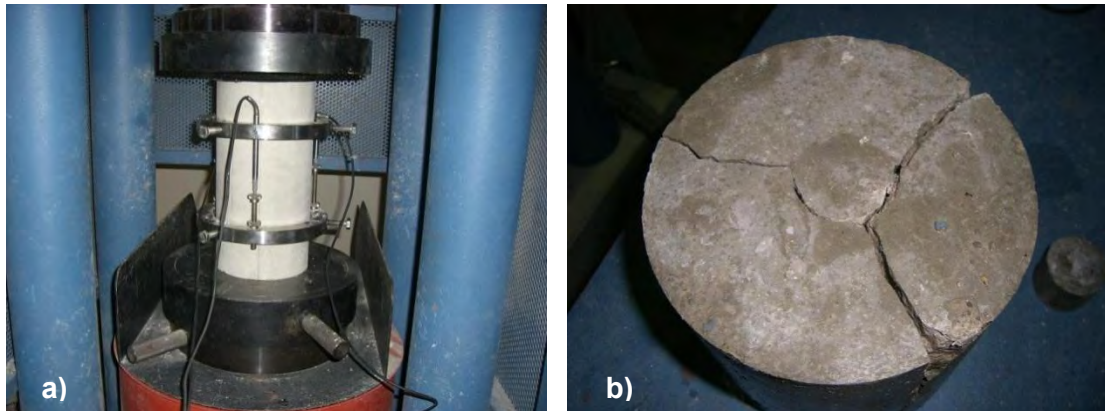


Figura 3.2 – a) Determinación del Módulo de Elasticidad b) Ensayo Barcelona

La resistencia a tracción indirecta “ $f_t$ ” (en KgF/mm<sup>2</sup>) se obtiene a partir de la carga máxima de rotura (P en KgF), de la semialtura de la probeta (h = 75 mm) y el radio del plato de carga (a = 18,75 mm), mediante el modelo de bielas y tirantes según la ecuación 3.1.

$$f_t = \frac{P}{9\pi \cdot h \cdot a} \quad [3.1]$$

Para la determinación de la **adherencia** entre las barras de armadura pasiva y el hormigón autocompactante, se ha utilizado el ensayo de la viga recogido en la norma UNE 36740 (1998), como se muestra en la Figura 3.3. En este caso se ensayaron 2 probetas por edad a 3 edades diferentes (3, 7 y 28 días). Todas las probetas fueron ensayadas con una barra corrugada de acero de 10 mm de diámetro. Para medir el desplazamiento de la barra en los extremos de la probeta, se utilizaron sensores LVDT (Linear Variable Differential Transformer) de  $\pm 5$  mm, tal como se muestra en la Figura 3.3b.

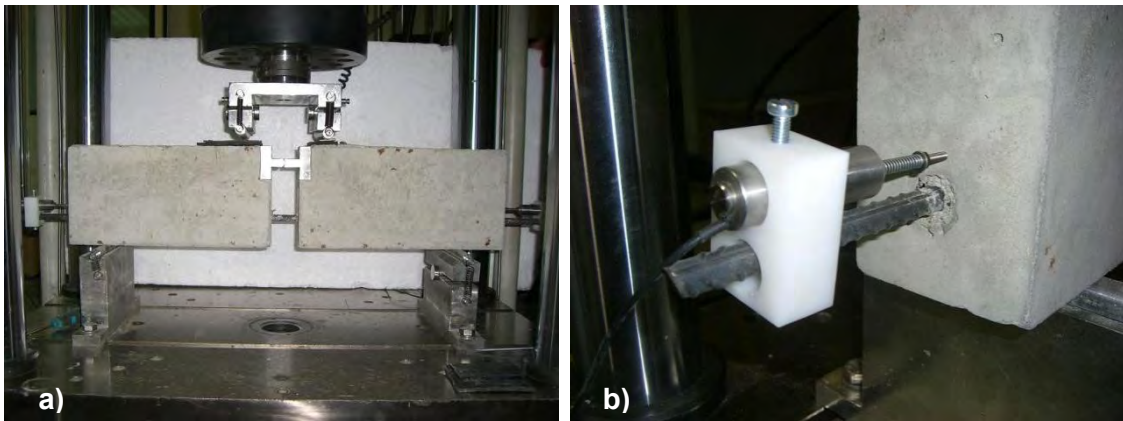


Figura 3.3 – Ensayo de Adherencia. a) Vista del ensayo b) Sensor LVDT

La carga se aplicó en escalones según prevé la citada norma, y al desplazarse uno de los lados, se estabilizaba la carga para fijar este lado a través de una mordaza (Figura 3.4). En la realización del ensayo se presentaron algunas dificultades, las cuales se explican en el apartado 3.5.1.

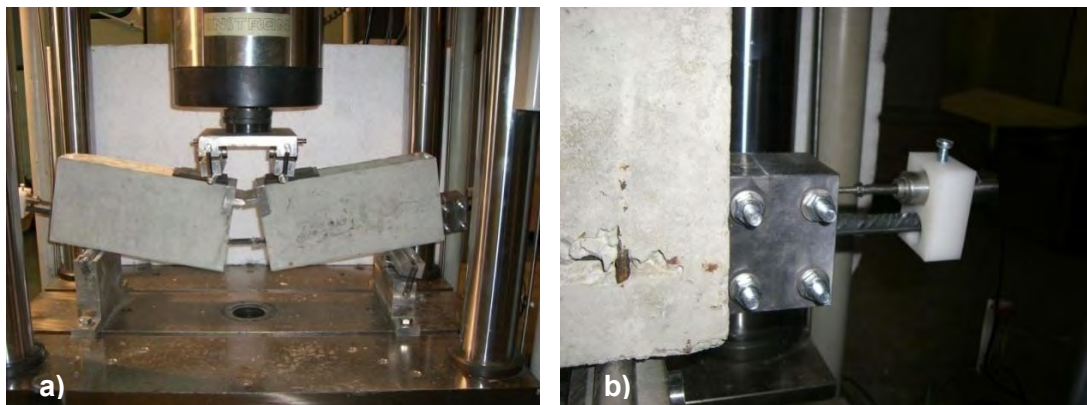


Figura 3.4 – Ensayo de Adherencia. a) Probeta rota con mordaza B) Detalle mordaza

Los ensayos de **retracción**, se han realizado según la norma UNE 83318 (correspondiente a la norma ASTM C157), y los ensayos de **fluencia**, según las directrices dadas en la norma ASTM C512. Para ambos ensayos, se han utilizado probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 45 cm de altura, equipadas con 1 galga embebida, tipo KM-100AT de Tokio Shokki Kenkuyojo (Anejo A) y, 3 bases extensométricas de 15 cm, situadas en meridianos equidistantes (a  $120^\circ$ ) para las lecturas con el extensómetro mecánico, tal como se indica en la Figura 3.5. Se ha empleado los dos sistemas de medición por razones de seguridad, en caso de uno de ellos fallara.

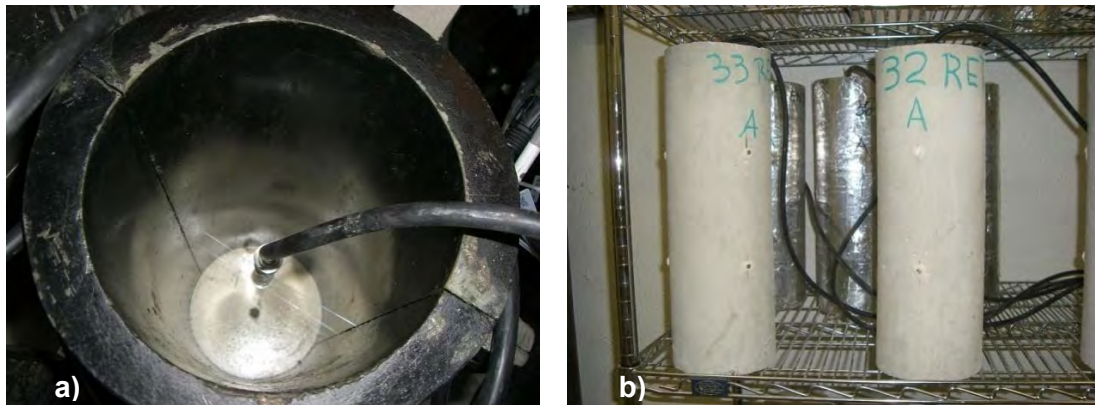


Figura 3.5 – Galga embebida y bases extensométricas utilizadas para las medidas de retracción y fluencia

El sistema de medida electrónico, está configurado por una fuente de alimentación HP E3610A, un sistema de adquisición de datos Agilent HP 3497A y un ordenador de control. Previamente al hormigonado de la probeta, la galga embebida se instala en la zona central del molde, sujeta con hilo de nylon, según la dirección de las generatrices. El cable de la galga sale por la cara superior de la probeta, garantizando su posicionamiento centrado mediante una tapa con agujero central, que se encaja en el molde en el momento de la finalización del hormigonado.

El ensayo de retracción engloba las medidas de retracción total y de retracción autógena. Para ello, se han fabricado 6 probetas por dosificación, 3 de ellas sin sellado para la medida de la retracción total y 3 de ellas selladas.

El proceso de sellado ha consistido en la aplicación de una capa de parafina, de aproximadamente 3 mm, y una capa de cinta adhesiva metálica. Dicho proceso ha sido empleado con éxito por Carbonari et al (2002) mientras que Jiang et al (2005) y Menghao y Ni (2005) utilizan apenas la parafina para sellar las probetas y Ambrosia et al (2005), Persson (2005), Rosière et al (2005) y Reinhardt et al (2008) utilizan apenas la cinta de aluminio. Dicho procedimiento se ha realizado una vez se han desmoldeado las probetas, a las 24 horas del hormigonado.

En la figura 3.6 se puede observar las probetas destinadas al ensayo de retracción autógena (sellada) y las probetas de retracción total (sin sellado) almacenadas al aire libre en el interior de la cámara climática.



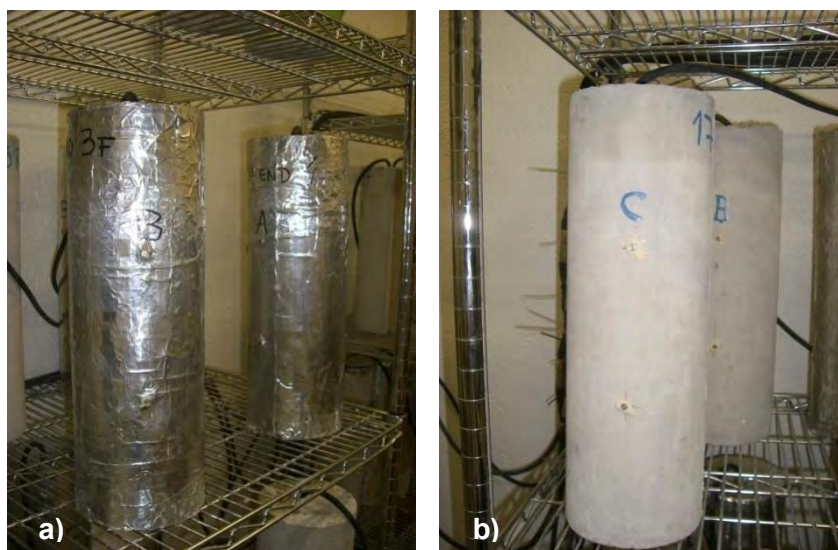


Figura 3.6 – a) Probeta de retracción autógena. b) Probeta de retracción total

Las probetas de retracción y fluencia, han sido confeccionadas en el interior de la cámara climática de PROMSA, regulada a 20° de temperatura y 55% de humedad relativa del aire. Tras la fabricación, permanecieron en la cámara durante 24 horas, transcurridas las cuales, se desmoldearon las probetas. De ellas, las cinco probetas destinadas a los ensayos de retracción total y fluencia, se sumergieron en agua hasta los 28 días, mientras que, en las 3 probetas destinadas a retracción autógena, se aplicaron el proceso de sellado y seguidamente se las almacenó al aire en la cámara climática.

Con posterioridad, el día 9 de julio de 2007 (esta fecha corresponde a edades distintas para cada uno de los hormigones fabricados, según se comentará en el capítulo 5), se transportaron las probetas de la cámara climática de PROMSA a la cámara climática del LTE, donde han permanecido hasta 365 días. Durante el traslado de las probetas, las mismas han permanecido fuera del agua por 3 horas, y llegando a al LTE nuevamente se han sumergido en agua. Pasados los 28 días de curado por inmersión, se pusieron en carga las probetas de fluencia a través de un bastidor, situado dentro de la cámara climática del LTE.

El bastidor de carga, tal como se puede ver en la figura 3.7, está constituido por dos placas de acero de 6 cm. de espesor, unidas por cuatro tirantes roscados.

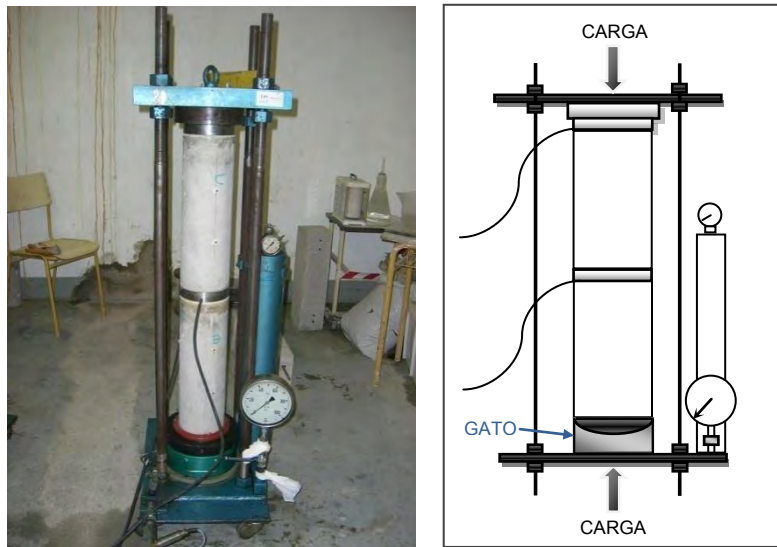


Figura 3.7 – Bastidor de carga usado en el ensayo de fluencia

Sobre la placa inferior se asienta un disco de acero, y sobre él, un gato con una rótula de 50 t., de 19 cm. de diámetro útil. El gato dispone de dos orificios: uno de ellos, está unido a la entrada de aceite, y el otro, a un acumulador oleoneumático y a un manómetro indicador de la presión en el circuito de aceite. Algunos detalles del gato utilizado se pueden ver en la figura 3.8, donde se muestra un gato parcialmente abierto. Previamente a su posicionamiento en el bastidor, las probetas fueron refrentadas, mediante la aplicación de una resina epoxi autonivelante Masterflow 160 (Anejo A), tal como se muestra en la figura 3.9.



Figura 3.8 – Detalle del gato rotulado abierto



Figura 3.9 – Refrentado mediante resina epoxi

Las probetas se disponen por parejas en el bastidor (una encima de la otra). Una vez colocadas y refrentadas se aplica la carga, hasta el 40% de la tensión de rotura del hormigón. Una vez alcanzado este nivel de carga, se mantiene constante



durante un año. El nivel de carga equivalente al 40% de la tensión de rotura del hormigón se establece en la ASTM C512 – 2002 de modo que el hormigón no presente fluencia no lineal.

Durante el inicio de la realización de los ensayo de fluencia se presentaron algunas incidencias en la puesta en carga del primer bastidor, llegando a alcanzar la rotura de una probeta. Los problemas encontrados y la metodología aplicada para corregirlos se detallan en el apartado 3.5.2.

#### 3.4.4. Caracterización Reológica: 3ª campaña experimental.

La tercera campaña experimental se ha desarrollado en su totalidad en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Catalunya. El **objetivo** de esta campaña ha sido, por un lado, realizar una caracterización reológica del hormigón autocompactante estudiado en la campaña anterior, y por otro, realizar las primeras pruebas del ensayo propuesto para medir la segregación.

El planteamiento de esta campaña ha sido similar al de la primera campaña, es decir, se ha trabajado con dos tipos de esqueleto granular variando el contenido de agua entre las distintas amasadas. En esta campaña se han realizado 10 amasadas de 30 litros cada una. La amasadora utilizada es de eje vertical del fabricante Collomix modelo Collomatic 65/2K–3.

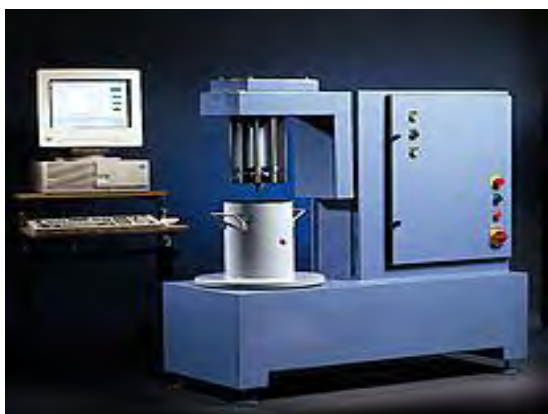


Figura 3.10 – Viscosímetro

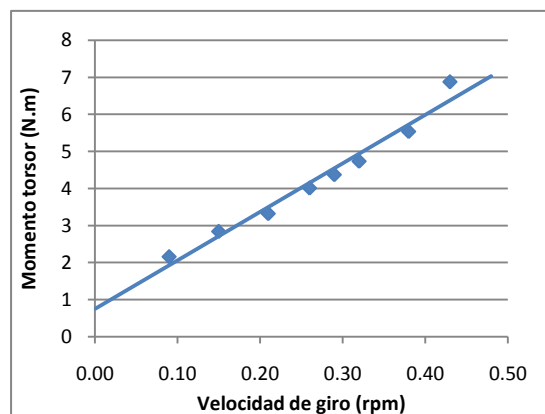


Figura 3.11 – Curva de flujo

Los parámetros reológicos de la mezcla en fresco se determinaron mediante un viscosímetro para hormigones, *-BML Viscometer 3"*, tal como muestra la figura 3.10. Se trata de un viscosímetro de cilindros coaxiales con un recipiente de capacidad aproximada de 25 litros de hormigón, controlado por ordenador. El aparato mide los

pares de valores del esfuerzo (momento torsor) y la velocidad de giro (obtenidos a rotaciones decrecientes iguales a 0.1, 0.15, 0.21, 0.27, 0.33, 0.39 y 0.45 rpm) resultando en una curva de flujo como indica la figura 3.11. A partir estos pares de valores se calcula la tensión umbral y la viscosidad plástica aplicando el modelo de Bingham (Wallevik, 1996). El software incluye una verificación de la tendencia del hormigón que realiza al final a una velocidad intermedia (0.3 rpm).

Para la caracterización de la autocompactabilidad también se han realizado para cada amasada el ensayo de escurrimiento (UNE 83361); el ensayo del escurrimiento con el anillo japonés (UNE 83362); y densidad en fresco del hormigón (UNE 12350-6), habiéndose moldeado 6 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm para medir la resistencia a compresión (UNE 12390-3) a 3, 7 y 28 días. En esta campaña también se ha probado el ensayo de penetración propuesto en el capítulo 7.

#### **3.4.5. Estudios de segregación – 4ª campaña**

La cuarta campaña experimental se ha desarrollado en el laboratorio de materiales de la ACBM (*Center for Advanced Cement Based Materials*) del departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental de la *Northwestern University*, (Evanston, Illinois, E.E.U.U.). Los materiales empleados en esta campaña son distintos a los utilizados en las campañas anteriores y sus características se presentan en el anejo A.

El objetivo de esta campaña ha sido comparar los resultados de los distintos ensayos para medir la segregación del HAC y definir el ensayo propuesto en el capítulo 7 de esta tesis. Para ello, se han fabricado 19 amasadas de 40 litros cada, habiéndose realizado los siguientes ensayos para cada amasada:

- Ensayo de escurrimiento: UNE 83361 (ASTM C1611);
- Ensayo de la técnica de la columna (ASTM C1610)
- Ensayo de estabilidad de tamiz GMT (“The European Guidelines for Self-compacting Concrete”, 2005).
- Ensayo de penetración, propuesto por Bui et al (2002).
- Ensayo de penetración modificado, propuesto en el capítulo 7 de esta tesis.

Para la producción de las mezclas de hormigón, la amasadora empleada ha sido de eje basculante del fabricante Husky, modelo GHM 105890 con capacidad máxima para 50 litros

### 3.4.6. Dosificaciones empleadas

Para realizar el estudio comparativo entre los dos tipos de esqueletos en las tres primeras campañas, se decidió disminuir al máximo el número de variables, por lo que se ha fijado la cantidad de cemento, cambiando sólo el esqueleto granular. En la Tabla 3.4 se presentan las dosificaciones empleadas en la primera campaña experimental. En ella “C” y “D”, representan el tipo de esqueleto granular C: continuo y D: discontinuo expuestos previamente en la figura 3.1.

Los áridos empleados son de origen calizo, obtenidos mediante proceso de machaqueo. Aunque estos proceden de la misma cantera (origen) y planta, (manipulación) no todos son de los mismos lotes. Las variaciones, que ello puede introducir, se han estimado como pequeñas. Las curvas granulométricas suministradas por PROMSA se presentan en el anejo A.

La dosificación tipo C (continua), sigue muy de cerca la utilizada en la Ciudad de la Justicia de Barcelona y Hospitalet de Llobregat, mostrada anteriormente en la tabla 3.1. No obstante, se ha introducido una variación en cuanto al aditivo, ya que se ha utilizado el aditivo superplastificante Glenium C303 SCC, en lugar del SikaViscocrete 5–920, y un fluidificante Melcret PF–75, en lugar del Sikament 177. Otra diferencia es el tipo de cemento, si bien no es determinante para el objetivo que se persigue en este caso.

Tabla 3.4 – Dosificaciones empleadas en la 1ª campaña experimental ( $kg/m^3$ )

	27-11-2006		20-02-2007		03-04-2007	03-05-2007
	C1	D1	C2	D2	C3	D3
Arena 0–4 mm ( $kg/m^3$ )	837	837	976	926	976	926
Garbancillo 5/12 mm ( $kg/m^3$ )	456	152	505	168	505	168
Gravilla 12/20 mm ( $kg/m^3$ )	228	609	292	674	292	674
Total de áridos ( $kg/m^3$ )	1521	1598	1773	1768	1773	1768
Agua teórica ( $l/m^3$ )	215	200	190	182	190	182
Melcret PF–75 ( $kg/m^3$ )	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Glenium C303 SCC ( $kg/m^3$ )	8,73	8,73	8,73	8,73	8,73	8,73
CEM II A–L 42,5R ( $kg/m^3$ )	450	450	450	450	450	450
Relación a/c	0,48	0,44	0,42	0,40	0,42	0,40
Contenido de Finos ( $kg/m^3$ )	546	546	576	569	577	569

En la citada tabla puede verse, por un lado, que el contenido de finos se ha mantenido en el entorno de los 560 kg/m<sup>3</sup>. Ello responde a que se ha ido a un valor ligeramente superior al expresado por Santos *et al.* (2006), dado que la procedencia de los áridos era de machaqueo, lo que puede implicar una menor superficie específica.

Para evitar cualquier tipo de variaciones en la segunda campaña experimental, todas las amasadas de una misma dosificación fueron realizadas con áridos del mismo lote. En ella, se consideraron dos variables: la resistencia a compresión (30 y 60 MPa) y el esqueleto granular (C y D, continuo y discontinuo, respectivamente), lo que da lugar a las cuatro dosificaciones presentadas en la Tabla 3.5. Cabe resaltar que las dosificaciones C60 y D60 son similares a las dosificaciones C3 y D3 empleadas en la primera campaña experimental y expuestas en la anterior tabla 3.4. Todas las amasadas correspondientes a una dosificación fueron preparadas en un mismo día, empleándose un día por cada dosificación. Las fechas se eligieron de forma que no coincidiese, días de amasadas, con días de ensayos, ya que se realizan ensayos a 3, 7, 28, 90 y 365 días.

Tabla 3.5 – Dosificaciones empleadas en las 2ª y 3ª campañas experimentales (kg/m<sup>3</sup>)

	C-30	C-60 / C4	D-30	D-60 / D4
	(30 MPa)	(60 MPa)	(30 MPa)	(60 MPa)
	3/7/2007	15/6/2007	25/6/2007	18/6/2007
Arena 0–2 mm	115		115	
Arena 0–4 mm	876	976	876	926
Garbancillo 5/12 mm	505	505	168	168
Gravilla 12/20 mm	292	292	674	674
Agua teórica	182	182	182	182
Melcret PF-75 (g)	2,7	2,7	2,88	2,7
Glenium C303 SCC	8,73	8,73	7,41	8,73
CEM II A-L 32,5 B-C	380	–	380	–
CEM II A-L 42,5R	–	450	–	450
Relación a/c	0,479	0,404	0,479	0,404
Contenido de finos (kg/m <sup>3</sup> )	541	602	541	590

En la tercera campaña experimental, se han empleado las dosificaciones C-60 y D-60 expuestas en la tabla 3.5. Dado que en ella se ha estudiado las propiedades en estado fresco y el análisis de los resultados se hará conjuntamente con la primera campaña experimental, se llamará C4 y D4 a las dosificaciones C60 y D60, respectivamente, realizadas en la tercera campaña experimental, con el objetivo de homogeneizar la nomenclatura utilizada en el capítulo 3.

Hay que resaltar que, en todas las campañas, los áridos y el cemento, han sido pesados con 24 horas de antelación a la realización de los ensayos, quedando almacenados en bolsas plásticas en el interior del laboratorio de PROMSA. En la tercera campaña las bolsas con los áridos previamente pesados han sido trasladadas a las instalaciones del Laboratorio de Tecnología de Estructuras en la Universidad Politécnica de Cataluña.

Por otro lado, en la cuarta campaña experimental se ha trabajado con 19 dosificaciones completamente distintas de las anteriores. El objetivo de esta campaña ha sido comparar los resultados de los diferentes ensayos de segregación y observar como estos se comportan con los distintos cambios en las dosificaciones. Debido a la gran cantidad de información referente a las 19 dosificaciones y a la necesidad de vincular estas informaciones con el análisis de los resultados, se ha decidido presentar las dosificaciones en el capítulo 7. Los áridos empleados en esta campaña, así como los aditivos son distintos de las campañas anteriores y sus características se presentan en el anejo A.

#### **3.4.7. Proceso de amasado**

El proceso de mezcla utilizado como patrón para todas las tres primeras campañas es el descrito a continuación en 7 pasos:

1. Verter los áridos y el cemento en la amasadora y mezclar en seco por algunos segundos.
2. Verter toda el agua (dejando 2 litros de reserva)
3. Mezclar durante 1 minuto.
4. Verter el aditivo modificador de viscosidad con un poco de agua.
5. Mezclar durante 1 minuto
6. Verter el superplastificante con el restante del agua
7. Mezclar durante 4 minutos.

Tal como se ha comentado anteriormente, la cuarta campaña experimental ha sido realizada en el laboratorio de la *ACBM de Northwestern University* (E.E.U.U.) con equipos y materiales totalmente distintos a los empleados en campañas anteriores. Es por ello que se ha decidido emplear el proceso de mezclado que se utiliza en dicho laboratorio, como se detalla a continuación:

1. Verter los áridos y 1/3 del agua en la amasadora
2. Mezclar durante 1 minuto

3. Verter el cemento, el agua (dejando 0,5 litros de reserva) y el aditivo superplastificante
4. Mezclar durante 3 minutos.
5. Verter el aditivo modificador de viscosidad con el resto del agua.
6. Mezclar durante 4 minutos.

### 3.5. INCIDENCIAS EN EL DESARROLLO DE LOS ENSAYOS

Al inicio de los ensayos de caracterización, se observaron algunos problemas en la realización de los ensayos de adherencia y de fluencia. En este apartado, se detallan estos aspectos y la forma de cómo fueron resueltos.

#### 3.5.1. Ensayo de Adherencia

El primer problema que se ha puesto de manifiesto en los **ensayos de adherencia**, ha sido el acabado inadecuado de las probetas, tal como se puede ver en la figura 3.12, fruto de la alta densidad de armadura.

A pesar de que el hormigón presentaba las características óptimas de un HAC (ensayos en fresco dentro de los rangos propuestos por las normativas), las condiciones del armado impidieron una distribución homogénea del material dentro del molde, tal como se muestra en la figura 3.12. En ella también se puede observar que las condiciones del armado no permitieron un recubrimiento adecuado del mismo.



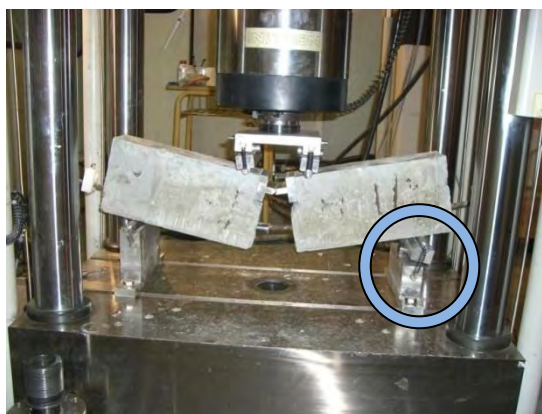
Figura 3.12 – Probetas de adherencia. a) Antes del hormigonado. b) Acabado inadecuado

En estas condiciones, en los hormigonados posteriores, se procedió a aplicar leves golpes con una varilla metálica y martillos de goma, para de facilitar el acceso a todos los huecos. Aún así, en el segundo hormigonado, se han observado nidos en las

probetas, por lo que en el tercer y cuarto hormigonado, se han intensificado estas medidas, obteniéndose unas probetas mejor acabadas. En base a ello, las probetas con los peores acabados han sido destinadas a los ensayos a 3 días, y las mejores se han reservado para los ensayos a 28 días, cara a obtener resultados más fiables a dicha edad.

Otra dificultad observada en los primeros ensayos ha sido que las deformaciones excesivas presentadas al ensayar el primer lado de la probeta, conducían a un giro de los apoyos y a un desplazamiento vertical de la viga, tal como se muestra en la figura 3.13, comprometiendo los resultados del segundo lado. El procedimiento empleado en este caso ha sido descargar el ensayo, volver a posicionar el apoyo en su posición inicial, fijar la mordaza, fijar el LVDT en la mordaza y volver a cargar el ensayo.

El LVDT instalado en la mordaza sirve como parámetro de control del ensayo. En el caso de detectarse movimientos en este lado, el ensayo debe pararse debido a la ineficiencia de la mordaza. En algunas probetas, debido a la deformación excesiva de la misma tras terminar el ensayo en el primer lado, la mordaza no ha sido suficiente para ensayar el segundo lado. Problemas semejantes a este también han sido observados por Isa y Aguado (2003)



*Figura 3.13 – Detalle del apoyo en el ensayo de adherencia.*

Este comportamiento es fruto de que el rozamiento entre la cara superficial de la probeta y los cilindros de aplicación de carga, no permitía el desplazamiento de la misma, generando tensiones internas. Al observar el mismo comportamiento en 8 probetas (ensayadas a 3 y 7 días del HAC A 60 y del HAC B 60), se optó colocar un neopreno de 5 mm y una chapa metálica entre el contacto de la probeta con cada uno de los cilindros de aplicación de carga, tal como se muestra en la figura 3.14.

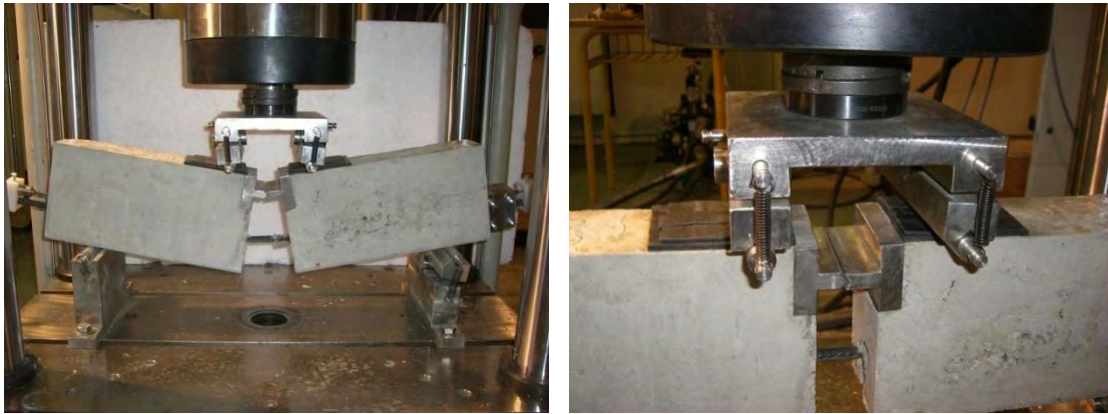


Figura 3.14 – Detalle de la chapa metálica y neopreno del ensayo de adherencia.

Con esta medida, se pudo ensayar los dos lados de las vigas en los ensayos posteriores (HAC A 30 y HAC B 30) a 3 y 7 y 28 días, pero el problema volvió a ocurrir en los ensayos a 28 días de los hormigones con resistencia 60 MPa; es por ello, que en el apartado 5.4.7 (capítulo 5), algunos ensayos presentan dos resultados, y otros sólo uno.

Hay que resaltar que el ensayo de la UNE 36740 (1998) tiene como objetivo determinar la adherencia de las barras corrugadas en base a un hormigón patrón de  $25 \pm 3,75$  MPa. En este estudio el planteamiento ha sido utilizar esta metodología para los hormigones propuestos, si bien dada la elevada energía de fractura del HAC de resistencia 60 MPa, la probeta presenta deformaciones excesivas en el instante de rotura por adherencia del primer lado, que no permitían ensayar el segundo lado, lo que cuestiona el empleo de dicho ensayo para hormigones de alta resistencia ya sea autocompactantes o no.

### 3.5.2. Ensayo de Fluencia

Inicialmente, las probetas destinadas al ensayo de fluencia se han refrentado con el mortero de relleno autonivelante Sikadur 42 (anejo A).

El bastidor, además de las características ya comentadas en el apartado 3.4.3 disponía de dos placas de 8 cm. de espesor, en contacto mediante una rótula constituida por una esfera de acero sobre la placa metálica de 6 cm, posicionada sobre las probetas. De este modo el bastidor estaba compuesto por dos rótulas, una superior y una inferior, como puede observarse en la Figura 3.15

En el momento de carga del primer bastidor, correspondiente a la dosificación C-60, las dos probetas tuvieron roturas en forma de lascas, aproximadamente, a un

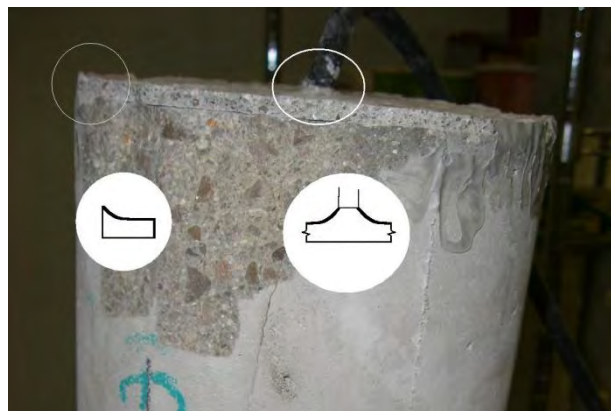


10% de la carga de rotura, tal como se muestra en la Figura 3.15. Estas lajas, tal como puede verse en la figura citada, se sitúan en las zonas de contacto con las placas (superior e inferior).



*Figura 3.15 – Fisuras en el ensayo de fluencia situadas junto a las rótulas  
a) Rótula inferior b) Rótula superior.*

Cuando se observó este fenómeno se descargó inmediatamente el bastidor para analizar el problema, habiéndose identificado que la superficie del mortero de relleno, presentaba los bordes más elevados, (cerca de 2 mm) debido a un efecto de capilaridad con el molde en el momento de ejecución, tal como se visualiza en la Figura 3.16.



*Figura 3.16 – Detalle del acabado del mortero de relleno.*

En esta etapa se ha observado que el efecto de capilaridad, también estaba presente en el cable central, donde el efecto es más crítico ya que no se puede visualizar las fisuras.

Para resolver este problema, se decidió pulir los bordes y el centro del mortero, de modo que, la superficie de la probeta quedase plana. Por otro lado, una de las dos probetas presentaba una pérdida de la sección superficial importante, que podría generar concentración de tensiones, mientras que la sección central no había sido afectada, de modo que se cambió por otra probeta similar, que estaba destinada a la medida de la retracción total.

Como la probeta sustituida no estaba refrentada con el mortero de relleno, se interpuso una lámina de neopreno de 5 mm., con el objetivo de absorber las imperfecciones de la probeta. En el momento de la aplicación de la carga, esta lámina de neopreno, presentó una deformación tangencial al plano de aplicación de carga, obligando a detener el ensayo, antes que este se desestabilizara. Debido al comportamiento del neopreno, se procedió a repetir el ensayo, pero con una lámina de teflón. Con esta configuración, se pudo aplicar una carga de un 30% del valor de la carga de rotura del hormigón, pero al alcanzar este valor, se observaron fisuras en forma de lascas, pero en mayor cantidad que en el caso anterior tal como se muestra en la Figura 3.17



*Figura 3.17 – Detalle de la probeta después del 3er intento de carga.*

Una explicación a estas lascas, podría ser una excentricidad de carga que generase un momento flector en la probeta. La única posibilidad de justificar esta excentricidad de carga sería un no paralelismo entre las caras de la probeta, ya que el montaje del bastidor se había hecho con mucho rigor, verificándose el nivel de las placas de acero 2 veces por distintas personas.

Como consecuencia, las dos probetas ensayadas presentaron una pérdida de sección superficial importante, siendo sustituidas por las otras dos probetas destinadas al ensayo de retracción total.

Para garantizar el paralelismo entre las caras, primeramente se procedió a pulir las dos caras con una pulidora manual, excluyendo así, cualquiera protuberancia causada por áridos. En la cara inferior de la probeta, se aplicó un refrentado con mortero de azufre. En la cara superficial, debido a la presencia del cable de la galga, este procedimiento no fue posible, habiéndose repetido el refrentado con mortero de relleno autonivelante Sikadur 42 (Anejo A), pero con una consistencia más líquida. A las 24 horas de curado, se pulió los bordes generados por el efecto de capilaridad.

De este modo, se repitió el montaje en el bastidor, posicionando nuevamente las láminas de teflón de 5 mm entre las caras superficiales de las probetas y la placa metálica de 6 cm de espesor. En esta ocasión, el proceso completo de carga del bastidor se realizó sin que se presentase problema alguno. No obstante, a las 72 horas de carga, el bastidor presentó una inestabilidad, originando la rotura de una probeta y, consecuentemente, el desmontaje del ensayo. De acuerdo con la forma de rotura, se puede concluir que las probetas se desplazaron lateralmente, debido a una carga excéntrica, tal como se presenta en la Figura 3.18.

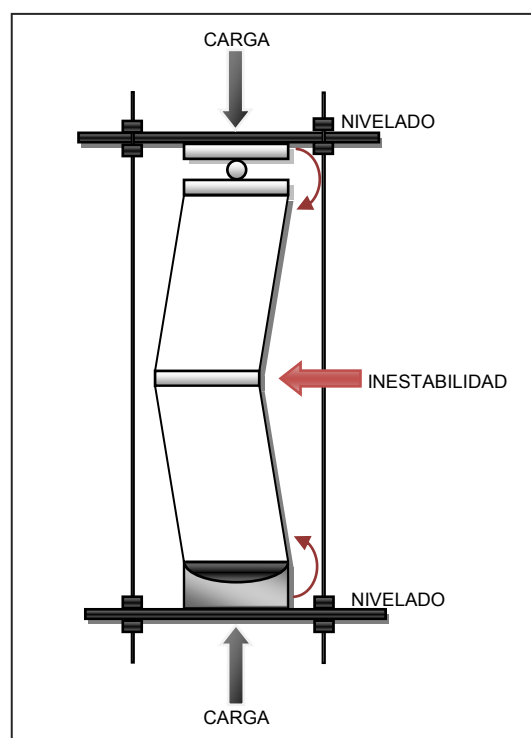


Figura 3.18 – Esquema de la inestabilidad producida por la presencia de dos rótulas en el bastidor de carga.

Esta rotura pudo ser consecuencia de la inestabilidad producida por la presencia de dos rótulas en el bastidor, tal como se muestra en la figura 3.18. De este modo, cualquier deformación diferencial en la probeta, puede desestabilizar el sistema, generando cargas excéntricas. Esta hipótesis se refuerza cuando se analiza el intento de carga con la presencia de una lámina de neopreno. El bastidor presentó el mismo comportamiento pero de modo inmediato, ya que el neopreno, no presenta ningún tipo de resistencia (en realidad es muy baja).

Se debe resaltar que, con anterioridad, el ensayo de fluencia fue realizado en varias series de ensayos en el LTE con la presencia de dos rótulas, pero en probetas de 30 cm de altura, donde los efectos causados por una deformación diferencia, son considerablemente menos importantes, ya que la esbeltez de la probeta se reduce de 3 a 2.

En base a la documentación relativa a los ensayos realizados en probetas con altura de 45 cm similar al utilizado en el LTE en la década de los años 90 (Carbonari, 1996), se decidió realizar el montaje del bastidor sin la rótula superior, quedando de este modo con la rótula inferior compuesta por el gato. También, en base a estos documentos se decidió cambiar el material del refrentado superior de las probetas por una resina epoxi (Masterflow 150, anejo A), ya que el mortero de relleno al estar compuesto por dos materiales, no presentaba la superficie perfectamente lisa, evitando de este modo cualquier tipo de problemas.

Con estas correcciones al procedimiento inicial, no se detectó con posterioridad problema alguno en las otras tres dosificaciones. No obstante, como consecuencia de los problemas descritos, no se tiene datos del ensayo de fluencia en la dosificación C-60.

### **3.6. RESUMEN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS**

A título de resumen se presenta en la tabla 3.6, una relación de los ensayos realizados en cada una de las cuatro campañas experimentales. Tal como se ha comentado anteriormente, cada campaña experimental ha sido compuesta por un determinado número de series de amasadas de dosificación similar.

Tabla 3.6 – Resumen de los ensayos realizados en cada campaña experimental

Ensayos		Campañas				
		1 <sup>a</sup>		2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>
		1 <sup>as</sup> a 3 <sup>as</sup>	4 <sup>a</sup> serie	4 series	2 series	19 series
Estado Fresco	Escurrimiento	X	X	X	X	X
	Escurrimiento con anillo	X	X	X	X	
	Caja en L			X		
	Penetración		X		X	X
	Reología				X	
	Ensayo de la columna					X
	Ensayo del Tamiz					X
Estado Endurecido	Resistencia a compresión	X	X	X	X	
	Módulo de Deformación			X		
	Tracción indirecta Ensayo Barcelona			X		
	Tracción indirecta Ensayo Brasileño			X		
	Flexo-Tracción			X		
	Adherencia			X		
	Fluencia			X		
	Retracción			X		

## **CAPÍTULO 4:**

# **CARACTERIZACIÓN EN ESTADO FRESCO**

### **4.1. INTRODUCCIÓN**

Una vez realizada la planificación de la campaña experimental (capítulo 3), en este capítulo se presentan y analizan los resultados correspondientes al estudio del comportamiento en estado fresco del HAC teniendo en cuenta la influencia el esqueleto granular. En particular, se analizan los cambios de contenido de agua, en términos fundamentalmente de la relación agua/finos y, se adopta la resistencia a compresión como parámetro de referencia para analizar las propiedades en fresco.

Para dar respuestas a estos objetivos, en primer lugar, se presentan los resultados de la primera y tercera campañas experimentales con el propósito de analizar la influencia del contenido de agua mediante ensayos de carácter ingenieril (escurrimiento con y sin anillo). En dicho estudio se ha observado una dificultad para identificar la segregación de la mezcla de hormigón en el ensayo de escurrimiento.

Con posterioridad, se presenta el análisis de los parámetros reológicos (tensión umbral y viscosidad plástica) obtenidos en la tercera campaña experimental. Se incluye la discusión de como el contenido de agua modifica dichos factores y se estudia la vinculación entre los parámetros reológico medidos y los resultados de los ensayos ingenieriles.

Finalmente, se plantea un modelo del comportamiento en estado fresco del HAC en función de los cambios del contenido de agua, basado en una función exponencial, y se exponen los ajustes de los parámetros de la función propuesta realizados en base a los resultados obtenidos.

## **4.2. ESTUDIO DE LAS VARIACIONES DEL CONTENIDO DE AGUA**

En el presente apartado se exponen y analizan los resultados referentes a los ensayos realizados en la primera y tercera campañas experimentales (cabe recordar que la segunda campaña experimental tiene como objetivo estudiar las propiedades en estado endurecido del hormigón autocompactante y sus resultados están contemplados en el capítulo 5). Ambas campañas han tenido como objetivo el estudio de las propiedades en fresco de los HAC, centrándose en el estudio de los cambios de las variaciones del contenido de agua.

### **4.2.1. Dosificaciones**

Las dosificaciones empleadas en cada campaña se han presentado con detalle en el capítulo anterior; no obstante para facilitar el análisis de los resultados de este estudio se expone una síntesis de las mismas en la tabla 4.1.

En total, se han realizado cuatro series de ensayo con la dosificación de esqueleto granular continuo (C1, C2, C3 y C4) y cuatro con la dosificación de tipo discontinuo (D1, D2, D3 y D4). Para cada serie (con excepción de la C2) se han realizado entre 3 y 6 amasadas cuya variable principal ha sido el contenido de agua. El número de series ha sido en función de los resultados obtenidos en el ensayo de escurrimiento.

Cabe recordar que en cada serie se ha partido de un valor teórico del contenido de agua y, en función del resultado obtenido se ha ajustado el contenido de agua para obtener unos resultados dentro del rango de validez del ensayo de escurrimiento según la EHE-08 (55 a 85 cm). Asimismo se ha evaluado el escurrimiento con anillo japonés, el aire ocluido y la densidad en fresco de cada una de las series.

Tabla 4.1 – Tabla Resumen de las dosificaciones (en kg/m<sup>3</sup>)

	C1	C2/C3/C4	D1	D2/D3/D4
Arena 0/4 (kg/m <sup>3</sup> )	837	976	837	926
Garbancillo 5/12 (kg/m <sup>3</sup> )	456	505	152	168
Gravilla 12/20 (kg/m <sup>3</sup> )	228	292	609	674
Melcret PF-75 (l/m <sup>3</sup> )	2,7	2,7	2,7	2,7
Glenium C303 SCC (l/m <sup>3</sup> )	8,73	8,73	8,73	8,73
CEM II/ A-L 42,5R (kg/m <sup>3</sup> )	450	450	450	450
Água teórica	215	182	200	182
Contenido de Finos (kg m <sup>3</sup> )	546	575,8 569,4 602,0	569,4	569,4 569,4 590,0

#### 4.2.2. Resultados de los Ensayos

En la tabla 4.2 se expone los resultados de la caracterización en estado fresco y de la resistencia a compresión. En la tercera campaña experimental (dosificaciones C4 y D4) además de los resultados expuestos en dicha tabla, se ha realizado la caracterización reológica del HAC (medidas de tensión umbral y viscosidad plástica), como se expone en el apartado 4.6.3. El análisis de dichos resultados se realiza en los siguientes apartados.

#### 4.2.3. Dificultad de identificar la segregación

Los ajustes del contenido de agua entre las amasadas fueron realizados durante los ensayos en base a los resultados del ensayo de escurrimiento. Las alteraciones del contenido de agua en una dosificación alteran su fluidez, de modo que alteran el resultado del escurrimiento. Al incrementar el contenido de agua en una mezcla, el diámetro medido en el ensayo de escurrimiento aumenta hasta un límite a partir del cual el hormigón segrega.

Inicialmente, se ha adoptado un criterio cualitativo fundamentado en la apreciación visual de la segregación para definir estos valores, dado que tanto la UNE 83361, la ASTM C1611 y la “Guía Europea sobre Hormigón Autocompactante” (BIBM, 2005) consideran que el ensayo de escurrimiento permite evaluar la presencia o no de la segregación.



Tabla 4.2 – Resultados del estudio de las variaciones del contenido de agua

	agua (l/m <sup>3</sup> )	Agua /finos	Escurrecimiento				Aire Ocluido (%)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia (Mpa)		
			normal	T50	Con Anillo J				3 días	7 días	28 días
			D (cm)	t (s)	D (cm)	C,B					
C1	181	0,332	73	–	71	–	1,4%	2,363	37,5	47,8	52,0
	195*	0,357	74	–	–	–	1,1%	2,343	–	–	–
	215*	0,394	76	–	–	–	–	–	–	–	–
C2	181,5	0,315	67	–	61	–	2,3%	2,378	42,7	52,5	68,5
C3	172	0,302	63	–	59	–	2,2%	2,395	–	55,5	69,7
	182	0,320	69	–	68	–	1,5%	2,403	–	53,4	67,2
	192	0,337	77	–	68	–	1,1%	2,398	–	51,1	63,6
	197	0,346	80	–	72	–	1,0%	2,390	–	45,1	64,1
C4	172	0,298	60,5	7,53	58,8	0,77	–	2,370	–	–	60,5
	177	0,307	62	6,5	58,5	0,68	–	2,340	–	–	58,7
	182	0,315	67,5	4,12	65,5	0,77	–	2,400	–	–	54,5
	187	0,324	76	1,5	68,5	0,55	–	2,330	–	–	52,0
	192	0,333	78,5	1	68,5	0,65	–	2,360	–	–	49,9
D1	165	0,302	55	–	–	–	–	–	–	–	–
	167,5	0,307	68	–	67	–	1,8%	2,355	38,8	492,0	56,5
	170	0,312	77	–	–	–	0,5%	2,410	32,0	431,5	54,3
D2	179,8	0,316	61	–	60	–	2,7%	2,400	44,8	52,9	67,8
	182	0,320	70	–	70	–	1,5%	2,385	41,1	52,0	64,8
	183	0,321	74	–	70	–	1,5%	2,405	42,6	53,3	67,0
	187*	0,328	74	–	72	–	1,3%	2,408	41,4	52,6	66,4
D3	172	0,302	71	–	64	–	2,1%	2,390	–	58,4	68,8
	182	0,320	72	–	72	–	1,5%	2,400	–	53,9	70,2
	192	0,337	76	–	70	–	0,9%	2,398	–	49,7	57,4
	202	0,355	79	–	73	–	1,0%	2,398	–	47,5	61,0
	212*	0,372	79	–	74	–	0,7%	2,393	–	45,9	58,2
	217*	0,381	78	–	–	–	0,5%	2,378	–	41,4	56,0
D4	172	0,306	57	5,8	52	0,76	–	2,380	–	–	59,7
	175	0,311	66,5	2,41	57,5	0,90	–	2,400	–	–	59,2
	177	0,314	68	2,08	63,5	0,61	–	2,380	–	–	57,9
	182	0,323	72	2,12	63,5	0,75	–	2,380	–	–	55,8
	192*	0,341	77,5	1	73	1	–	2,340	–	–	51,5

\*amasadas cuyos hormigones presentaron segregación.

Pero este análisis cualitativo utilizando el ensayo de escurrimiento puede ocasionar dudas en el diagnóstico de la segregación (Lowke et al, 2003). En algunas series se ha obtenido un buen resultado visual en el ensayo de escurrimiento y, sin embargo se ha observado segregación de los áridos gruesos en la probeta cilíndrica moldeada, tal como se muestra en la figura 4.1, en la que se puede ver una abundancia de finos en la parte superior de la probeta, diferenciándose del resto de la misma.



Figura 4.1 – HAC segregado (D3-202). A) Ensayo de escurrimiento. B) Probeta rota.

Esta indefinición ha propiciado un estudio específico encaminado a diseñar un ensayo complementario al del escurrimiento que pudiera diagnosticar la segregación de modo objetivo cuantitativo, tal como se expone en el capítulo 7.

La dificultad del diagnóstico de la segregación se pone de manifiesto cuando, al añadir agua el HAC empieza a perder estabilidad, tal como se ha observado en las amasadas C1-195, D2-183; D3-202; D3-212; D4-192. En dicha situación si se añade más agua se observa con nitidez la segregación en el ensayo de escurrimiento, según se puede observar a modo de ejemplo en la figura 4.2, correspondiente a la amasada D3-217.



Figura 4.2 – HAC segregado con diagnóstico visual preciso (D3-217).

#### 4.2.4. Escurrimiento

En el transcurso de las campañas experimentales se ha observado que una misma dosificación presentaba un comportamiento distinto en el ensayo de escurrimiento para series similares. Inicialmente, se analiza estos resultados en función de una regresión lineal, considerando sólo las series sin segregación. A

continuación se hace un análisis del comportamiento global en fresco del HAC considerando todas las amasadas de cada serie incluyendo aquellas en que se ha detectado segregación del hormigón.

### Series sin segregación

En la Figura 4.3 se presentan los resultados obtenidos para las amasadas consideradas válidas en cada serie, es decir que no hayan presentado segregación de sus componentes. Las amasadas con presencia de segregación C1–195; C1–215; D2–187; D3–212; D3–217; D4–192 han sido excluidas de dicha figura tal como se indica en la tabla 4.1, presentada anteriormente.

Los distintos contenidos de agua en cada dosificación conducen a variaciones del escurrimiento desde valores bajos (D1–165  $\approx$  55 cm) hasta valores elevados (C3–197  $\approx$  80 cm), en los que se ha observado segregación.

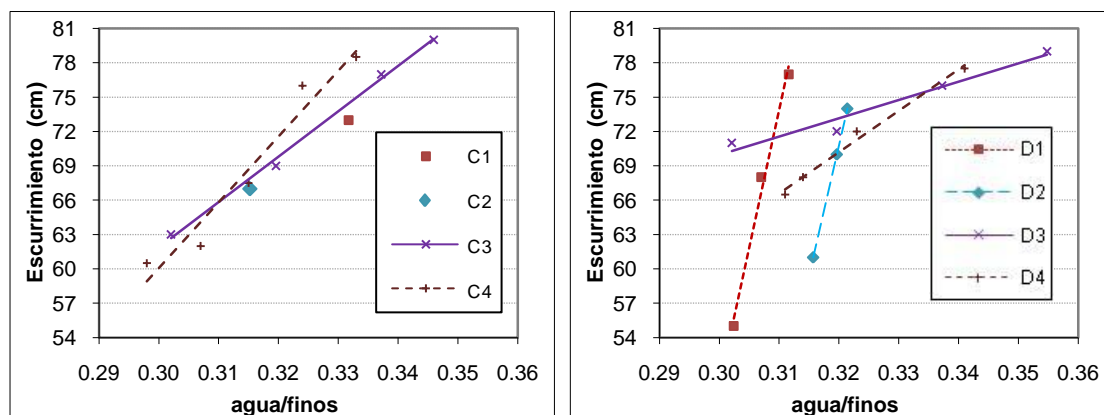


Figura 4.3 – Resultado de los ensayos de escurrimiento sin segregación.

a) Dosificación continua. b) Dosificación discontinua

En dicha figura los resultados están separados por tipo de dosificación. En primer lugar, se observa que no hubo una repetitividad de los resultados principalmente en la dosificación discontinua; es decir, en cada día diferente en que se ejecutaban las amasadas, la influencia de las variaciones del contenido de agua en el ensayo de escurrimiento ha sido distinta, la cual puede estar asociada a factores externos, como la temperatura y la humedad relativa del aire, ya que han presentado cambios significativos entre los días de amasado.

En la Tabla 4.3 se presentan los valores facilitados por el Servicio Meteorológico de Catalunya medidos por el Observatorio Fabra. En ella se observa que la dosificación continua presentó una menor influencia de las condiciones

climáticas, ya que las series C3 y C4 presentan resultados similares aunque las condiciones climáticas son claramente diferentes.

Tabla 4.3 – Temperatura y HR referente a los días de hormigonado

Fecha	Series ensayadas	Temperatura del aire (°C)	Humedad Relativa (%)	Precipitación
27-11-2006	C1 y D1	17°	54%	No
20-02-2007	C2 y D2	13°	72%	No
03-04-2007	D3	8°	100%	Si
03-05-2007	C3	13°	90%	No
16-09-2007	C4	26°	35%	No
17-09-2007	D4	24°	65%	No

En cambio, la dosificación discontinua ha presentado comportamientos completamente distintos en función del día en que se ha realizado. Las dos primeras series, D1 y D2, aunque no poseen exactamente el mismo esqueleto granular han presentado la misma influencia del contenido de agua reflejada en la misma pendiente de la recta de la figura 4.3. Los efectos de las variaciones del contenido de agua en estas series han sido considerables, puesto que un cambio del orden de los 5 l/m<sup>3</sup> altera la fluidez del HAC de un diámetro de 55 cm a otro de 77 cm (D1).

Entre las dosificaciones discontinuas, tanto la serie D3 como la serie D4, son las que presentan una menor influencia de las condiciones climáticas en la fluidez, ya sean en el día con la menor temperatura y con presencia de lluvia o bien, en un día más caluroso, respectivamente. En ambos casos, los resultados muestran una influencia menor que en las series D1 y D2.

En resumen, se puede concluir que la dosificación continua presenta una mayor robustez que la dosificación discontinua, ya que los cambios impuestos a las mismas ocasionaron mayores variaciones de comportamiento en la segunda. Lo que se pone claramente de manifiesto es que el comportamiento del hormigón frente a la adición de agua depende del esqueleto granular y, en todos los casos, presenta mayores escurrimientos para mayores contenidos de agua.

#### Análisis de todas las series

Por otro lado, se analizan todas las amasadas de cada serie incluyendo aquellas en que se ha detectado segregación del hormigón. En la figura 4.4 se

exponen los resultados obtenidos en todas las amasadas, separados por tipo de dosificación. En ella, se puede observar dos tipos de fenómenos:

- **1ª fase:** para valores bajos de la relación agua/finos, el ajuste de la curva se realiza mediante una recta. Aunque los resultados difieren entre las distintas campañas, la correlación es altamente satisfactoria, para las relaciones agua/finos más bajas en una misma campaña. Corresponde a los resultados analizados sin considerar la segregación.
- **2ª fase:** para valores altos de la relación agua/finos: se pierde la correlación, justamente, cuando se inicia la segregación de la mezcla.

Tal como se ha mencionado anteriormente, la diferencia de la pendiente de esta recta entre las series con dosificaciones similares debe estar asociada a algún factor externo, ya que en todas las campañas el procedimiento fue exactamente el mismo.

En algunas series se puede observar un cambio brusco de comportamiento, como por ejemplo las series D2 y D3. Este tipo de cambio se asocia con una menor zona de transición entre la primera y segunda fase. Por un lado esta transición brusca no da lugar a dudas en el ensayo de escurrimiento; mientras que por otro lado, con un pequeño incremento de agua no esperado en la dosificación, esta pierde la estabilidad llegando a la segregación de sus componentes. Este cambio brusco de comportamiento está asociado a un punto de inflexión de la curva, o bien, a una zona de transición entre las dos fases, o a un punto de segregación.

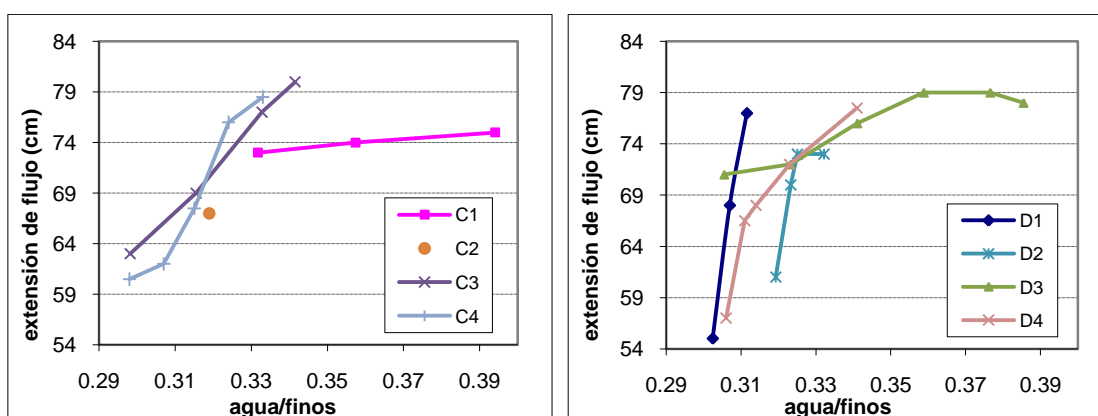


Figura 4.4 – Resultados del ensayo de escurrimiento del conjunto de series  
a) Dosificación continua. b) Dosificación discontinua

Para algunas series no se ha superado dicho valor, puesto que ya se había obtenido un valor elevado para este ensayo (del orden de los 80 cm), representando los límites de extensión del hormigón. Es decir, para una mayor cantidad de agua no se alteraría el valor del ensayo (no se puede superar los 80 cm sin presentar segregación, de acuerdo con el modelo del cono que se expone en el siguiente apartado). De este modo, si se realizara una amasada con un mayor contenido de agua probablemente se obtendría el mismo resultado del escurrimiento pero con segregación de la mezcla y esta cantidad de agua correspondería al punto de segregación y al segundo tipo de comportamiento, observado en las otras campañas.

Un orden de magnitud del límite de validez del ensayo se puede obtener de un modo simplificado mediante el modelo que se presenta en el siguiente apartado.

#### 4.2.5. Límite superior de validez del ensayo de escurrimiento: modelo del cono.

Cuando se trabaja con el hormigón autocompactante de elevada fluidez, los diámetros obtenidos en el ensayo de escurrimiento son muy elevados del orden de los 70 a 80 cm, pero hay un límite para que el hormigón no presente segregación. El tipo de aditivo incorporado en la mezcla puede influir en estos valores, pero no puede hacer que el hormigón fluya indefinidamente más allá de un cierto límite. Este límite puede ser evaluado de un modo simplificado para una situación extrema, considerando que el hormigón se mantenga estable, sin presentar segregación; la figura 4.5 expresa visualmente la idea que se pretende con esta evaluación.

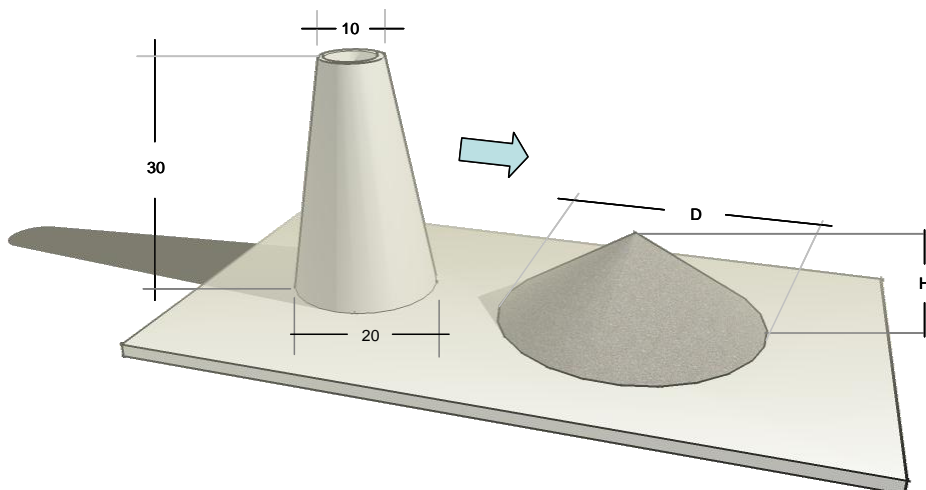


Figura 4.5 – Simulación del ensayo de extensión de flujo.

El volumen de hormigón utilizado para el ensayo es aproximadamente 5,5 litros, y considerando que al realizar el ensayo se obtendrá un cono con el mismo

volumen, se puede calcular el diámetro del cono en función de su altura central. En Tabla 4.4 se presentan valores de la extensión de flujo para algunos valores enteros de la altura central del cono.

Tabla 4.4 – Variable “D” en función de la altura “H” en la simulación del ensayo escurrimiento.

Altura Cono "H" (mm)	Extensión de flujo "D" (cm)
50	64,81
40	72,46
30	83,67
20	102,47

Para dar un sentido físico a los resultados obtenidos, siguiendo el modelo del cono se analiza cual es la altura máxima del cono para las dos granulometrías estudiadas: continua y discontinua.

Para **granulometrías continuas**, la altura en el centro del cono de la extensión de flujo será como mínimo la siguiente:

$$H_{\text{MÍN}} = (t_{\text{MÁX árido 1}} + t_{\text{MÁX árido 2}} + t_{\text{MÁX árido N}}) + 0,5 \text{ mm} \cdot n^{\circ} \text{ de tamaños} \quad [4.1]$$

donde,

$t_{\text{MÁX árido 1}}$ ;  $t_{\text{MÁX árido 2}}$ ;  $t_{\text{MÁX árido N}}$  representan el tamaño máximo de cada árido, es decir para una arena 0–4 el tamaño máximo sería 4 mm.

“nº de tamaños” representa el número de los distintos áridos adicionados.

Este planteamiento se corresponde, por un lado, con considerar que la capa de pasta que rodea los áridos es de 0,5 mm de espesor, lo cual no deja de ser una aproximación ingenieril razonable y, por otro lado, a un cierto acoplamiento de los áridos en búsqueda de su talud natural en las condiciones óptimas de trabajabilidad, lo que conduce a un valor mínimo, como se indica en la figura 4.6.

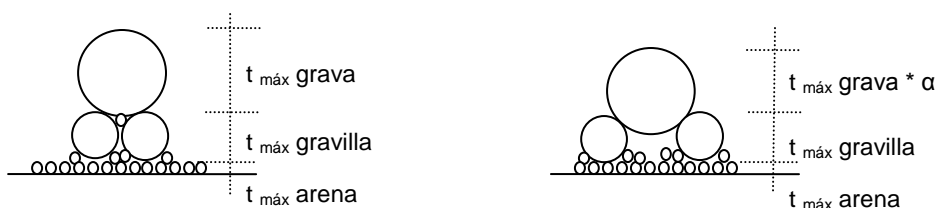


Figura 4.6 – Interpretación altura mínima en el centro del cono:  
a) Granulometría continua y b) Granulometría discontinua

Para la granulometría continua con tres tipos de árido: arena (0–4 mm), gravilla (6–12 mm) y grava (12–20 mm) el resultado es, como mínimo:

$$H_{\text{MÍN}} = 4 + 12 + 20 + 0,5 \cdot 3 = 37,5 \text{ mm} \quad \text{[4. 2]}$$

Este resultado de acuerdo a la simulación realizada en la tabla 4.4, vendría a significar una extensión de flujo del entorno de los 75 cm, lo cual corresponde a los valores dados en la figura 4.4.

En el caso de **granulometría discontinua** y, especialmente, si la fracción intermedia es muy pequeña, se puede aplicar la misma formulación, si bien quitando del sumatorio la parte del tamaño intermedio, ya que para buscar el equilibrio el tamaño máximo se apoyará o bien en el tamaño pequeño o bien entre los tamaños intermedios aunque estos al estar en menor número y estar más separados, el tamaño máximo puede acoplarse y penetrar, por lo que el espesor será menor (en la figura se ha representado por un coeficiente  $\alpha$ ). Todo ello no deja de ser una interpretación razonable de tipo ingenieril. El resultado para este tipo de granulometría para  $\alpha = 0,8$  sería:

$$H_{\text{MÍN}} = 4 + 12 + 0,8 \cdot 20 + 0,5 \cdot 3 = 33,5 \text{ mm} \quad \text{[4. 3]}$$

Este resultado de acuerdo a la simulación realizada en la tabla 4.4, vendría a significar una extensión de flujo del entorno de los 79 cm, lo cual se sitúa en el entorno de valores dados en la figura 4.4.

En realidad, la forma final del ensayo de escurrimiento no es un cono perfecto sino que, se parece algo más a una torta. Aún así, los valores obtenidos de la extensión de flujo máxima tienen un sentido físico y no pueden ser muy superiores al diámetro de 80 cm.

Para comprender mejor este comportamiento se presenta en el apartado 4.4, un modelo de comportamiento del HAC en el estado fresco.

#### 4.2.6. Escurrimiento con anillo japonés

Como es conocido, este ensayo evalúa la capacidad de fluir del hormigón fresco en presencia de obstáculos y el riesgo de bloqueo. Consiste en colocar un anillo con barras metálicas en la parte inferior del cono de Abrams al realizar el ensayo de escurrimiento.



En las primeras campañas sólo se ha medido el diámetro final en ese ensayo; mientras que en las series C4 y D4 también se han realizado medidas de altura inmediatamente antes y después de las barras del anillo para calcular el coeficiente de bloqueo; de acuerdo con lo indicado en la misma.

Los resultados obtenidos para el ensayo de escurrimiento con anillo japonés se presentan junto a los resultados del ensayo de escurrimiento en la figura 4.7. Cabe señalar que en ninguna de las series ocurrió el bloqueo entre las armaduras del anillo, de acuerdo a lo especificado en la norma UNE 83362 garantizando en todos los casos la habilidad de paso del hormigón.

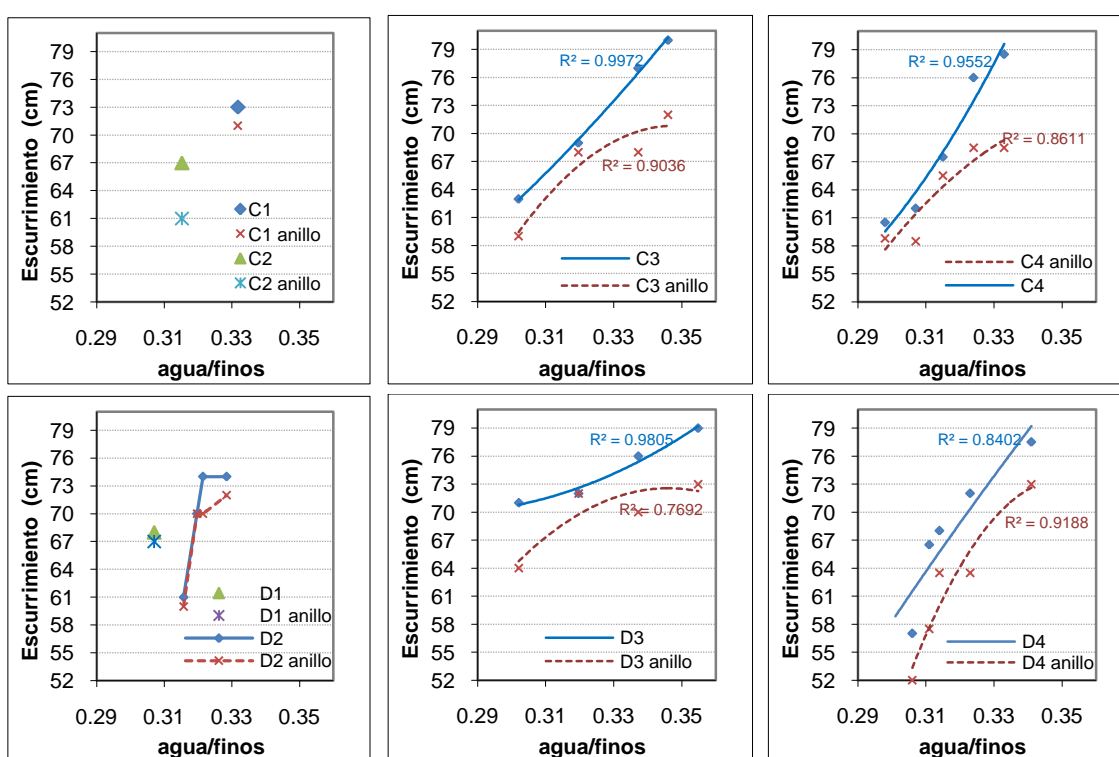


Figura 4.7 –Resultado del ensayo de escurrimiento con y sin anillo.

En dicha figura se pone de manifiesto que la diferencia entre los ensayos con y sin anillo no es significativa en ninguna de las series. Los valores se presentan correlacionados por una regresión lineal por el método de los mínimos cuadrados, cuyo coeficiente de correlación se presenta en cada una de las series. En las series C1, C2 y D2 se ha realizado solo un ensayo de escurrimiento con anillo por lo que no se presenta la regresión. En la serie D2 se observa que hay un cambio muy marcado de tendencias que corresponde a las dos fases comentadas en el apartado 4.2.4, relativas a valores bajos y altos de la relación agua/finos.

Por otra parte, en las series C3, C4, D3 y D4 se observa que hay una zona en que la diferencia entre los dos ensayos es mínima y que dicha diferencia se incrementa para relaciones agua/finos mayores o menores a ella. Ello indica que la relación agua/finos en esta zona hace que el hormigón sea capaz de fluir de forma muy similar con o sin la presencia de obstáculos (barras del anillo en el caso del ensayo o la propia armadura en casos de aplicación real).

En esta relación si se considera que la variable es el contenido de agua, ya que los finos vienen dados por el esqueleto granular, se puede concluir que existe una determinada cantidad de agua para obtener dichos parámetros. Es decir, si la cantidad de agua es menor a ella, el hormigón presentará una reducción en la fluidez con posibilidad de ocasionar bloqueo en zonas densamente armadas; por otro lado si la cantidad de agua es más elevada que ella existe la posibilidad de ocasionar bloqueo de los áridos en zonas armadas debido a la segregación.

#### 4.2.7. Aire Ocluido y Densidad

En la figura 4.8 se presentan los valores obtenidos el ensayo de aire ocluido y de densidad en fresco en función del escurrimiento.

En cuanto al **aire ocluido**, se puede observar que todas las series presentan el mismo comportamiento, aunque con pequeñas variaciones, con valores en todos los casos inferiores al 3%. Para un mayor escurrimiento, se obtiene una menor cantidad de aire ocluido.

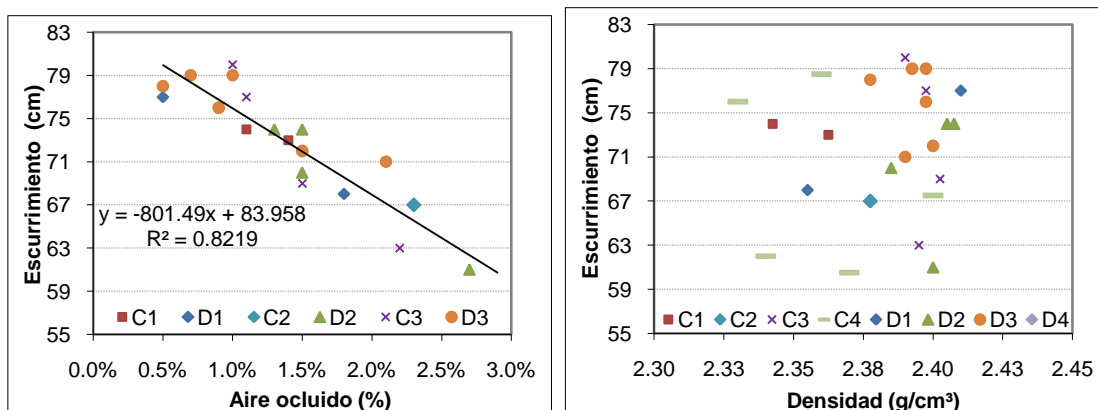


Figura 4.8 – Resultados de aire ocluido y densidad.

Este comportamiento se justifica por el hecho de que cuanto más fluido sea el hormigón (debido únicamente a cambios del contenido de agua), este presenta una menor capacidad de mantener el aire atrapado, en consecuencia presentará menos

aire ocluido. En los ensayos realizados se observa que de modo general para un incremento de 8 cm en el escurrimiento, el hormigón pierde 1% de aire ocluido.

En cuanto a los valores de la **densidad del hormigón fresco**, se observan pequeñas diferencias entre las series, con valores en el intervalo de 2,330 a 2,408 kg/m<sup>3</sup>, aunque se tratan de distintas dosificaciones. Estas variaciones son fruto, tanto de la propia dosificación como de la variabilidad en la realización de los ensayos y, por lo tanto se puede concluir que los cambios introducidos por ambos esqueletos granulares estudiados no afectan directamente la densidad en fresco del hormigón.

#### 4.2.8. Medidas reológicas (tensión umbral “ $\tau_0$ ” y viscosidad plástica “ $\eta$ ”)

En base a las variaciones de las propiedades en fresco del HAC observadas durante la primera campaña experimental (principalmente los cambios de escurrimiento), se decidió hacer medidas reológicas del HAC.

En este estudio se han realizado en total 10 amasadas, 5 para la dosificación continua C4 (C4\_172; C4\_177; C4\_182; C4\_187 y C4\_192) y 5 para la dosificación discontinua D4 (D4\_172; D4\_175; D4\_177; D4\_182; D4\_192). Para cada una de ellas se ha obtenido una curva de flujo a través del reómetro “BML Viscometer 3”, las cuales se presentan en la figura 4.9.

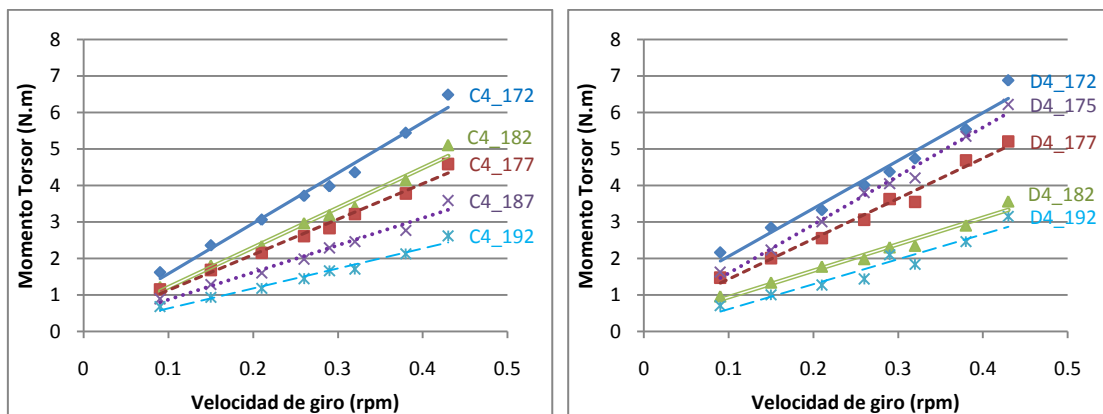


Figura 4.9 – Curvas de flujo medida a través del reómetro “BML Viscometer 3”

A partir de estos pares de valores (momento torsor x velocidad de giro) y de los datos geométricos de los cilindros coaxiales el software del reómetro calcula la tensión umbral y la viscosidad plástica aplicando el modelo de Bingham (ecuación 4.4).

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [4. 4]$$

donde,

$\tau_0$  es la tensión umbral;

$\eta$  es la viscosidad plástica;

$\tau$  es el esfuerzo de corte, definido como la fuerza por unidad de área aplicada;

$\dot{\gamma}$  es la velocidad de corte dada por la variación de la velocidad por unidad de distancia  $h$  entre los dos planos.

Los valores obtenidos para la tensión umbral y viscosidad plástica se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 – Resultados Reológicos– tensión umbral y viscosidad plástica

	C4					D4				
	172	177	182	187	192	172	175	177	182	192
Tensión Umbral (Pa)	14,6	12,4	11,2	11,4	7,9	34,9	8,5	12,2	18,2	3,7
Viscosidad (Pa.s)	103,5	78,0	83,5	52,5	41,0	109,6	104,1	85,3	54,7	47,9

Nielson y Wallevik (2003), utilizando un viscosímetro similar al del presente estudio, sugirieron una zona de autocompactabilidad en el plano de tensión umbral vs viscosidad plástica. La misma se presenta en la Figura 4.10 donde se incluyen los valores medidos experimentalmente en las dosificaciones consideradas en este estudio.

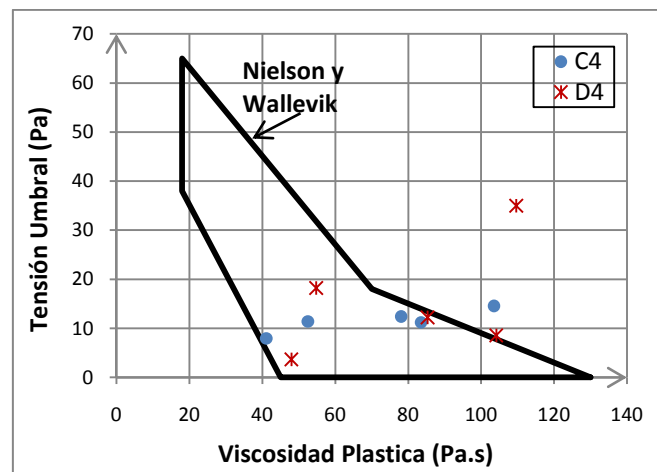


Figura 4.10 – Parámetros reológicos medidos comparados con la propuesta de Nielson y Wallevik (2003)

En general todos los puntos se ubican dentro o próximos a la zona sugerida por Nielson y Wallevik para sus materiales, que implica valores de tensión umbral ( $\tau_0$ ) en el rango aproximado de 0 a 60 Pa y de viscosidad plástica ( $\eta$ ) entre 20 y 120 Pa.s.

El único punto que se aleja de la zona es el D4-172, referente a la relación agua/finos de 0.306 para la dosificación discontinua, o sea la amasada con el menor contenido de agua. Cabe resaltar que el resultado de escurrimiento de esta amasada también se ha alejado del comportamiento de la demás, presentando un menor diámetro de escurrimiento y un mayor tiempo T50, lo que refleja su mayor tensión umbral y también su mayor viscosidad.

Por otra parte, cabe señalar que para garantizar la resistencia a la segregación los hormigones que presenten baja viscosidad plástica deben tener un esfuerzo de corte más elevado, mientras que los hormigones que presenten alta viscosidad plástica deben tener valores de esfuerzo de corte muy bajos.

Ello se constata en la apreciación visual de las amasadas con el mayor contenido de agua (independiente del tipo de esqueleto granular), que han presentado principios de segregación. Aunque los valores de " $\tau_0$ " y " $\eta$ " se encuentren en el área de autocompactabilidad propuesta, estas amasadas presentaron valores bajos de tensión umbral ( $\tau_0$ ) para valores bajos de viscosidad plástica, si se compara con las demás amasadas.

Ello conduce a considerar que, las amasadas referentes a estos puntos pueden presentar una tendencia de segregación. De hecho, esto se puso de manifiesto al realizar el ensayo de reología en la amasada con D4-192, ya que, el cilindro central del reómetro quedó bloqueado por una tongada de áridos situada en la parte inferior del recipiente de hormigón en el momento de su inserción en la masa del hormigón.

La dosificación discontinua D4 presentó tres puntos intermedios (D4-175, D4-177 y D4-182) con una buena correlación en función del contenido de agua, es decir, para mayores contenidos de agua, menor viscosidad plástica y mayor tensión umbral.

La dosificación continua C4 presentó valores equivalentes de tensión umbral para diferentes viscosidades plásticas. Estos valores son aceptables y muestran que la tensión umbral de este esqueleto granular (continuo) es menos sensible a las variaciones del contenido de agua que la tensión umbral del esqueleto discontinuo.

Para la dosificación continua, esto se puede explicar considerando que la contribución del esqueleto granular (debido a su mayor compacidad) en el comportamiento de la tensión umbral predomina sobre la pasta de cemento. Es decir, al modificarse el contenido de agua se modifica el comportamiento de la pasta, que influye en menor proporción en la tensión umbral.

Por otro lado, ambas dosificaciones presentaron alteraciones considerables en la viscosidad plástica debido a los cambios de agua, lo que era esperado ya que la viscosidad del hormigón se rige por la viscosidad de la pasta, que se altera con los cambios del contenido de agua.

#### 4.2.9. Correlaciones de los resultados reológicos con el escurrimiento

En este apartado se analiza la relación entre los parámetros reológicos y los valores medidos en el ensayo de escurrimiento en las series C4 y D4.

En la Figura 4.11a se representan los valores del escurrimiento en función de la tensión umbral, mientras que en la Figura 4.11b se muestran los valores del escurrimiento en función de la viscosidad plástica. En la citada figura puede verse que ambas dosificaciones presentan comportamientos similares, es decir un mayor escurrimiento ocurre en las series con menor tensión umbral y menor viscosidad.

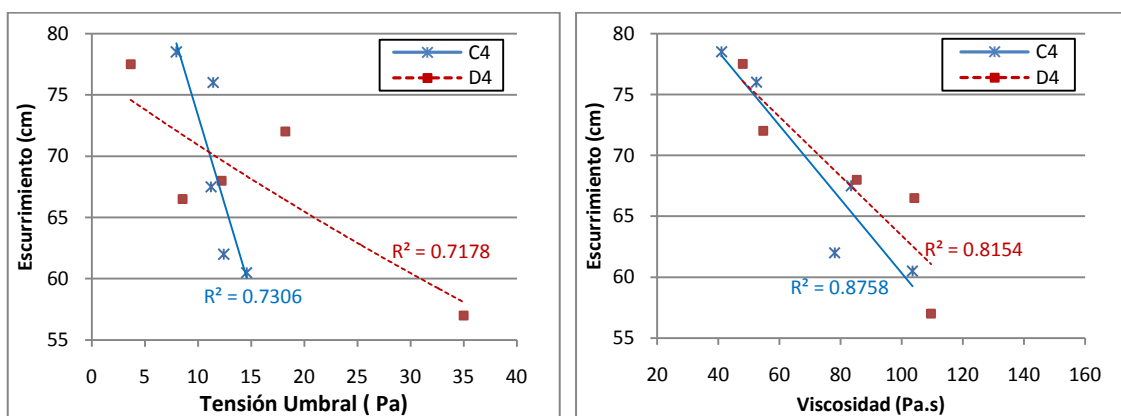


Figura 4.11 – Ecurrimiento en función de: a) Tensión umbral b) Viscosidad Plástica.

Ello indica que el escurrimiento depende tanto de la tensión umbral como de la viscosidad plástica. Es decir, al aumentar el contenido de agua se aumenta el escurrimiento, disminuyendo la viscosidad plástica (figura 4.11b), y, para evitar la segregación es necesario un incremento en el “ $\tau_0$ ”. Es decir, en la zona de mayor estabilidad (relaciones agua/finos intermedias), el comportamiento del escurrimiento está gobernado por la viscosidad plástica. En las zonas extremas, tanto para altas relaciones agua/finos como para bajas, la tensión umbral influye de forma más significativa en el valor del escurrimiento.

En el caso de la dosificación C4 que no presentó alteraciones significativas de “ $\tau_0$ ”, los cambios en el escurrimiento son función de los cambios de viscosidad. En el

ensayo de escurrimiento de las series C4 y D4, además del diámetro se ha medido el T50 – tiempo necesario para que el hormigón alcance el diámetro de 50 cm. En relación a los resultados se puede concluir que el T50 es mayor para hormigones con mayor cohesión, es decir que presentan un menor diámetro final. En la figura 4.12 se observa la influencia en el T50 de la tensión umbral y de la viscosidad.

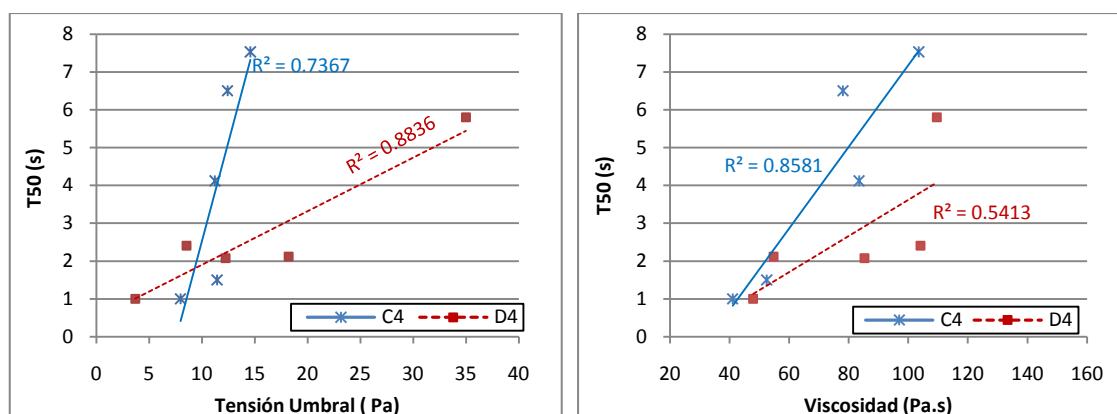


Figura 4.12 – T50 en función de: a) Tensión umbral b) Viscosidad Plástica.

En primer lugar hay que resaltar que, tal como señalan Utsi et al. (2003), existe una cierta dificultad en medir con precisión los tiempos durante el procedimiento. Esto ocurre, principalmente, al realizar los ensayos con la serie D4, que presentó tres amasadas con valores de tiempo del orden de los 2 segundos, pero que se considera que no hay precisión suficiente para discriminar las décimas de segundo.

De modo general se puede observar que tiempos mayores se traducen en tensiones de corte y viscosidad mayores. Por otro lado, nuevamente se debe resaltar el comportamiento de las tres amasadas con T50 del orden de 2 segundos, aunque se considere una posible falta de precisión en la medida de las décimas de segundo, de un modo general las tres amasadas presentaron tiempos del mismo orden de magnitud. Con lo que se concluye que existe un equilibrio entre la tensión umbral y la viscosidad plástica en estos casos. Es decir, al añadir agua, se disminuye la viscosidad y se aumenta la tensión umbral (para mantener la estabilidad), consecuentemente el tiempo medido no presenta cambios.

#### 4.2.10. Resultados de resistencia a compresión

En este apartado se presentan los resultados del ensayo de resistencia a compresión de las distintas series estudiadas, utilizado como referencia del estado endurecido frente a los cambios realizados en estado fresco.

Para el ensayo de resistencia a compresión se han tomado diferentes edades con el objetivo de verificar la evolución de la resistencia en función del esqueleto granular (3, 7 y 28 días), cuyos resultados se han presentado anteriormente en la Tabla 4.2.

La evolución de la resistencia a compresión en el tiempo ha sido muy similar entre los dos tipos de dosificación para series equivalentes, C1-D1, C2-D2, C3-D3, por ello en la figura 4.13 se presenta de forma grafica sólo los resultados a 28 días para todas las series.

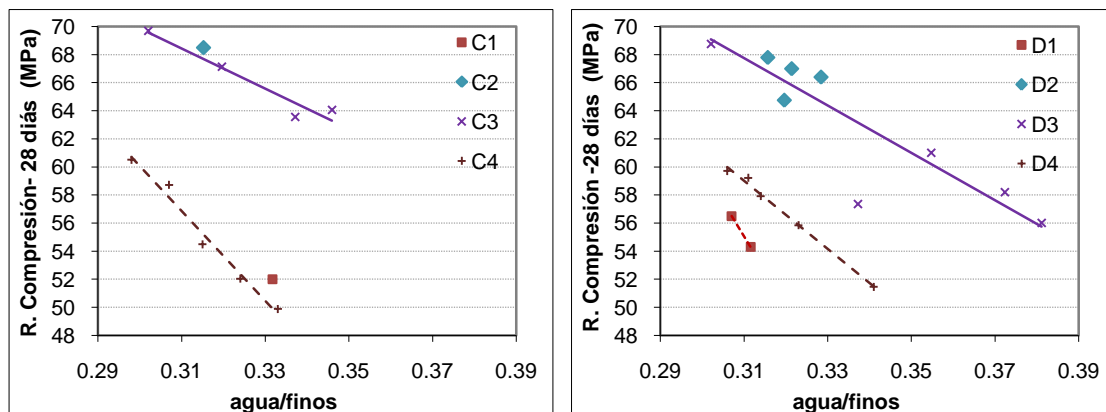


Figura 4.13 – Resistencia a compresión 28 días: a) Dosif. continua b) Dosif. discontinua

En ella, se puede observar la tendencia similar del comportamiento en fresco respecto a la sensibilidad al agua en el hormigón endurecido. Para una mayor cantidad de agua, menor resistencia, mientras que, por el contrario, a menor cantidad de agua mayor resistencia.

En dicha figura se nota que las series C1, C4, D1 y D4 presentaron valores más bajos de resistencia que las demás series; esto se debe por un lado que las series C1 y D1 poseen un esqueleto granular ligeramente distinto de las demás; mientras que por otro lado, las series C4 y D4 han sido desarrolladas en la tercera campaña experimental en las instalaciones de la UPC en amasadas de menores dimensiones. Estos cambios de instalaciones, de operarios y de esqueleto granular pueden alterar el valor de la resistencia a compresión, así como la diferencia de las cámaras de curado.

De todos modos, si se compara series de distintos esqueletos granulares realizadas con los mismos procedimientos, se observan que valores de resistencia a compresión son muy similares, como se muestra en la figura 4.14.



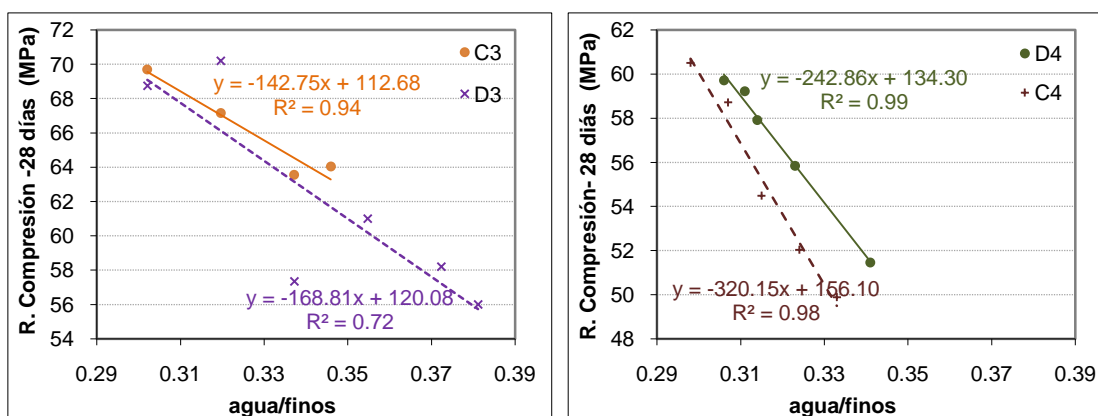


Figura 4.14 – Resistencia a compresión 28 días: a) C3xD3 b) C4xD4

Ello redonda en que las propiedades del HAC fresco son muy sensibles a factores externos (temperatura, humedad del aire, etc.), que no afectan de forma significativa la resistencia del hormigón. No obstante, hay que resaltar que las propiedades en fresco pueden comprometer la buena ejecución durante el hormigonado y la puesta en obra, afectando así, la resistencia final del elemento de hormigón.

#### 4.3. MODELO TEÓRICO

Fruto del estudio del comportamiento del HAC en estado fresco se plantea una aproximación matemática para estimar el valor del escurrimiento en función de las características específicas de cada dosificación.

El modelo teórico que se propone se basa en la hipótesis de que las diferentes curvas obtenidas en el ensayo de escurrimiento presentan un mismo modelo de comportamiento, que obedece una ley exponencial. Los diferentes aspectos físicos de cada serie afectan las diferentes variables de la ecuación, dando un sentido físico a cada caso.

##### 4.3.1. Bases de partida y ecuación del modelo

La función exponencial utilizada en este modelo, es la misma que se ha utilizado en otros casos de estudio en la Universidad Politécnica de Catalunya, como por ejemplo la ecuación constitutiva de un hormigón con fibras (Laranjeira, 2010) o bien, la ecuación utilizada para predecir los movimientos remanentes de presas de hormigón afectadas por problemas expansivos (Serafim, 2008) así como, la ecuación que define los parámetros de un indicador en el análisis de valor de una carretera

(Villegas, 2009). Sin embargo, para un caso similar a este último Pulido (2008) ha empleado una solución matemática diferente.

Para representar el comportamiento del ensayo de escurrimiento ( $y$ ), en función de las variaciones del contenido de agua, se ha decidido utilizar la relación agua/finos en el eje de las abscisas ( $x$ ), de modo que permita una comparación entre las distintas dosificaciones. La ecuación utilizada en el modelo (ecuación 4.5) está dada por la relación:

$$y = A + (B - A) \cdot \left[ 1 - e^{-k \cdot \left(\frac{x}{C}\right)^n} \right] \quad [4.5]$$

donde, cada una de las variables tiene el sentido ingenieril que se explica a continuación, sin que ello pretenda representar una solución exacta de tipo matemático:

- A es el valor de la ordenada (escurrimiento) en el origen. Este valor viene a representar la medida del ensayo de escurrimiento que se produciría sólo con el árido; esto es, el talud natural que daría lugar a un diámetro del material seco.
- B es el valor máximo obtenido en el ensayo cuando se aporta la máxima cantidad de agua (inicio de la segregación)
- C representa en cierta medida la abscisa del punto de inflexión de la curva, (cuyo sentido ingenieril se explica en detalle en el apartado 4.4.4).
- k está relacionada con la ordenada del punto de inflexión.
- n controla la pendiente en el punto de inflexión, está relacionado con la robustez del HAC y depende del esqueleto granular y de la cantidad de pasta.

Los parámetros de la ecuación se visualizan en la curva de referencia dada en la figura 4.14. En ella se puede observar la existencia de las dos fases indicadas en el apartado 4.3.2; una primera fase donde los valores de escurrimiento crecen a medida que aumenta la relación agua/finos y, una segunda fase en la que prácticamente esas medidas no aumentan.

En la citada figura 4.14, en el hipotético caso de que a la mezcla no se aportase agua, el escurrimiento sería la resultante del ángulo del talud natural de los

áridos (teórico). Si, a partir de ahí, se incrementa el agua, el valor de ese ángulo irá bajando como consecuencia de la mayor lubricación, por lo que la extensión de flujo irá creciendo, inicialmente de forma muy suave, ya que no hay la suficiente agua, para con posterioridad, incrementarse de forma significativa al incorporar el efecto de la pasta en la lubricación.

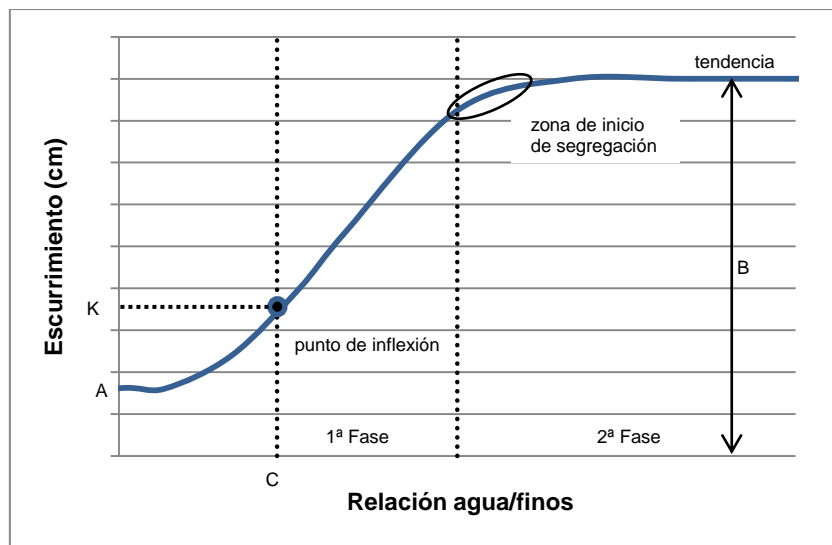


Figura 4.15 – Influencia de la relación agua/finos en el escurrimiento.

#### 4.3.2. El parámetro A

El parámetro A es un valor teórico ya que el ensayo de escurrimiento nunca presentará un valor nulo. Este parámetro viene a representar la extensión de flujo para una dosificación sin agua (agua/finos = 0), o sea, es la extensión originada por el talud natural de los áridos del esqueleto granular. Los ángulos previsiblemente estarán situados entre 30 y 40°, considerando que la dosificación continua se puede relacionar con taludes más inclinados (40°) pues presenta una mayor compacidad y engranamiento de los áridos, mientras que la dosificación discontinua se sitúa en la zona de taludes naturales menos inclinados (30°). En consecuencia de ello los valores medios calculados de A son 36,4 cm para las dosificaciones continuas y 41,24 cm para las dosificaciones discontinuas.

#### 4.3.3. El parámetro B

El parámetro B de la ecuación representa el valor máximo que se obtiene entre los resultados del ensayo de escurrimiento realizados con distintos contenidos de

agua. Este valor debe ser función, principalmente, del aditivo que se utilice y del esqueleto granular.

Si se considera el modelo del cono propuesto en el apartado 4.3.3, el parámetro B se puede relacionar con la altura del cono formado mediante la función, dada por la ecuación 4.6.

$$B = 145 \cdot \alpha \cdot h^{-0.5} \quad [4. 6]$$

donde:

$\alpha$  representa la influencia del aditivo; será igual a 1 ( $\alpha = 1$ ) en el caso de que se incorpore aditivos con efectos cohesionantes y será menor que 1 ( $\alpha < 1$ ) en el caso de aditivos sin efectos cohesionantes.

$h$  es la altura mínima del centro del cono, según la ecuación 4.1.

El coeficiente 145 en la ecuación 4.6 representa el resultado de una simplificación de las constantes presentes en ecuación del volumen del cono, como se expresa en la ecuación 4.7.

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h \quad \therefore D = \sqrt{\frac{12 \cdot V}{\pi \cdot h}} \quad \therefore D = 145 \cdot \sqrt{\frac{1}{h}} \quad [4. 7]$$

donde,

V es el volumen del cono, en el caso del ensayo de escurrimiento es igual a 5,498 litros.

D es el diámetro final del cono formado en el ensayo de escurrimiento,

h es la altura central del cono formado en el ensayo de escurrimiento.

Sustituyendo la ecuación 4.1 en la ecuación 4.6, se obtiene:

$$B = 145 \cdot \alpha \cdot \left[ \sum (t_{M\acute{A}X} \text{ tama\~{n}os de \acute{a}ridos} + 0,5 \text{ mm} \cdot n^{\circ} \text{ de tama\~{n}os de \acute{a}ridos}) \right]^{-0.5} \quad [4. 8]$$

A modo de ejemplo, si se hace variar sólo los valores del parámetro B en la ecuación del modelo (ecuación 4.5), manteniendo constante los otros parámetros, se obtendrían los resultados expuestos en la figura 4.16.

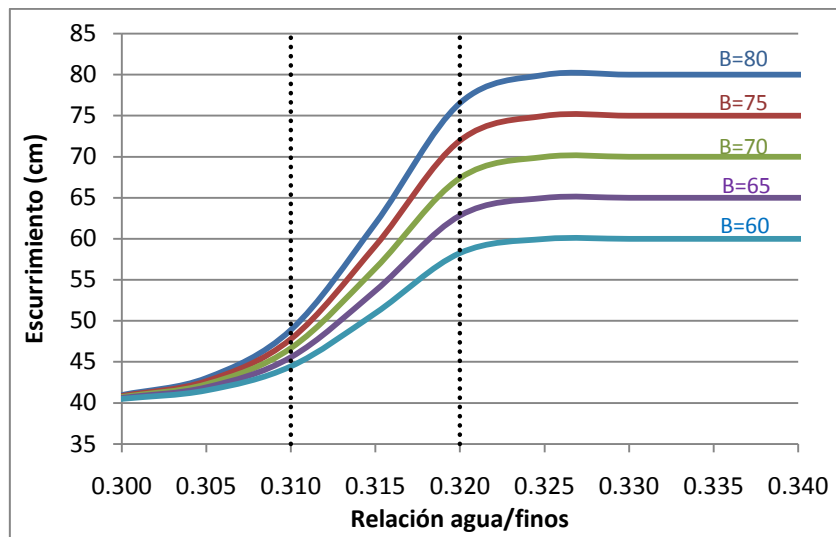


Figura 4.16 – Escurrimiento x relación agua/finos para diferentes valores de B.

Al analizar dicha figura, se deduce que el parámetro B influye en el comportamiento de la curva en la primera fase debido a los cambios en la inclinación de la recta. Es decir, una dosificación que presenta una mayor capacidad de escurrir (mayor B), sufre mayor sensibilidad a pequeños cambios del contenido de agua.

A modo de ejemplo se comparan dos diferentes dosificaciones donde la única variable es el parámetro B (B=60 y B=80). De acuerdo con la figura 4.16, para un cambio en el contenido de agua que ocasiona un cambio de la relación agua/finos de 0,310 a 0,320 (equivalente a 5,5 litros de agua para un contenido de finos de 550 kg/m<sup>3</sup>) los valores de escurrimiento se incrementan más rápidamente la dosificación con B=80.

#### 4.3.4. Los parámetros C y k

Los parámetros C y k están relacionados con el punto de inflexión de la curva, ya que se relacionan respectivamente con la ordenada y la abscisa de este punto. Para definir estos parámetros es necesario dar un sentido al punto de inflexión.

El punto de inflexión es un punto donde los valores de la variable de una función continua pasan de un tipo de concavidad a otro. Matemáticamente la derivada segunda de la función en el punto de inflexión es nula. En el presente caso de estudio, el punto de inflexión define el inicio de la primera fase representada en la figura 4.14, asociada a la fase donde el HAC está estable. Además, este representa el resultado del ensayo de escurrimiento con la menor relación agua/finos posible para obtenerse un HAC.

A modo de ejemplo, si se hace variar sólo los valores de  $k$ , manteniendo constante los otros parámetros se obtienen los resultados expuestos en la figura 4.17.

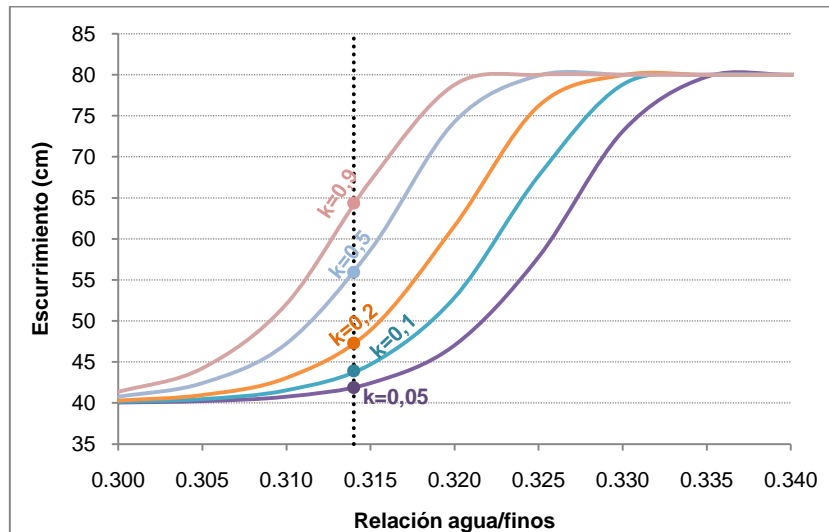


Figura 4.17 – Ecurrimiento x relación agua/finos para diferentes valores de  $k$ .

En dicha figura se han destacado los puntos de inflexión para las distintas curvas. Se puede apreciar que a medida que  $k$  aumenta, la curva se desplaza hacia la derecha en el eje de las abscisas.

El valor de  $k$  representa de modo absoluto la localización de la ordenada del punto de inflexión entre A y B. Es decir, si  $k=0$ , el punto de inflexión tendrá como ordenada A significando que se podría obtener un HAC para una relación agua/finos nula, por lo tanto de modo práctico  $k$  no puede presentar valor nulo. Por otro lado, si  $k = 1$  la ordenada del punto de inflexión estaría situada sobre B (el valor máximo del ensayo de escurrimiento) esto no tendría sentido físico ya que significaría que no se puede obtener un HAC sin que éste presente segregación. Luego, se puede concluir que el parámetro  $k$  presentará valores entre  $0 < k < 1$  estando definido por el resultado del ensayo de escurrimiento con el menor contenido de agua, según la ecuación 4.9.

$$k = \frac{(D_{\text{MIN}} - A)}{B - A} \quad [4.9]$$

donde,  $D_{\text{MIN}}$  es el resultado de escurrimiento con el menor contenido de agua.

Dado que, como el valor del  $D_{\text{MIN}}$  no se conoce de antemano, se puede estimar en 50 cm, de forma que la ecuación 4.9 puede ser escrita como:

$$k = \frac{50-A}{B-A} \quad [4. 10]$$

Ahora, si de forma similar al caso mostrado en la figura 4.17 hacemos variar sólo los valores del parámetro C, tendríamos los resultados expuestos en la figura 4.18.

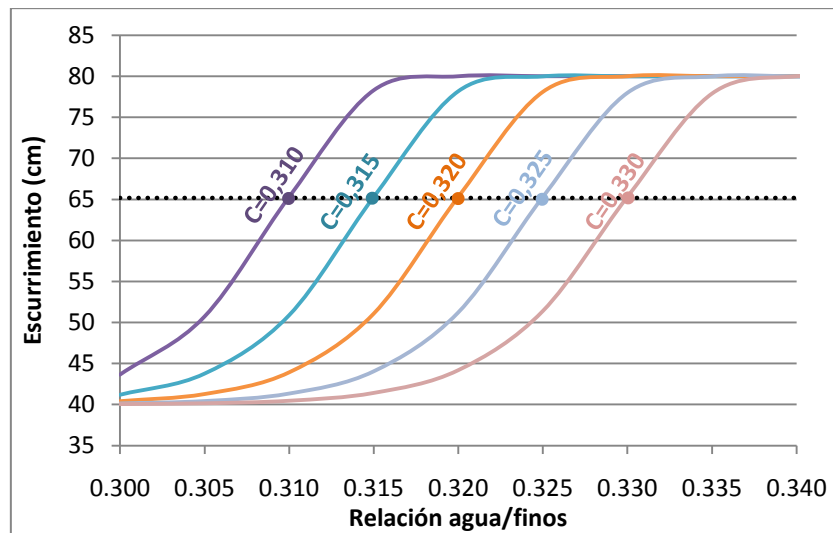


Figura 4.18 –Ecurrimiento x relación agua/finos para diferentes valores de C.

En este caso, al igual que en el anterior se ha destacado los puntos de inflexión para cada curva. A medida que el valor de C aumenta, la curva se desplaza a la derecha en el eje de las abscisas. El valor de C representa la menor relación agua/finos que se obtiene para el HAC estudiado. El valor de C está comprendido entre 0,3 y 0,32; si bien son necesarios más estudios para definirlo de modo más preciso.

De este modo, considerando que el punto de inflexión define el inicio de la primera fase, él representa el valor mínimo a partir del cual se puede obtener un HAC. Sus valores varían entre las distintas dosificaciones ya que está asociado a la capacidad de fluir de una dosificación con una determinada cantidad de agua. Está relacionado de modo indirecto con la cantidad y tipo de: áridos, aditivos empleados, y finos (incluyendo el cemento). Probablemente también se verá afectado por la temperatura ambiente, ya que ésta puede afectar la fluidez del hormigón.

#### 4.3.5. El parámetro n

El parámetro **n** controla la pendiente en el punto de inflexión de la curva. Está relacionado con la robustez del HAC, puesto que para un menor el valor de n, una

alteración en la cantidad de agua del hormigón se traduce en una menor alteración en la fluidez del mismo (representada por el ensayo de escurrimiento).

Si se hace variar los valores del parámetro  $n$ , manteniendo constante los otros parámetros, se obtendrían los resultados de la figura 4.19.

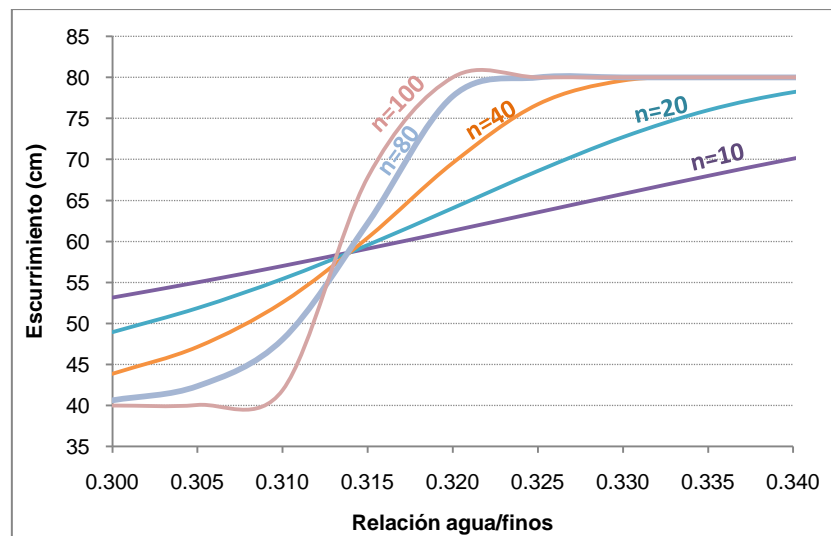


Figura 4.19 –Escurrecimiento x relación agua/finos para diferentes valores de  $n$ .

En ella se puede observar que a medida que  $n$  aumenta, la inclinación de la curva en el tramo intermedio aumenta. De este modo una dosificación que presente mayor sensibilidad a las variaciones del contenido de agua presentará un mayor valor de  $n$ . También se puede observar que un mayor valor de  $n$  conduce a una transición más acentuada a la 2ª fase (figura 4.14) presentando una zona de inicio de segregación más definida.

#### 4.3.6. Aplicación del modelo para predecir escurrimientos

El modelo propuesto tiene como objetivo principal fijar las bases para predecir los escurrimientos antes de realizar los ensayos. Sin embargo, se hace necesarios más estudios experimentales para relacionar los parámetros  $C$ ,  $k$ , y  $n$  con los aspectos físicos de la dosificación; ya que una pequeña variabilidad en ellos altera completamente el resultado. Es por ello que se presenta en el siguiente apartado una contrastación con los resultados experimentales a través de regresión no lineal, para identificar los valores de todos los parámetros del modelo en las dosificaciones estudiadas.



#### 4.3.7. Comprobación a través de regresión no lineal

Para cada serie experimental, los parámetros de la curva (A, B, C, k y n) se obtienen mediante un ajuste basado en el método de los mínimos cuadrados. La utilización de la expresión [4.14] en el ajuste, ha requerido un análisis de regresión no lineal, para lo cual se ha empleado el programa estadístico SPSS–15. Los resultados gráficos de la regresión se muestran en la Figura 4.20.

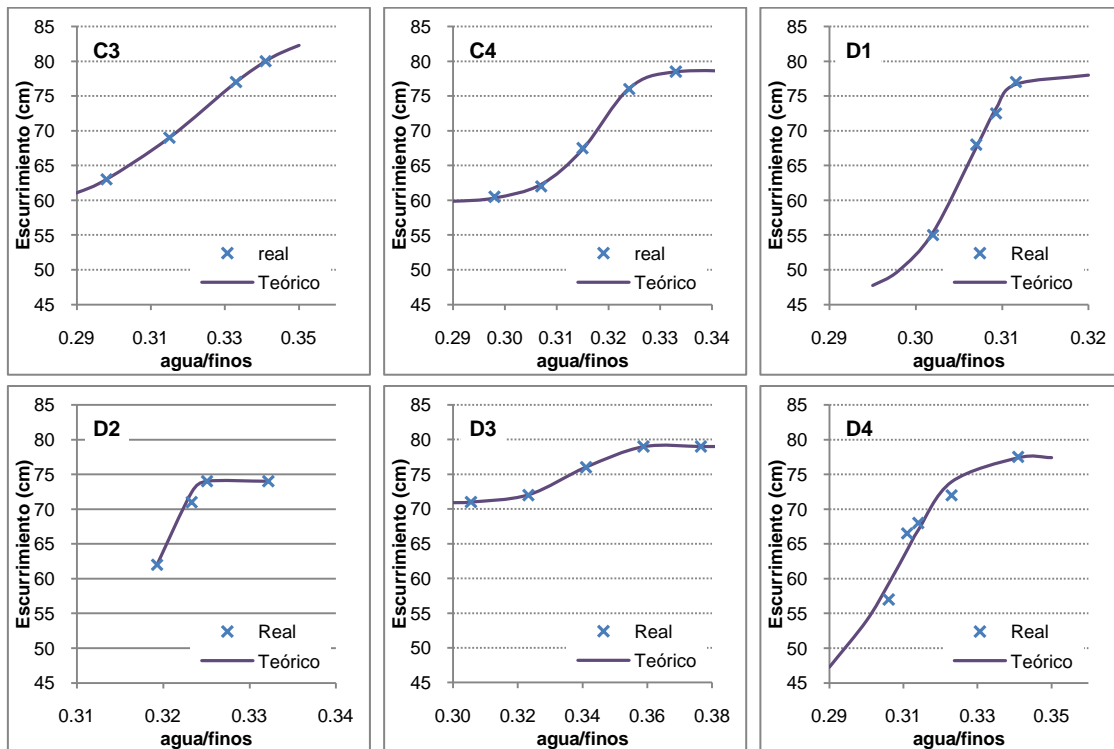


Figura 4.20 – Regresión no lineal de los resultados experimentales.

Se puede observar en dicha figura que la ecuación propuesta se ajusta muy bien a los valores obtenidos experimentalmente, en donde los coeficientes de correlación en todos los casos están por encima de 0,98. Los valores de cada parámetro obtenidos en la regresión se presentan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 – Valores de los parámetros obtenidos por regresión no lineal

Serie	A	B	k	C	n	R <sup>2</sup>
C3	56,7	83,7	0,293	0,300	14,9	0,98
C4	59,7	78,5	0,238	0,310	48,9	0,99
D1	45,6	78,0	0,362	0,302	69,7	0,985
D2	61,8	74,0	0,050	0,320	356,4	0,99
D3	70,8	79,0	0,115	0,320	34,1	0,98
D4	39,5	77,4	0,479	0,300	21,8	0,985

En este análisis no se ha incluido las series C1 y C2 por diferentes motivos. La serie C1 presenta 3 puntos que caracterizan la segunda fase del modelo propuesto, pero no la primera, lo cual no hace posible determinar los parámetros que caracterizan esta curva. En la serie C2 sólo se ha realizado una amasada, o sea un punto, lo que no permite un análisis de comportamiento.

Los valores obtenidos para el parámetro **A** son algo superiores a los previstos. Esto se debe a que no se ha realizado ensayos para bajas relaciones agua/finos para un mejor ajuste del modelo. Por otro lado, los valores obtenidos con excepción de la serie D3, representan valores de escurrimiento por debajo de un límite inferior que se pudiera considerar las dosificaciones estudiadas como autocompactantes. Es decir, el valor del parámetro **A** no representa la medida del ensayo de escurrimiento que se produciría sólo con el árido, pero sí un valor inferior al primer ensayo de escurrimiento considerado como válido. De este modo se puede explicar el valor obtenido para el parámetro **A** en la serie D3, ya que el primer ensayo considerado como válido presentó un escurrimiento de 71 cm. Si en esta serie se hubieron realizado más amasadas con relaciones agua/finos más bajas se podría obtener un mejor ajuste de este parámetro.

Por otra parte, los valores del parámetro **B** se han ajustado muy bien a los previstos, representando el rango máximo de validez del ensayo.

Los parámetros **k**, **C** y **n** están relacionados con el punto de inflexión. Para realizar la regresión, ha sido necesario fijar el valor de **C** para obtener los otros parámetros. Con esto se ha podido observar que si **C** estuviera fuera de su intervalo de validez, la regresión no sería posible. En algunos casos se ha podido alterar el valor de **C** sin que se alterasen los valores de **A**, **B** y **n** dentro de un intervalo de validez (normalmente comprendido entre 0,3 y 0,32). Sólo en la serie D2, al alterar el valor de **C** entre 0,320 y 0,323 se ha variado ligeramente el valor de **n**. Por otro lado, al alterar **C** se alteraba **k**, ya que se está alterando la localización del punto de inflexión sobre la curva. Estas pequeñas variaciones de **C**, asociadas a las variaciones de **k**, no alteran los resultados finales del escurrimiento calculados por la ecuación, y en todos los casos fueron muy similares a los reales.

El valor de **k** está asociado al valor de **C** ya que el primero está relacionado con la ordenada del punto de inflexión y el segundo con la abscisa. El valor de **k** representa de modo absoluto la distancia entre **A** y el punto de inflexión en el eje de las ordenadas, en relación a la distancia entre **A** y **B**.

El valor de  $n$  por otro lado, representa la pendiente de la curva en el punto de inflexión, constituyendo la transición de un estado seco a un HAC. Este valor también puede relacionarse con la robustez de un HAC, puesto que indica cómo influye una alteración en el contenido de agua en el resultado de escurrimiento. Es decir, para valores elevados de  $n$  la transición de fases ocurre de modo brusco y el HAC presenta mayor sensibilidad a los cambios de contenido de agua.

# **CAPÍTULO 5:**

## **PROPIEDADES MECÁNICAS**

### **5.1. INTRODUCCIÓN**

En el capítulo anterior se ha estudiado las propiedades en fresco del hormigón autocompactante en función del esqueleto granular y, del contenido de agua (relación agua/finos) como variables principales. Dando continuidad al estudio, este capítulo se dedica a las principales propiedades en estado endurecido y su evolución en el tiempo; mientras que el comportamiento diferido del hormigón, en términos de retracción y fluencia, se analiza en el capítulo 6.

Un hormigón autocompactante (HAC) se diferencia fundamentalmente por sus propiedades en fresco, si bien para estudiar su comportamiento endurecido pueden emplearse los ensayos normalizados utilizados para el hormigón convencional. Las claves para obtener un HAC radican, usualmente, en un elevado contenido de finos y el empleo de aditivos superplastificantes; estas características pueden influir en su comportamiento en estado endurecido.

Además, el conocimiento de las propiedades del HAC endurecido es fundamental para que los ingenieros estructurales empleen este tipo de hormigón. En este sentido, el objetivo de la campaña experimental de caracterización ha sido estudiar la evolución con la edad (3, 7, 28, 90 y 365 días) de diferentes propiedades estructurales, entre ellas la resistencia a compresión, la resistencia a tracción, el módulo de deformación, y la evolución de la adherencia (3, 7 y 28 días). En este capítulo se exponen y analizan estos resultados contrastando los valores obtenidos para cada tipo de esqueleto granular empleado.

Para el análisis de los resultados de hormigón endurecido se tienen en cuenta las características en estado fresco dado que los cambios en dichas propiedades se traducen también en cambios en las propiedades del estado endurecido.

En primer lugar se expone un resumen de las dosificaciones empleadas y de las probetas confeccionadas para la realización de cada uno de los ensayos propuestos para, a continuación, presentar los resultados en fresco para cada amasada realizada; y finalmente, se analizan cada una de las propiedades en estado endurecido.

## 5.2. DOSIFICACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE ENSAYOS

Para el desarrollo de este estudio, se ha fabricado la cantidad de 3,3 m.<sup>3</sup> de hormigón, dividida en 22 amasadas de 150 litros (2ª campaña experimental). Las dosificaciones empleadas se escriben nuevamente en la Tabla 5.1, de acuerdo con lo expuesto anteriormente en el capítulo 3. Cabe recordar que las dosificaciones continuas (C) se asocian a la puesta en obra a través de un vertido directo (cubilote) mientras que las dosificaciones discontinuas (D) se asocian al bombeo. Asimismo, para cada una de ellas se estudian dos clases de resistencia (30 MPa y 60 MPa), para ello, se ha cambiado el tipo de cemento y se ha sustituido parte del cemento por arena 0–2 en las series de 30 MPa, por lo que no se usa arena 0–2 en las series de 60 MPa.

Para la caracterización en estado fresco se han realizado los ensayos de escurrimiento (UNE 83361:2007), escurrimiento con anillo japonés (UNE 83362:2007), caja en L (UNE 83363:2007), aire ocluido (UNE 12350–7:2001) y, densidad en fresco (UNE 12350–6:2006) como parámetros de referencia de la autocompactabilidad.

Tabla 5.1 – Dosificaciones empleadas (kg/m<sup>3</sup>)

Materiales (kg/m <sup>3</sup> )	C-30	D-30	C-60	D-60
	3/7/2007	25/6/2007	15/6/2007	18/6/2007
Arena 0–2 mm	115	115	—	—
Arena 0–4 mm	876	876	976	926
Garbancillo 5/12 mm	505	168	505	168
Gravilla 12/20 mm	292	674	292	674
Agua	175	182	176,3	182
Plastificante Melcret PF-75	2,7	2,88	2,7	2,7
Superplastif. Glenium C303 SCC	8,73	7,41	8,73	8,73
CEM II A-L 32,5 B-C	380	380	—	—
CEM II A-L 42,5R	—	—	450	450
Relación a/c	0,479	0,479	0,404	0,404

Para la caracterización en estado endurecido ha sido necesaria la fabricación de 420 probetas de diferentes tipos y tamaños, tal como se muestra en la Tabla 5.2. En ella se presenta un resumen de las probetas utilizadas para cada ensayo, así como sus características.

Tabla 5.2 – Resumen de las probetas y sus características

Ensayos		Probetas			
		Tipo		por dosificación	Total
Resistencia a compresión	Evolución de la resistencia 3, 7, 28, 90 y 365 días	Cilíndrica	15 x 30 cm	25	100
		Cúbica	15 x 15 cm	10	40
Módulo de Deformación	Evolución del módulo 3, 7, 28, 90 y 365 días	Cilíndrica	15 x 30 cm	15	60
Flexo-Tracción	Resistencia a flexo-tracción 7 y 28 días	Prismática	15 x 15 x 60 en cm	6	24
Trac. Indirecta (Brasileño)	Evolución de la resistencia 3, 7, 28, 90 y 365 días	Cilíndrica	15 x 30 en cm	10	40
Trac. Indirecta (Barcelona)	Evolución de la resistencia 3, 7, 28, 90 y 365 días	Cilíndrica	15 x 15 cm	25	100
Adherencia "Beam-test"	Evolución de la adherencia 3, 7 y 28 días	Prismática Armada	10 x 18 x 80 en cm	6	24
Retracción	En probetas selladas y no selladas durante 1 año	Cilíndrica	15 x 45 cm	6	24
Fluencia	Probetas bajo carga mantenida durante 1 año	Cilíndrica	15 x 45cm	2	8
<b>Total</b>				105	420

Cabe resaltar que el estudio de la fluencia y retracción se lleva a cabo en el capítulo siguiente (Capítulo 6), si bien todos los procedimientos en fresco se describen en este capítulo ya que las probetas han o confeccionadas en la misma campaña.

Debido al volumen de hormigón necesario, se ha realizado 5 amasadas consecutivas para cada dosificación. Aunque los materiales empleados así como los procedimientos de ensayo han sido los mismos, es importante para el análisis, relacionar cada ensayo con su amasada. Por ello, en la Tabla 5.3 se presenta un resumen de las amasadas correspondientes a la confección de cada tipo de probeta, donde N° es el número de probetas realizadas en cada amasada. La variación del número de probetas que se observa en la dicha tabla es fruto, únicamente, del sistema de gestión del llenado de las probetas y no tiene mayor implicación.

Tabla 5.3 – Resumen de la planificación de probetas por amasada

	1ª amasada		2ª amasada		3ª amasada		4ª amasada		5ª amasada	
	Nº	dimensión	Nº	dimensión	Nº	dimensión	Nº	dimensión	Nº	Dimensión
<b>C30</b>	20	15 x 30	23	15 x 30	7	15 x 30	6	10 x18x60	3	15x15x60
					10	10 x 10				
					24	15 x 15				
<b>D30</b>	18	15 x 30	26	15 x 30	6	15 x 30	17	15 x 15	8	15 x 45
					6	15x15x60				
					7	15 x 15				
<b>C60</b>	22	15 x 30	10	10 x 10	7	15 x 30	6	15x15x60	6	10x18x60
					8	15 x 45				
					12	15 x 15				
<b>D60</b>	22	15 x 30	4	10x18x60	10	10 x10	5	15 x 30	6	15x15x60
					23	15 x30				
					24	15 x 15				

### 5.3. RESULTADOS EN ESTADO FRESCO

En este apartado, se presentan los resultados de los ensayos realizados (escurrimiento, escurrimiento con anillo japonés, Caja en L y finalmente aire ocluido y densidad) en el hormigón fresco para las dosificaciones estudiadas, de acuerdo con la nomenclatura C30, C60, D30 y D60 (C: continua y D: discontinua).

#### 5.3.1. Escurrimiento

Los ensayos de escurrimiento se han realizado en todas las amasadas, y han sido utilizados como parámetro de referencia de la autocompactabilidad. En la Tabla 5.4 se exponen los resultados para cada una de las series, así como se puede ver en las Figura 5.1 y 5.2. En ellas se puede observar que las dosificaciones continuas presentan diámetros mayores en el ensayo de escurrimiento, lo que refleja una mayor facilidad para fluir, lo cual puede deberse a que el esqueleto granular continuo presenta una mayor cantidad de pasta de cemento y arena fina que cubre los áridos

gruesos permitiendo que estos fluyan más fácilmente. Por otro lado, las dosificaciones discontinuas presentan una menor cantidad de pasta y una mayor cantidad de árido grueso, lo que conduce a una mayor trabazón del esqueleto granular, y consecuentemente, a un menor diámetro.

Tabla 5.4 – Resultados de los ensayos de escurrimiento (cm)

series	Amasadas					Promedio	CV
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>		
C30	78,5*	68	70	68	68,5	68,6	1,2%
D30	60	59,5	62,5	66,5	66	63	4,6%
C60	69	70	69,5	50*	61,5*	69,5	0,6%
D60	62	71,5	63	70,5	68,5	67	5,8%

\*valores descartados por el test de Dixon

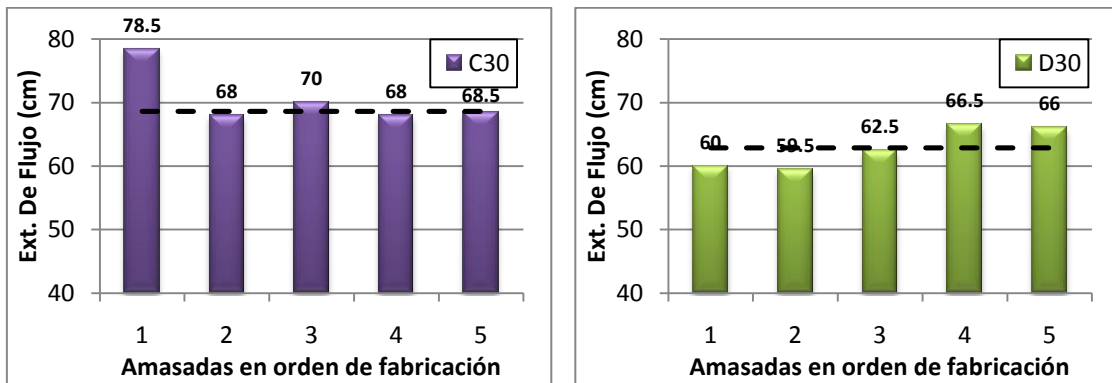


Figura 5.1 – Comparación de los valores de escurrimiento. Series C–30 y D–30.

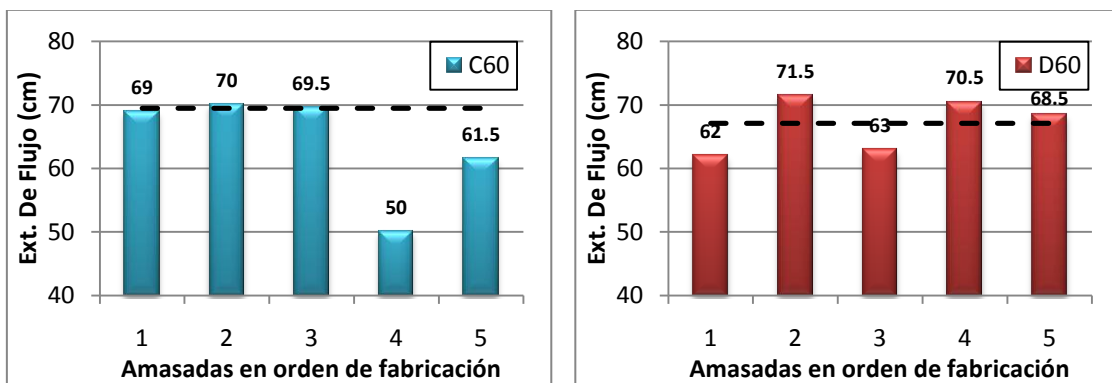


Figura 5.2 – Comparación de los valores de escurrimiento. Series C–60 y D–60.

### Correcciones del contenido de agua

En las series C30 y C60 fue necesario alterar el contenido de agua para ajustar los valores de escurrimiento, es por ello que el contenido de agua de la citada Tabla



5.1 es diferente al contenido teórico de agua previsto en  $182 \text{ l/m}^3$ . En la serie C30, dado que el escurrimiento en la 1ª amasada (78,5 cm) realizada con  $180 \text{ l/m}^3$  de agua fue superior a los valores del rango establecido (60 a 70 cm), se optó por reducir el agua para las siguientes amasadas.

El mismo procedimiento fue empleado para la serie C60, sin embargo en ella se fabricaron dos amasadas anteriores a las presentadas en la anterior tabla 5.4; en las cuales se produjo un error en el pesaje del contenido del cemento, por lo que se invalidaron. Debido a ello, se realizó un nuevo pesaje de los áridos (que estaban almacenados en silos en el interior del laboratorio en PROMSA) y del cemento para la 4ª y 5ª amasadas. Esta diferencia puede explicar el comportamiento distinto de estas amasadas en relación al escurrimiento, aunque no sea lo esperado, ya que todos los áridos pertenecen al mismo silo (ubicado en el interior de laboratorio). Ello indica que los HAC presentan una mayor sensibilidad que los hormigones convencionales, aunque se haya realizado un nivel elevado de control en los procesos de fabricación.

La amasada más crítica de esta serie fue la 4ª, donde se observa una diferencia considerable de escurrimiento con las demás. Con esta amasada se ha moldeado la mitad de las probetas del ensayo Barcelona, y las probetas de flexo-tracción, mientras que la otra mitad de las probetas para el ensayo Barcelona, se ha moldeado en la 3ª amasada. Cabe apuntar la posibilidad de que se haya producido algún error de pesaje en los áridos correspondientes a la 4ª amasada, ya que las probetas fabricadas con esa amasada presentaron resultados inferiores a lo esperado, tal como se comentará en los resultados de este ensayo en los siguientes apartados.

### **5.3.2. Escurrimiento con Anillo Japonés**

Una vez analizados los resultados del ensayo de escurrimiento, se analizan a continuación, los resultados del ensayo de escurrimiento con el anillo japonés. Cabe recordar que, a la diferencia del primero, este ensayo no se realizó en cada una de las amasadas sino solo en una amasada por serie, en general en la 1ª amasada.

Los resultados obtenidos del ensayo se presentan en la Tabla 5.5. y en las figuras 5.3 y 5.4, pudiéndose apreciar que el hormigón ha fluido homogéneamente entre las barras del anillo, sin producirse el bloqueo de los áridos, lo que indica que el armado del anillo no ha afectado de modo alguno al flujo del hormigón.

Tabla 5.5 – Resultados del ensayo de escurrimiento con anillo japonés

	C30	D30	C60	D60
Escorrimento (cm)	68	60	69	62
Esc. con Anillo 1 (cm)	68	56	60	59
Esc. con Anillo 2 (cm)	68	56,5	61	60
<b>Esc. con Anillo media (cm)</b>	<b>68</b>	<b>56,25</b>	<b>60,5</b>	<b>59,5</b>



Figura 5.3 – Ensayo de escurrimiento con anillo, en hormigones de 30 MPa: a) C30 y b) D30



Figura 5.4 – Ensayo de escurrimiento con anillo, en hormigones de 60 MPa: a) C60 y b) D60

En las series de **baja resistencia** (30 MPa), la dosificación continua (C–30) presentó mejor habilidad de paso que la dosificación discontinua (D–30). En la C30 se ha realizado el ensayo de escurrimiento con anillo en la segunda amasada, ya que se ha cambiado el contenido de agua en relación a la primera amasada debido a un valor elevado del ensayo de escurrimiento. Por otro lado, en las series de **alta resistencia** (60 MPa), el comportamiento es el inverso ya que, la dosificación discontinua (D60) presenta mejor habilidad de paso aunque con menor diámetro de flujo. La pérdida de diámetros entre el ensayo con anillo respecto al ensayo realizado sin anillo fue solo de 2,5 cm para la serie D60, frente una pérdida de 8,5 cm., en la dosificación continua.

Por otro lado, no se observó bloqueo de áridos gruesos entre las barras del anillo para la serie C60, aunque la misma presenta una cierta reducción de diámetro. En su momento el resultado se consideró aceptable debido a su aspecto visual, aunque puede haber agravado el problema observado en el ensayo de adherencia, descrito en el apartado 3.5.1.

Por otro lado, para la dosificación continua, tanto en la C30 como en la C60, se observan unas rayas en el hormigón detrás de cada barra del anillo, tal como se muestra en las figuras 5.3 y 5.4. Ello indica la forma de “cierre” del hormigón, es decir, en este tipo de dosificación los áridos no vuelven a ocupar el espacio de detrás de la barra del anillo, donde hay una acumulación de pasta. Este comportamiento no se observa en las dosificaciones discontinuas.

De lo anterior, se puede derivar que, el esqueleto granular continuo necesita una distancia mayor que el esqueleto discontinuo (aproximadamente 5 cm) tras un obstáculo (en este caso la barra del anillo) para volverse a “cerrar” de forma homogénea.

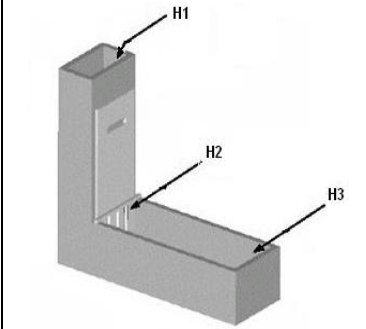
### 5.3.3. Caja L

El ensayo de la caja en L, tiene como objetivo, valorar la habilidad de paso del HAC entre el armado, y se ha realizado en una sola amasada, generalmente en la primera (excepto en la C30 que ha sido en la 3ª amasada). Los resultados de este ensayo se presentan en la Tabla 5.6, en la que se muestra las 3 medidas de alturas consideradas (H1, H2 y H3) y la medida de tiempo correspondiente a descargar la masa de hormigón de la columna. Según la UNE 83663:2007 se debe calcular la relación  $H3/H1$ , pero la misma normativa no establece ningún rango de valores aceptables para el ensayo, por ello, para evaluar dichos resultados, *BIBM et al. (2005)* consideran como mínima una relación  $H3/H1$  igual o superior a 0,75.

En primer lugar se observa que las dosificaciones continuas (C30 y C60) fluyen más (Menor H1 y H2 o bien mayor H3) que las dosificaciones discontinuas (D30 y D60) y tardan menos en pasar; lo cual puede ser fruto del mayor contenido de pasta, señalado con anterioridad.

Por otro lado se puede observar que ninguna de las series cumple con la relación  $H3/H1 \geq 0,75$ , estando muy debajo de este valor. Este hecho puede señalar que es un límite muy elevado para el ensayo de la Caja en L y cuestionar la necesidad de modificar el mismo, ya que dichos hormigones eran autocompactantes y no segregados, pasando bien por las armaduras

Tabla 5.6 – Tabla Resumen de los ensayos de Caja L

	Caja L	C30	C60	D30	D60
Tiempo (s)		4,6	3,6	5,5	11,4
H1 (cm)		12	12	14,5	17,5
H2 (cm)		8	7	9,5	9,5
H3 (cm)		6,9	–	5,5	3,8
H2/H1		0,67	0,58	0,66	0,54
H3/H1		0,58	**	0,38	0,22

\*\* valor no medido

Este resultado también podría ser consecuencia de un defecto de fabricación de la caja, resultando en una distribución desigual de las barras, tal como se puede observar en la Figura 5.5. En ella se ilustra la serie D60, la que obtuvo el coeficiente H3/H1 más bajo; y se nota que el bloqueo de los áridos ocurrió en los espacios menores, pero no en los mayores. Hay que resaltar que las dosificaciones discontinuas presentan un mayor contenido de árido 12–20 mm lo que justifica su mayor dificultad de pasar entre las barras del armado, principalmente en las zonas más críticas con menor espaciamiento.

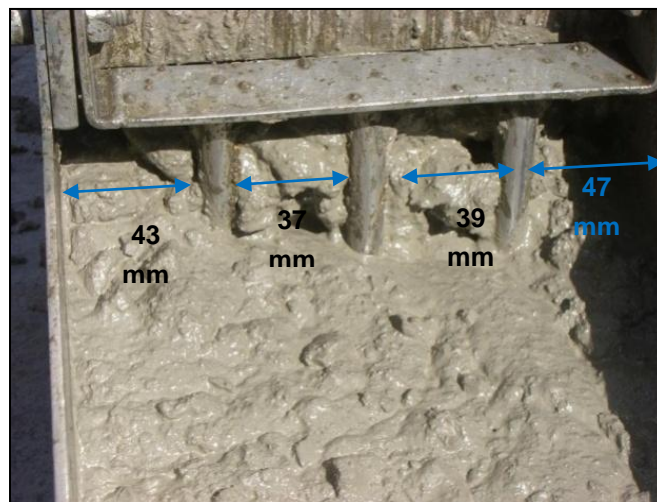


Figura 5.5 – Ensayo de la caja L para el D60.

#### 5.3.4. Densidad y Aire Ocluido

Las medidas de densidad del hormigón fresco y aire ocluido se han tomado en las primeras amasadas de las series C60, D30 y D60, y, en la segunda amasada de la serie C30, debido al elevado valor de extensión de flujo medido en la primera amasada

de dicha serie, tal como ya se ha comentado. Los resultados se muestran en la Tabla 5.7.

*Tabla 5.7 – Tabla Resumen de los ensayos de densidad y aire ocluido.*

	<b>C30</b>	<b>D30</b>	<b>C60</b>	<b>D60</b>
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,27	2,27	2,30	2,29
Aire Ocluido (%)	2,6	2,6	2,4	2,9
Escurrencimiento (cm)	68	60	69	62

Como se puede observar, no existen variaciones significativas de densidad entre las series correspondientes a los diferentes esqueletos granulares. Los valores en el orden de los 2,3 g/cm<sup>3</sup> de estos hormigones se corresponden con el hecho de que tienen mayor cantidad de pasta que un hormigón convencional cuya densidad está en el orden de los 2,4 g/cm<sup>3</sup>.

En cuanto al aire ocluido el resultado es un valor bajo en todos los casos, algo inferior al valor estimado inicialmente de 3% (en base a experiencias previas realizadas en PROMSA), reflejando la relación de que cuanto más fluido un hormigón mayor será la extensión de flujo y menor el contenido de aire ocluido.

#### **5.4. RESULTADOS EN ESTADO ENDURECIDO**

En este apartado, se presentan y analizan los resultados de los ensayos realizados en el hormigón endurecido para las diferentes dosificaciones estudiadas, tal como ya se ha presentado en la anterior Tabla 5.2.

##### **5.4.1. Resistencia a compresión**

En lo que sigue se presentan los resultados de la resistencia a compresión y un análisis de los mismos desde diferentes puntos de vista: influencia del esqueleto granular, laboratorio de ensayo, tipo de probetas y evolución en el tiempo.

##### *Influencia del esqueleto granular*

En primer lugar, en la Tabla 5.8 se presentan, tanto el valor medio (en MPa) como el coeficiente de variación (en %) de los resultados de los ensayos de resistencia a compresión realizados en probetas cilíndricas de 15 x 30 cm tanto en el LTE, como en PROMSA. Los resultados del LTE corresponden a una muestra de 6

probetas para cada serie y edad ya que, las probetas referentes al ensayo del módulo de elasticidad posteriormente también fueron ensayadas a compresión.

Tabla 5.8 – Resistencia a compresión en probetas cilíndricas (LTE)

MPa (C.V.)	3 días		7 días		28 días		90 días		365 días
	LTE	PROMSA	LTE	PROMSA	LTE	PROMSA	LTE	PROMSA	LTE
<b>C30</b>	28,4 (10,0)	32,9 (0,3)	33,6 (6,4)	36,0 (1,7)	42,7 (4,2)	41,0 (2,6)	51,3 (4,2)	48,3 (0,5)	53,7 (2,4)
<b>D30</b>	27,9 (4,5)	29,1 (0,7)	33,9 (2,1)	35,5 (1,7)	40,9 (5,9)	42,7 (1,7)	46,8 (1,7)	46,0 (0,2)	53,3 (1,9)
<b>C60</b>	46,2 (1,7)	43,9 (2,4)	48,8 (9,1)	49,9 (0,0)	63,5 (3,8)	57,0 (1,6)	69,3 (4,3)	68,1 (2,3)	80,0 (2,4)
<b>D60</b>	41,0 (8,4)	42,7 (0,0)	44,9 (9,6)	48,5 (3,3)	54,9 (3,4)	55,7 (0,4)	65,3 (3,9)	67,0 (2,0)	78,9 (1,6)

En la citada tabla puede verse que la dosificación continua presenta mayores resistencias que la dosificación discontinua, siendo esto más significativo a tempranas edades (3 y 7 días, donde las diferencias pueden alcanzar en el entorno del 10 % como máximo. Sin embargo con el tiempo esta diferencia decrece alcanzándose valores muy similares para los 365 días. Cabe llamar la atención sobre que dicho comportamiento es similar en ambas categorías resistentes (30 y 60 MPa).

Las series de baja resistencia denominadas como “30” deberían equivaler a resistencias características ( $f_{ck}$ ) de 30 MPa. Los resultados promedios ( $f_{cm}$ ) observados experimentalmente han sido del orden de los 40 MPa, y calculando el  $f_{ck}$  para cada una se obtiene 30 MPa para la serie C30 y 32 MPa para la serie D30, con lo que se cumple dicho requisito, no siendo así para el caso de la denominada “60”, en lo que se refiere a la edad de 28 días, si bien se cumple para edades posteriores

#### Comparación entre laboratorios

En la Figura 5.6 se muestran los resultados de resistencia a compresión obtenidos en probetas cilíndricas en los dos laboratorios utilizados. En ella se observa que los resultados son similares en ambos laboratorios aunque sean realizados en equipos totalmente distintos (excepto en el caso del C60, donde las diferencias son significativas, en el entorno del 20%). Por otro lado, una revisión más detallada de la tabla 5.8 muestra que los coeficientes de variación, son superiores en el LTE que en el laboratorio de PROMSA, si bien en ambos casos se sitúan en un rango aceptable. Dadas que las diferencias no son relevantes, para las siguientes propiedades se toma

como referencia la resistencia a compresión obtenida en el LTE, de la cual se dispone de una serie más amplia en el tiempo.

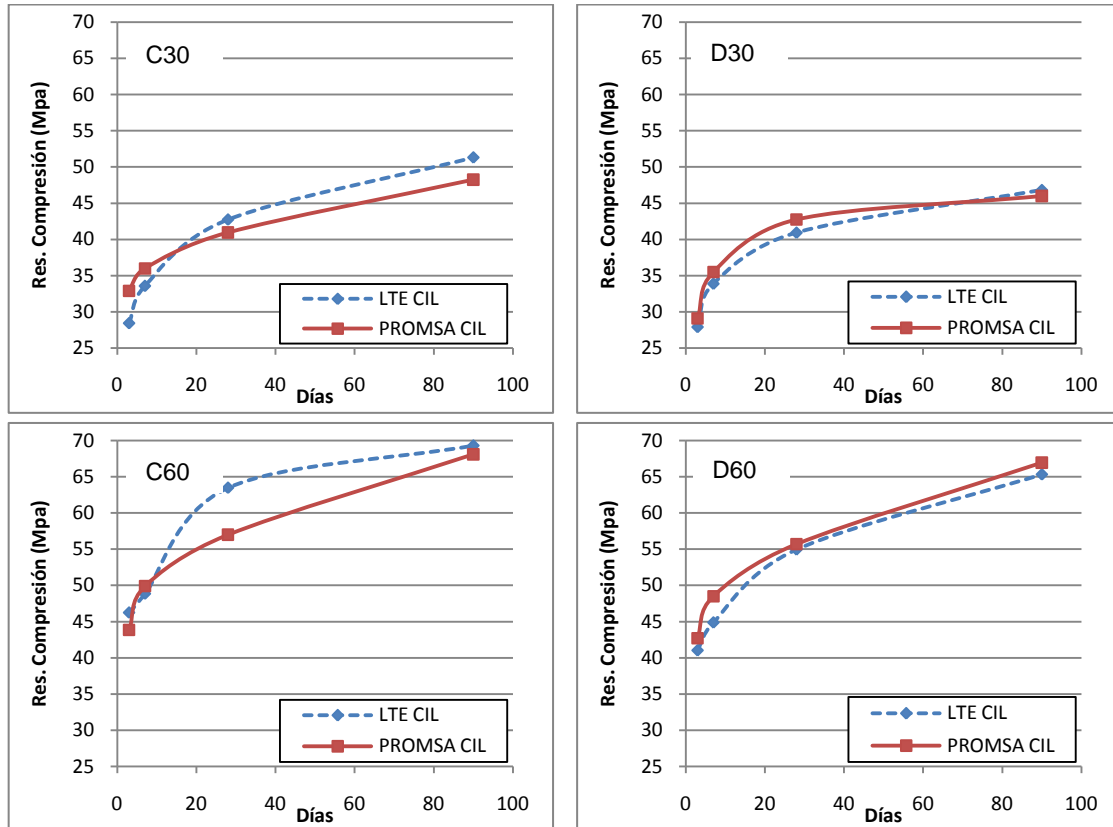


Figura 5.6 –Comparación de resultados de resistencia a compresión entre laboratorios

### Comparación de la forma de las probetas

Además de los valores presentados anteriormente, en PROMSA se han ensayado 2 probetas cúbicas de 10 x 10 x 10 cm por edad, tal como se muestra en la Tabla 5.9. En ella también se presenta el coeficiente de variación de los resultados (C.V.), pudiéndose observar que los valores del mismo son pequeños dentro del rango aceptable de un laboratorio de control.

Por otro lado, también puede verse que la dosificación continua presenta mayores resistencias que la dosificación discontinua, en el entorno del 5%, excepto en la serie 60 MPa a tempranas edades de 3 y 7 días, cuyo comportamiento es el contrario.

Tabla 5.9 – Resistencia a compresión en probetas cúbicas (PROMSA)

MPa (C.V.)	3 días	7 días	28 días	90 días
<b>C30</b>	37,0 (3,0%)	43,8 (1,5%)	52,3 (1,0%)	53,4 (0,8%)
<b>D30</b>	35,9 (2,9%)	40,1 (0,1%)	45,5 (0,6%)	51,5 (0,7%)
<b>C60</b>	49,1 (0,8%)	52,5 (7,1%)	66,4 (1,1%)	76,0 (0,2%)
<b>D60</b>	52,9 (2,5%)	57,0 (3,0%)	64,8 (2,7%)	73,0 (5,7%)

En la Figura 5.7 se presentan los resultados correspondientes a las probetas cilíndricas y cúbicas; pudiéndose ver que las tendencias medidas en ambos tipos de probetas son similares, como era de esperar. Asimismo, se observa que los valores medidos en probetas cúbicas son superiores a los medidos en las probetas cilíndricas para cualquiera de las series, lo cual es conocido y se debe a la diferencia de la distribución de tensiones en función de la geometría y esbeltez de las probetas.

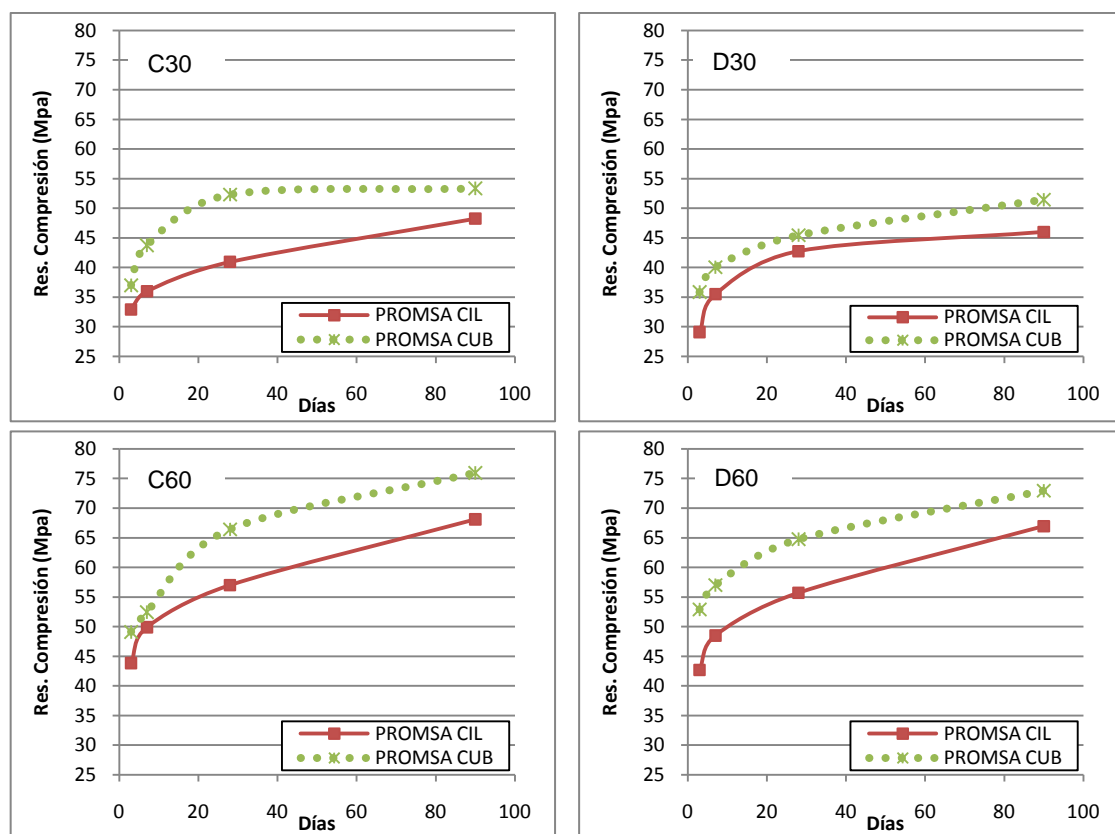


Figura 5.7 – Comparación la forma de la probeta

La influencia de la forma de las probetas se puede identificar mediante una correlación de los resultados. La relación se obtiene dividiendo la resistencia de la



probeta cilíndrica por la resistencia de la probeta cúbica. Estas relaciones se presentan en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10 – Relación entre probetas cilíndricas x cúbicas

	3 días		7 días		28 días		90 días		Promedio	
	PRO*	LTE	PRO*	LTE	PRO*	LTE	PRO*	LTE	PRO* MPa (CV %)	LTE MPa (CV %)
<b>C30</b>	0,89	0,77	0,82	0,77	0,78	0,82	0,90	0,96	<b>0,85</b> (5,80)	<b>0,83</b> (9,60)
<b>D30</b>	0,81	0,78	0,89	0,85	0,94	0,90	0,89	0,91	<b>0,88</b> (5,20)	<b>0,86</b> (6,10)
<b>C60</b>	0,89	0,94	0,95	0,93	0,86	0,96	0,90	0,91	<b>0,90</b> (3,70)	<b>0,94</b> (1,70)
<b>D60</b>	0,81	0,78	0,85	0,79	0,86	0,85	0,92	0,90	<b>0,86</b> (4,60)	<b>0,83</b> (5,80)

PRO\* – Probetas cilíndricas PROMSA/probetas cúbicas PROMSA

LTE – Probetas cilíndricas LTE/probetas cúbicas PROMSA

En ella, se pone de manifiesto que estas relaciones no siguen una tendencia, estando situadas entre 0,83 y 0,94. Se puede observar que los valores extremos son obtenidos para la dosificación continua, mientras la dosificación discontinua ha presentado resultados en las distintas formas de las probetas más similares. La correlación para esta dosificación está situada entre 0,83 y 0,88.

### Influencia del tiempo

El artículo 31.3 del anejo 17 de la EHE–08 sobre el hormigón autocompactante menciona que:

*“La evolución de la resistencia a compresión con el tiempo puede considerarse equivalente a la de un hormigón de compactación convencional. Sin embargo, se deberá tener en cuenta, en algunos casos, la posibilidad de un retraso en la ganancia de resistencia inicial debido a las dosis mayores de aditivos utilizados.”*

La misma instrucción en el citado artículo 31.3 considera que para la evolución de la resistencia de un hormigón de compactación convencional se puede admitir como valores de la resistencia a  $j$  días de edad los calculados por las siguientes relaciones:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad [5. 1]$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left( 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right) \right\} \quad [5. 2]$$

- donde:  $f_{cm}$  Resistencia media a compresión a 28 días  
 $\beta_{cc}$  Coeficiente que depende de la edad del hormigón.  
 $t$  Edad del hormigón en días.  
 $s$  Coeficiente que depende del tipo de cemento:  
= 0,2 para cementos de alta resistencia y endurecimiento rápido (CEM 42,5R, CEM52,5R)  
= 0.25 para para cementos normales y de endurecimiento rápido (CEM 32,5R, CEM 42,5)  
= 0,38 para cementos de endurecimiento lento (CEM 32,25)

El coeficiente  $\beta_{cc}$  representa el porcentaje de la resistencia a 28 días que el hormigón presenta a cada edad que depende únicamente del tipo de cemento. En la tabla 5.11 se presentan los valores de este coeficiente para los hormigones estudiados; también, en la misma tabla se dan los valores del coeficiente  $\beta_{cc}$  real obtenido dividiendo los valores de la resistencia a compresión medida en probetas cilíndricas de LTE, por el valor obtenido a los 28 días.

Tabla 5.11 – Coeficiente  $\beta_{cc}$  para las diferentes edades (en días)

Edad (en días)	3	7	28	90	365
<b>C30</b>	0,73	0,83	1,00	1,19	1,28
<b>D30</b>	0,68	0,83	1,00	1,11	1,27
<b>EHE C30 y D30</b>	0,60	0,78	1,00	1,12	1,20
<b>C60</b>	0,74	0,81	1,00	1,13	1,30
<b>D60</b>	0,76	0,84	1,00	1,20	1,34
<b>EHE C60 y D60</b>	0,66	0,82	1,00	1,09	1,16

En primer lugar, se observa que el esqueleto granular no influye de forma significativa en la tendencia de la evolución de las resistencias. Asimismo, los coeficientes  $\beta_{cc}$  calculados para las series de igual resistencia indican que los HAC presentan una resistencia inicial mayor que la prevista en la EHE, ya que a los 3 días se alcanza en media un 75% de la resistencia a 28 días.

También, el HAC presenta un incremento importante de resistencia de los 28 a los 90 días, llegando a un 30% de incremento al final de un año (365 días). Ello se puede justificar por la mayor cantidad de pasta que asociada a una mayor cantidad de material con mayor finura conduce a una hidratación más lenta del cemento.

Asimismo, hay que recordar que las probetas han sido mantenidas en cámara húmeda hasta la edad del ensayo lo que pudo haber contribuido. En esta misma dirección *Parra et al (2008)*, señalan que el mayor contenido en finos puede ser el responsable de permitir una mayor retención de agua, lo que propicia a medio y largo plazo las reacciones de hidratación del cemento.

#### 5.4.2. Módulo de deformación

Los resultados obtenidos en el LTE para el ensayo del módulo de deformación longitudinal para las diferentes edades se presentan en la Tabla 5.12. El ensayo se ha realizado según la norma UNE 83316:1996, y el resultado se ha obtenido del promedio de 3 probetas por edad.

Tabla 5.12 – Módulo de Deformación del HAC (GPa) a diferentes edades.

MPa (CV)	3 días	7 días	28 días	90 días	365 días
C30	30,5 (2,21%)	32,5 (1,64%)	36,0 (0,94%)	37,0 (2,16%)	37,0 (1,77%)
D30	29,5 (2,61%)	31,5 (2,18%)	34,5 (2,00%)	35,5 (1,28%)	36,5 (2,56%)
C60	35,5 (1,44%)	37,0 (0,02%)	39,5 (0,40%)	41,5 (5,60%)	41,5 (1,46%)
D60	34,0 (2,64%)	36,5 (3,07%)	38,0 (1,67%)	40,5 (3,48%)	41,0 (1,86%)

#### Influencia del esqueleto granular

En dicha tabla se observa que el esqueleto granular continuo presenta valores del módulo de deformación longitudinal ligeramente superiores a los correspondientes al esqueleto granular discontinuo para todas las edades y resistencias. De forma gráfica se muestran los resultados del módulo en la figura 5.8.

El esqueleto granular discontinuo contiene 45 kg/m<sup>3</sup> más de árido grueso que el esqueleto continuo y, dada la incidencia del contenido de gruesos en el módulo de deformación del hormigón, cabría esperar un mayor módulo en el hormigón con esqueleto granular discontinuo frente al continuo. Ello puede responder al hecho de que el empaquetamiento del esqueleto granular continuo proporciona una estructura ligeramente más rígida.

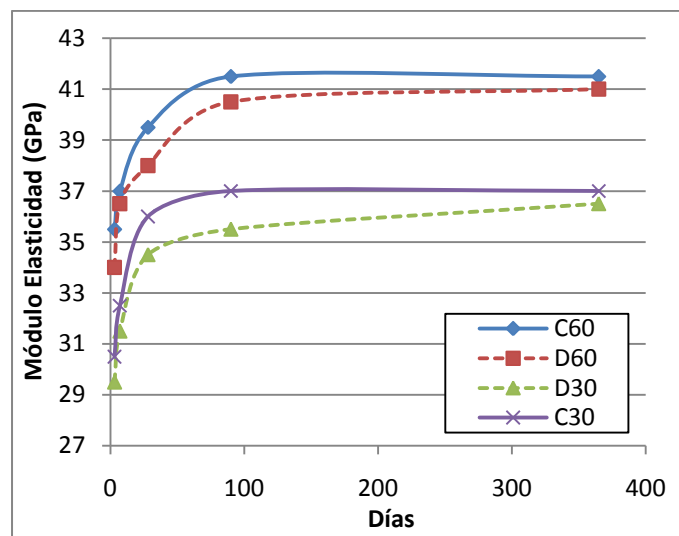


Figura 5.8 – Comparación de los valores de módulo de deformación medidos

#### Comparación con normativas para el hormigón convencional

Para comparar los valores obtenidos con las normativas y códigos de diseño actuales del hormigón se han adoptado como referencia las formulaciones propuestas en las siguientes normativas: Código Modelo CEB–FIP 1990, EHE–08, Eurocódigo 2, y la Norma Brasileira NBR–6118:2003. Las ecuaciones utilizadas se presentan en la Tabla 5.13, habiéndose ajustado los coeficientes de las formulaciones, de modo que todos los valores de módulo de elasticidad sean en MPa.

Tabla 5.13 – Diferentes formulaciones del Módulo de Deformación Secante (MPa)

Norma	Ecuación	Observaciones
CEB–FIP 1990	$E_{ci} = 21500 \cdot \sqrt[3]{0,1 \cdot f_{cm}}$	$f_{cm}$ es la resistencia media a compresión en MPa medida en probetas cilíndricas de 15 x 30 cm.
ACI 318M–05	$E_{cm} = 4700 \cdot \sqrt[2]{f_c'}$	$f_c'$ es la resistencia a compresión MPa medida en probetas cilíndricas de 15 x 30 cm.
EC 2: 1992–1–1	$E_{cm} = 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8}$	$f_{ck}$ es la resistencia característica del hormigón (en MPa) medida en probetas cilíndricas
NBR 6118 2007	$E_{cm} = 5600 \cdot \sqrt[2]{f_{ck}}$	
EHE 2008	$E_{cm} = 8500 \cdot \alpha \cdot \sqrt[3]{f_{cm}}$	“ $\alpha$ ” es un coeficiente corrector del módulo de deformación en función de la naturaleza del árido. ( $\alpha=1,2$ caliza densa). $f_{cm}$ es la resistencia media del hormigón a la edad t (en MPa) medida en probetas cilíndricas

Las formulaciones expuestas en dicha tabla utilizan los valores de resistencia a compresión en probetas cilíndricas de 15 x 30 cm. Para ello, se han utilizado los valores obtenidos experimentalmente en el LTE.

En el modelo del EC2 se ha utilizado el valor de la resistencia medida en el laboratorio para sustituir el parámetro  $(f_{ck} + 8)$ , ya que este representa la resistencia media a los 28 días. El modelo de la EHE considera que si se quiere evaluar el módulo de deformación a edades diferentes a los 28 días, se debe tener en cuenta que su crecimiento con la edad no es igual al que experimenta la resistencia a compresión. De acuerdo con la instrucción una evaluación más precisa se realiza a partir de la siguiente expresión:

$$E_{cm}(t) = \left( \frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,2} \cdot E_{cm} \quad [5. 3]$$

donde los parámetros que en ella figuran tienen el siguiente significado:

- $E_{cm}(t)$  :módulo de deformación secante a los t días.
- $E_{cm}$  :módulo de deformación secante a los 28 días.
- $f_{cm}(t)$  :resistencia media a compresión a los t días
- $f_{cm}$  :resistencia media a compresión a los 28 días

El modelo de la EHE considera la influencia del árido en el módulo de deformación del hormigón, introduciendo coeficientes de acuerdo con la naturaleza del mismo. Para los áridos calizos considera un coeficiente de 1,2 para los densos y 0,9 para los normales. De acuerdo con el Eurocódigo 1, se clasifica como *calizo denso* aquellos áridos cuyo peso específico varía entre 20 y 29 KN/m<sup>3</sup> y *calizo normal* a los que presentan peso específico de 20 KN/m<sup>3</sup>. Los áridos empleados en este estudio presentan una densidad que varía entre 26,7 y 27 KN/m<sup>3</sup> (anejo A). Por ello, se ha adoptado el coeficiente de 1,2 correspondiente a los áridos calizos densos.

En base a dichas formulaciones se han calculado para cada edad y para cada serie los valores del módulo de elasticidad y se han comparado con los valores medidos experimentalmente según se muestra en la Tabla 5.14 y se visualiza en Figura 5.9.

Tabla 5.14 – Módulo de deformación (GPa) - resultados experimentales x distintos códigos

	C30					D30				
	3 d	7 d	28 d	90 d	365d	3 d	7 d	28 d	90 d	365d
<b>Medido</b>	30,5	32,5	36,0	38,0	37,0	29,5	31,5	34,5	35,5	36,5
<b>ACI 318</b>	25,0	27,0	30,5	33,5	34,5	25,0	27,5	30,0	32,0	34,5
<b>CEB</b>	30,0	31,5	33,5	34,0	34,5	29,5	30,5	32,0	33,5	35,0
<b>EC2</b>	31,5	33,0	35,0	37,0	37,5	31,5	33,0	34,5	36,0	37,5
<b>NBR 6118</b>	30,0	32,5	36,5	40,0	41,0	29,5	32,5	36,0	38,5	41,0
<b>EHE-08</b>	31,0	33,0	35,5	38,0	38,5	31,0	33,0	35,0	37,0	38,5

	C60					D60				
	3 d	7 d	28 d	90 d	365d	3 d	7 d	28 d	90 d	365d
<b>Medido</b>	35,5	37,0	39,5	41,5	41,5	34,0	36,5	38,0	40,5	41,0
<b>ACI 318</b>	32,0	33,0	37,5	39,0	42,0	30,0	31,5	35,0	38,0	40,5
<b>CEB</b>	33,0	33,5	36,5	38,0	40,0	33,5	34,5	36,0	37,5	39,0
<b>EC2</b>	36,0	36,5	39,5	40,5	42,0	35,0	35,5	38,0	40,0	41,5
<b>NBR 6118</b>	38,0	39,0	44,5	46,5	50,0	36,0	37,5	41,5	45,5	48,0
<b>EHE-08</b>	36,5	37,5	40,5	42,0	44,0	35,0	36,0	39,0	41,0	43,0

En la Figura 5.9 se observa que los modelos de la EHE-08 y del EC-2 son los que mejor se ajustan a los valores obtenidos experimentalmente, aunque el anejo 17 de la EHE se recomienda prever el módulo del HAC entre un 7% y un 15% menor que el módulo del hormigón convencional.

Por otro lado, se puede notar que la formulación de normativa Brasileña NBR-6118 así como la americana ACI 138 relacionan el modulo con la raíz cuadrada de la resistencia, lo que conduce a un incremento del modulo con la edad superior al observado. Asimismo, los coeficientes multiplicadores en ambas normativas son diferentes lo que hace que la NBR 6118 sobrestime al valor del modulo mientras el ACI 318 lo subestime. Cabe resaltar que las versiones anteriores a la EHE 1998 también consideraban el módulo como raíz cuadrada de la resistencia pero con el desarrollo de hormigones de más elevada resistencia esta formulación se ha ido cambiando con objeto de buscar un mejor ajuste.

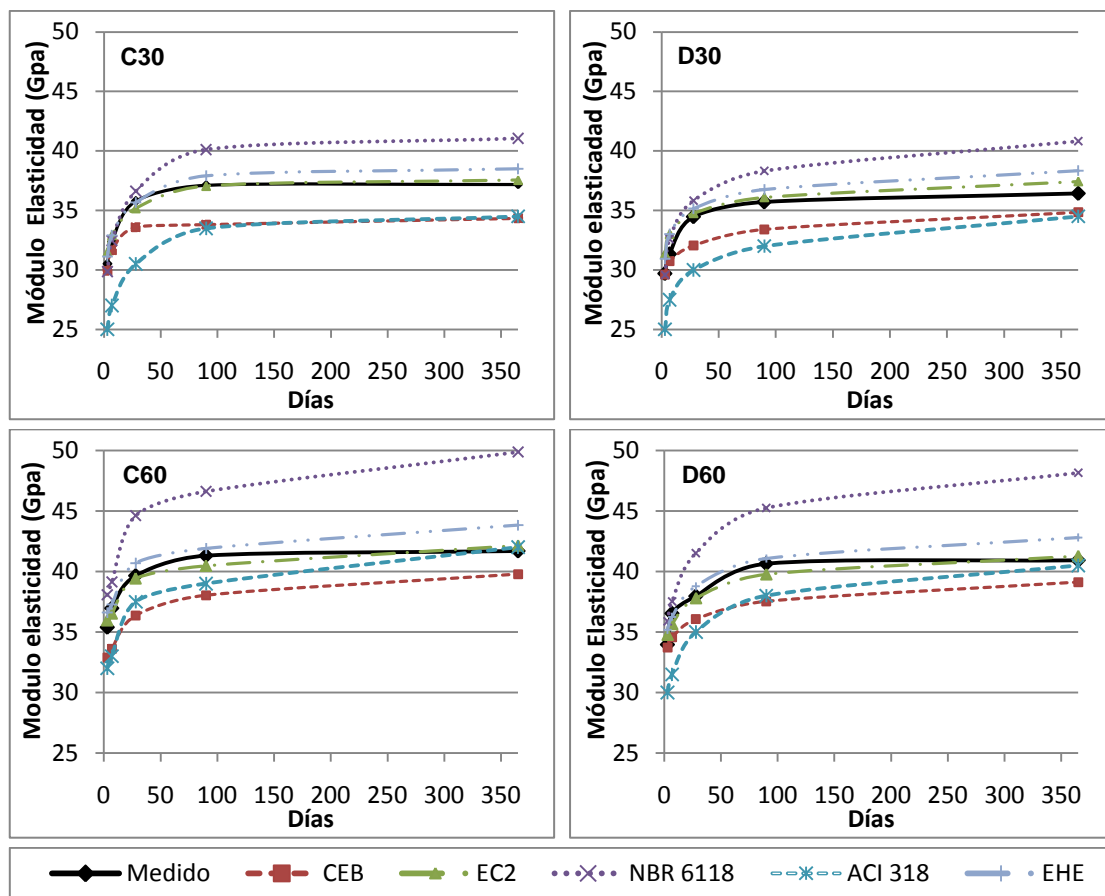


Figura 5.9 – Comparación del módulo de deformación medido con el obtenido mediante distintas formulaciones.

Por otro lado, se puede notar que la formulación de normativa Brasileña NBR-6118 así como la americana ACI 138 relacionan el módulo con la raíz cuadrada de la resistencia, lo que conduce a un incremento del módulo con la edad superior al observado. Asimismo, los coeficientes multiplicadores en ambas normativas son diferentes lo que hace que la NBR 6118 sobrestime al valor del módulo mientras el ACI 318 lo subestime. Cabe resaltar que las versiones anteriores a la EHE 1998 también consideraban el módulo como raíz cuadrada de la resistencia pero con el desarrollo de hormigones de más elevada resistencia esta formulación se ha ido cambiando con objeto de buscar un mejor ajuste.

Realizando un análisis análogo al de la resistencia a compresión se presenta en la Tabla 5.15 el coeficiente  $\beta_{cc}$  que representa el porcentaje del módulo a 28 días que el hormigón presenta en cada edad.

En primer lugar, se observa que el esqueleto granular no influye de forma significativa en la tendencia de la evolución de las resistencias. Asimismo, tal como es

bien conocido se observa que la evolución del módulo de elasticidad es distinta a la evolución de la resistencia a compresión, siendo que el valor del módulo presenta un incremento pequeño para edades posteriores a los 28 días.

Tabla 5.15 – Coeficiente  $\beta_{cc}$  para las diferentes edades – módulo de elasticidad

	3	7	28	90	365
<b>C30</b>	0,85	0,90	1,00	1,03	1,03
<b>D30</b>	0,86	0,91	1,00	1,03	1,06
<b>C60</b>	0,90	0,94	1,00	1,05	1,05
<b>D60</b>	0,89	0,96	1,00	1,07	1,08

### 5.4.3. Comportamiento a tracción

Para el análisis del comportamiento a tracción de los hormigones estudiados se han realizado 3 tipos de ensayo: el ensayo Barcelona (UNE 83515), el ensayo brasileño (UNE 12390–6) y, el ensayo de flexo–tracción (UNE 12390–5).

Los correspondientes resultados se presentan en la Tabla 5.16. En ella se presentan los valores medios a cada edad, de 5 probetas para el ensayo Barcelona y de 2 probetas para el ensayo brasileño y de flexo–tracción.

En primer lugar, se puede observar que el esqueleto granular no ha influido en gran medida en los valores de tracción indirecta, aunque en todos los casos el esqueleto granular continuo ha presentado valores ligeramente superiores.

Asimismo, en el ensayo Barcelona se puede observar un incremento importante de resistencias a edades superiores a los 28 días para todas las series, similar a la evolución de la resistencia a compresión. En este sentido, la mayor cantidad de pasta asociada a una mayor cantidad de material con mayor finura conduce a una hidratación más lenta del cemento y así, una mayor ganancia de resistencia con el tiempo.

Además, se puede observar que la tendencia de evolución de la tracción indirecta es diferente entre los ensayos Barcelona y brasileño tal como se muestra de forma grafica en la Figura 5.10. Por un lado, en el ensayo Barcelona se observa un incremento creciente de la tracción con la edad, mientras que por otro lado, la mayor ganancia de tracción en el ensayo brasileño ocurre hasta los 28 días y no presenta un crecimiento significativo después de esta edad.



Tabla 5.16 – Tracción Indirecta Ft (MPa). Ensayo Barcelona, brasileño y flexo–tracción.

Ft (MPa) (CV en %)	Serie	Edad (días)				
		3	7	28	90	365
Ensayo Barcelona UNE 83515	C30	2,4 (9,1)	2,7 (7,6)	3,3 (7,2)	4,1 (3,1)	4,4 (3,5)
	D30	2,5 (5,9)	2,8 (4,6)	3,2 (2,9)	3,8 (0,8)	4,3 (5,5)
	C60	3,4 (3,1)	3,9 (4,3)	3,7 (7,9)	5,0 (6,3)	5,4 (3,8)
	D60	3,4 (8,6)	3,7 (4,5)	4,2 (8,9)	4,6 (6,4)	5,0 (7,4)
Ensayo Brasileño UNE 12390–6	C30	2,95 (8,6)	3,85 (6,3)	3,91 (2,6)	4,65 (9,3)	4,58 (8,9)
	D30	3,12 (1,2)	3,48 (8,3)	3,42 (0,3)	3,85 (0)	4,07 (1,6)
	C60	3,67 (7,3)	3,69 (4,3)	5,18 (6,2)	5,19 (7,4)	5,19 (9,7)
	D60	3,39 (2,3)	3,53 (5,5)	4,62 (3,0)	4,68 (6,9)	4,70 (9,3)
Ensayo de Flexo– tracción UNE 12390–5	C30		4,66 (3,9)	5,69 (0,2)		
	D30		3,98 (0,5)	4,29 (3,1)		
	C60		3,90 (1,9)	4,95 (2,7)		
	D60		4,85 (1,7)	6,29 (0,9)		

Tal como se ha comentado anteriormente, ello puede estar relacionado con el hecho de que en el ensayo Barcelona la pasta de cemento tiene una mayor contribución y, con el tiempo propicia una ganancia de resistencia. Sin embargo, en el ensayo brasileño el esqueleto granular tiene mayor importancia y, por ello, la tracción no aumenta en mayor medida con el tiempo.

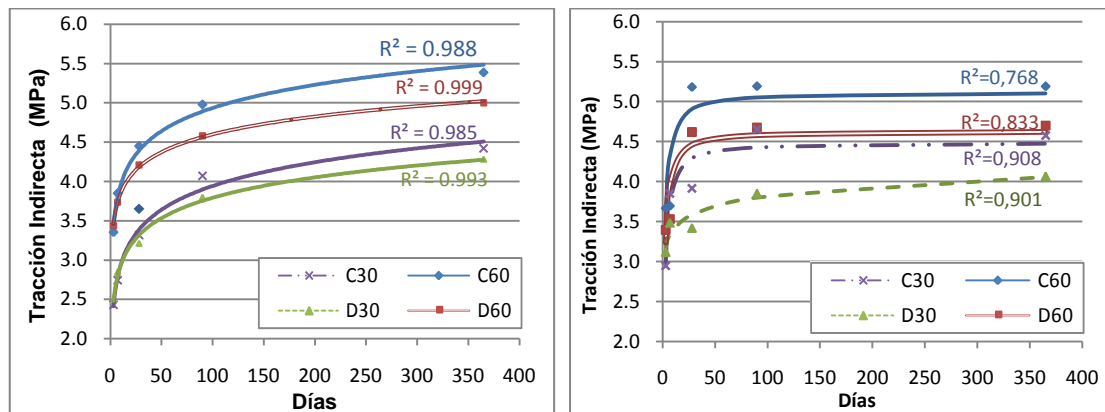


Figura 5.10 – Evolución de la tracción indirecta. a) Ensayo Barcelona b) Ensayo brasileño

También, se observa que la diferencia en la tracción indirecta entre las series de 30 MPa y de 60 MPa no es muy significativa, estando en el mismo orden de magnitud que la influencia del esqueleto granular. De tal forma que si se consideran las dos variables al mismo tiempo los valores de tracción de las series C30 y D60 son muy similares, principalmente en el ensayo brasileño.

En dicha figura, no se ha graficado los resultados de flexo-tracción ya que solo se han realizado a dos edades; sin embargo, se observa que el esqueleto granular continuo C30 presenta una resistencia ligeramente superior a la flexo-tracción que el esqueleto discontinuo D30, tal como se ha puesto de manifiesto en los otros ensayos. Además, también se observa que las series D30, D60 y C30 presentan un comportamiento similar con un incremento de resistencia del orden del 25% entre los 7 y 28 días.

Por otro lado, el resultado obtenido para la serie C60 es inferior al de la serie C30, lo cual no resulta esperable a priori, ya que ambas series presentan el mismo esqueleto granular y la pasta de cemento debería resistir más a la flexo-tracción para mayores resistencias a compresión. Las probetas destinadas a los ensayos de flexo-tracción en la serie C60, pertenecían a la cuarta amasada realizada, en la que se ha observado un valor reducido en el ensayo de escurrimiento. Ello ha ocurrido probablemente por algún error en las cantidades de los áridos de dicha dosificación lo que ratifica que el ensayo de escurrimiento es un buen parámetro de control para la aceptación del HAC.

La resistencia a tracción del hormigón se relaciona frecuentemente con la resistencia a la compresión; en la Tabla 5.17 se presenta la relación entre la resistencia a tracción obtenida en cada uno de los ensayos de tracción y la resistencia a compresión obtenida experimentalmente en el LTE.

En ella se observa una buena correlación entre la resistencia a tracción medida en los tres ensayos realizados en función de la resistencia a compresión. Dicha relación se mantiene prácticamente constante en el ensayo Barcelona, lo que refleja un incremento similar tanto en tracción como en compresión. Por otro lado, en el ensayo brasileño se observa que el HAC presenta una mayor resistencia a tracción indirecta inicial en relación a la resistencia a compresión.

Además en el ensayo Barcelona, independiente del nivel de resistencia, la tracción representa un 8% de la compresión, mientras que en el ensayo brasileño se observa un cambio del 9% al 7,5% al aumentar el nivel de resistencia de 30 a 60 MPa. Ello indica nuevamente, que la pasta de cemento no contribuye en gran medida a la

tracción en el ensayo brasileño, ya que al aumentar la edad la resistencia a compresión aumenta debido a la hidratación del cemento, si bien ello no ocurre en la tracción, lo que reduce dicho porcentaje.

Tabla 5.17 – Relación de Resistencias – Tracción/Compresión (en %)

	Serie	Edad (días)					Media
		3	7	28	90	365	
<b>Ensayo Barcelona UNE 83515</b>	C30	8,1	8,2	7,5	7,1	8,2	7,8
	D30	8,9	8,4	7,9	7,4	8,1	8,1
	C60	7,1	7,9	7,0	7,2	6,8	7,2
	D60	8,4	8,3	7,2	6,4	6,8	7,4
<b>Ensayo Brasileño UNE 12390–6</b>	C30	10,4	11,5	9,2	9,1	8,5	9,7
	D30	11,2	10,3	8,3	8,2	7,6	9,1
	C60	7,9	7,6	8,2	7,5	6,5	7,5
	D60	8,3	7,9	8,4	7,2	6,4	7,6
<b>Ensayo de Flexo- tracción UNE 12390–5</b>	C30		13,9	13,3			13,6
	D30		11,7	10,5			11,1
	C60		8,0	7,8			7,9
	D60		10,8	11,4			11,1

Los porcentajes referentes a la resistencia a flexo-tracción son superiores ya que en dicho ensayo los mecanismos de rotura son diferentes. Asimismo, se puede observar que los valores del esqueleto granular continuo (13% – no se incluye la serie C60) son algo superiores a los valores del esqueleto granular discontinuo (11%). Esto puede estar relacionado con un mayor engranamiento de los áridos en este tipo de esqueleto granular.

Asimismo, cabe resaltar que la metodología del ensayo Barcelona (Molins et al, 2009) considera que la forma de rotura de la probeta no influye en la resistencia a tracción indirecta. Sin embargo, dicha metodología está propuesta para hormigones con fibras, que tiene un papel importante en la resistencia a tracción.

Durante la realización de los ensayos con HAC se ha observado que las probetas que rompían en 2 partes presentaban valores ligeramente más bajos de resistencia a tracción indirecta. En la Figura 5.11 se muestran los tres tipos de rotura observados.



Figura 5.11 – Roturas en 2, 3 y 4 partes. Ensayo Barcelona

#### 5.4.4. Adherencia

En el ensayo de adherencia realizado según la norma UNE 36744 (1998) se obtiene dos resultados, la tensión de adherencia ( $\sigma_{\text{adher}}$ ) y la tensión de rotura ( $\sigma_{\text{rot}}$ ). La  $\sigma_{\text{adher}}$  se calcula a través de la media aritmética de las tensiones resultantes de los desplazamientos de 0,01; 0,1 y 1 mm; mientras la  $\sigma_{\text{rot}}$  es la máxima tensión soportada por la viga o la tensión referente a un desplazamiento de 3 mm. En la Tabla 5.18 se presentan los resultados obtenidos de  $\sigma_{\text{adher}}$  y  $\sigma_{\text{rot}}$  (en MPa) así como la carga máxima aplicada en la viga ( $P_{\text{rot}}$ ) en KN y el coeficiente de variación (CV) correspondiente. Asimismo, se presenta en la figura 5.12 los valores de dichas tensiones.

En primer lugar, se observa que el esqueleto granular no ha influido en los resultados de la adherencia, ya que las series de misma resistencia han presentado valores similares. Por otra parte, en las series de baja resistencia (30MPa) el esqueleto discontinuo (D) ha logrado una tensión de adherencia ligeramente superior, mientras que en las series de alta resistencia los resultados se alternan, si bien, en ninguno de los dos casos las diferencias son representativas.

Estas diferencias pueden estar correlacionadas con los mecanismos de adherencia presentes en cada caso. En los hormigones de baja resistencia (30) la diferencia entre los dos esqueletos granulares puede estar asociada a la adhesión mecánica. De modo que, el esqueleto granular discontinuo por presentar un mayor contenido de árido grueso presenta una mayor parcela de adherencia mecánica. Sin embargo, en las series de resistencia más elevada (60) se puede asociar una mayor contribución de la parcela de adherencia que actúa por adhesión. De modo que, el esqueleto granular continuo debido a su mayor cantidad de pasta (más finos debido al mayor contenido de arena) presente una mayor parcela de adherencia por adhesión.

Asimismo, se puede observar que los hormigones estudiados, independientemente de la resistencia, presentan una evolución rápida de la adherencia, alcanzando a los 7 días un 95% del total de la adherencia a los 28 días.

Del mismo modo, se pone de manifiesto que las  $\sigma_{adher}$  y  $\sigma_{rot}$  presentan una misma tendencia, cuya diferencia es el orden de magnitud.

Tabla 5.18 – Resultados del ensayo de adherencia  $\sigma_{adher}$ ,  $\sigma_{rot}$  (en MPa) y  $P_{rot}$  (en KN)

	3 días			7 días			28 días		
	$\sigma_{adher}$ (CV)	$\sigma_{rot}$ (CV)	$P_{rot}$ (CV)	$\sigma_{adher}$ (CV)	$\sigma_{rot}$ (CV)	$P_{rot}$ (CV)	$\sigma_{adher}$ (CV)	$\sigma_{rot}$ (CV)	$P_{rot}$ (CV)
<b>C30</b>	6,23 (13,7%)	11,58 (23,9%)	41,90 (23,9%)	8,09 (8,2%)	12,98 (4,2%)	46,98 (4,2%)	7,28 (5,2%)	13,15 (15,3%)	47,60 (15,3%)
<b>D30</b>	6,91 (7,8%)	13,02 (13,9%)	47,12 (13,9%)	8,23 (11,9%)	13,69 (14,6%)	49,53 (14,6%)	8,91 (9,6%)	14,32 (1,3%)	51,83 (1,3%)
<b>C60</b>	9,30 (4,3%)	14,29 (2,3%)	51,71 (2,3%)	10,68 (0,0%)	16,03 (0,0%)	58,01 (0,0%)	9,82 (10,8%)	16,82 (3,0%)	60,88 (3,0%)
<b>D60</b>	6,11 (7,2%)	12,34 (3,3%)	44,65 (3,3%)	10,84 (11,2%)	15,86 (17,1%)	57,41 (17,1%)	9,70 (0,0%)	16,08 (0,0%)	58,21 (0,0%)

Los valores de los CV presentados en la anterior tabla reflejan los problemas experimentales comentados en el capítulo 3; los casos en que sólo se ha obtenido un valor válido el CV es nulo. En este sentido, se presenta en el Anejo B los valores medidos en cada una de las vigas y se detalla los problemas y soluciones experimentales para cada caso.

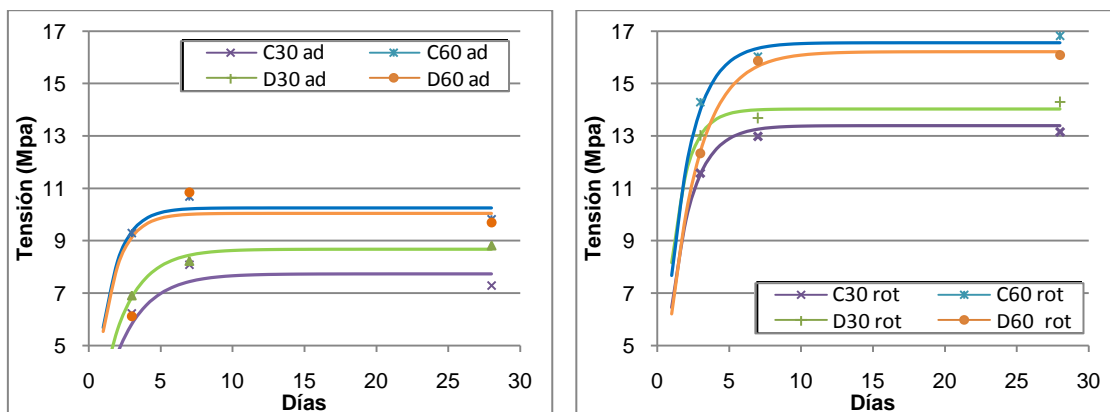
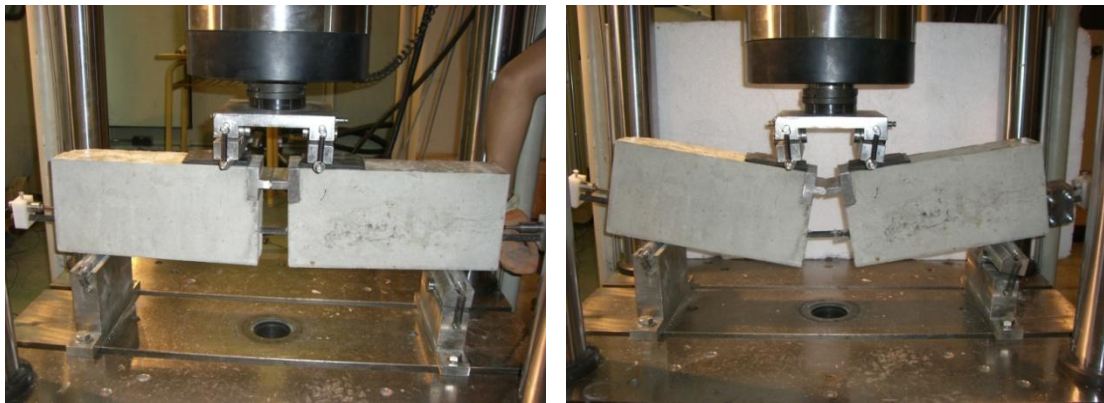


Figura 5.12 – Ensayo de Adherencia a)  $\sigma_{adher}$  b)  $\sigma_{rot}$

Cabe resaltar que en la realización de dichos ensayos se ha observado una rotura frágil en relación a la adherencia, ya que la viga de ensayo pasaba en pocos segundos de una condición de estabilidad sin deformación a una deformación excesiva con rotura por adherencia, tal como se muestra en la Figura 5.13. Ello ha comprometido en muchos casos, la realización del ensayo en el segundo lado de la viga (según la UNE 36744: 1998, se ensaya los 2 lados de cada viga), tal como ya se ha comentado en el capítulo 3.



*Figura 5.13 – Ensayo de adherencia a 3 días serie C30  
a) estabilidad sin deformación b) deformación excesiva con rotura por adherencia*



# **CAPÍTULO 6:**

## **DEFORMACIONES DIFERIDAS**

### **6.1. INTRODUCCIÓN**

En el capítulo anterior se ha presentado los resultados relativos a las propiedades en estado endurecido de los HAC, analizando como influye el esqueleto granular en ellas. Dado el volumen y la especificidad, en él no se incluyeron las propiedades diferidas de los hormigones: retracción y fluencia.

El objetivo del presente capítulo es presentar y analizar el comportamiento diferido de estos hormigones a través de los resultados de los ensayos de retracción y fluencia realizados en la misma campaña experimental del capítulo anterior.

Tal como ya se ha comentado en el capítulo 2, el comportamiento tanto de retracción como de fluencia de los HAC, según la EHE-08, puede considerarse equivalente al de un HC de igual relación a/c; aunque de los diversos autores que han



realizado investigaciones en ese sentido, no todos están de acuerdo con la EHE-08. A la luz de estas divergencias, aparte de la contrastación experimental, parece conveniente hacer un análisis comparativo del comportamiento diferido medido de los HAC con las predicciones de diferentes normativas.

Los modelos utilizados son los que se presentan en las siguientes normativas: EHE (2008), CEB-FIP (1990), ACI 209R (1992), EC-2 (1992) y el modelo B3 (Bazant y Baweja, 1995), detallándose las características de los mismos en el anejo C.

## 6.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS DOSIFICACIONES

Con objeto de facilitar la lectura y comprensión del capítulo, en la Tabla 6.1 se presentan las 4 dosificaciones utilizadas para la realización de los ensayos de la fluencia y retracción, que se corresponden con los de caracterización presentados en el capítulo anterior, por lo que se disponen de sus prestaciones mecánicas, incluyéndolas en la citada tabla.

Tabla 6.1. – Características de las dosificaciones

Materiales (kg/m <sup>3</sup> )	C-30 3/7/2007	D-30 25/6/2007	C-60 15/6/2007	D-60 18/6/2007
Arena 0-2 mm	115	115	--	--
Arena 0-4 mm	876	876	976	926
Garbancillo 5/12 mm	505	168	505	168
Gravilla 12/20 mm	292	674	292	674
Agua teórica	182	182	182	182
Agua Real*	175	182	176,3	182
Melcret PF-75	2,7	2,88	2,7	2,7
Superplast.Glenium C303 SCC	8,73	7,41	8,73	8,73
CEM II A-L 32,5 B-C (kg/m <sup>3</sup> )	380	380	--	--
CEM II A-L 42,5R (kg/m <sup>3</sup> )	--	--	450	450
Relación agua/cemento	0,479	0,479	0,404	0,404
Relación árido/cemento	4,71	4,82	3,94	3,93
f <sub>cm28</sub> (MPa) UPC	42,75	40,93	62,47	54,94
E <sub>28</sub> (GPa)	36	34,5	39,5	38

\* consecuencia de las modificaciones comentadas en el apartado 5.3 del capítulo anterior

Para cada dosificación se han realizado 5 amasadas de 150 litros, habiéndose moldeado las 8 probetas cilíndricas de 15 x 45 (en cm) destinadas a las medidas de las deformaciones diferidas de una misma amasada. Cada dosificación fue realizada en una fecha diferente tal como puede verse en la citada Tabla 6.1.

### **6.3. RESULTADOS DE RETRACCIÓN**

En este apartado se presentan los resultados del ensayo de retracción con un planteamiento global, pudiéndose ver el detalle de los resultados de cada una de las series en el Anejo C. Inicialmente se resumen los procedimientos de ensayo, ya presentados en detalle en el Capítulo 3, para, a continuación, presentar los resultados y hacer un análisis conjunto de los mismos.

#### **6.3.1. Características específicas**

En cada una de las probetas destinadas a medir las deformaciones diferidas se ha dispuesto de una 1 galga embebida, tipo KM-100AT de Tokio Shokki Kenkuyojo (anejo A) y, 3 bases externas extensométricas de 15 cm, situadas en meridianos equidistantes (a 120°). Los procedimientos para la instalación de ambos sistemas de lectura se han descrito en el apartado 3.4.3 del capítulo 3.

La utilización de las galgas embebidas permite las lecturas de las deformaciones a partir del instante del hormigonado de las probetas. A las 24 horas se han desmoldado las 8 probetas de cada dosificación, de las cuales 5 probetas corresponden a los ensayos de retracción total y fluencia. Dichas probetas se sumergieron en agua hasta la edad de 28 días, mientras que en las 3 probetas destinadas al ensayo de retracción autógena se las aplicó un proceso de sellado (parafina + cinta de aluminio) descrito en el apartado 3.4.3 del capítulo 3. Estas 3 probetas fueron almacenadas al aire inicialmente en el interior de una cámara climática según la norma UNE 83318 en las instalaciones de PROMSA y posteriormente trasladadas a la cámara climática de la UPC.

Cabe resaltar que en este apartado se presentan los resultados de las deformaciones medidas durante el periodo de curado para las 8 probetas (inclusive para las que posteriormente se aplica la carga – fluencia), ya que hasta los 28 días las deformaciones que se miden en ellas son similares a las medidas en las probetas destinadas a los ensayos de retracción total.

### 6.3.2. Análisis conjunto entre las series – Retracción Autógena

En este apartado se presentan de modo conjunto los resultados de retracción autógena para las diferentes series. Para ello, en la figura 6.1 se representan los valores medios de las deformaciones en escala semi-logarítmica.

En primer lugar, se observa que las series de misma resistencia (C30 y D30; C60 y D60) presentan resultados muy similares entre sí, aunque hayan sido hormigonadas en diferentes días. Este resultado era de esperar ya que el comportamiento de la retracción autógena viene afectado, principalmente, por la pasta de cemento (contenido y tipo), que es muy similar en las series de misma resistencia. En base a ello se puede decir que el esqueleto granular no afecta de forma significativa los resultados.

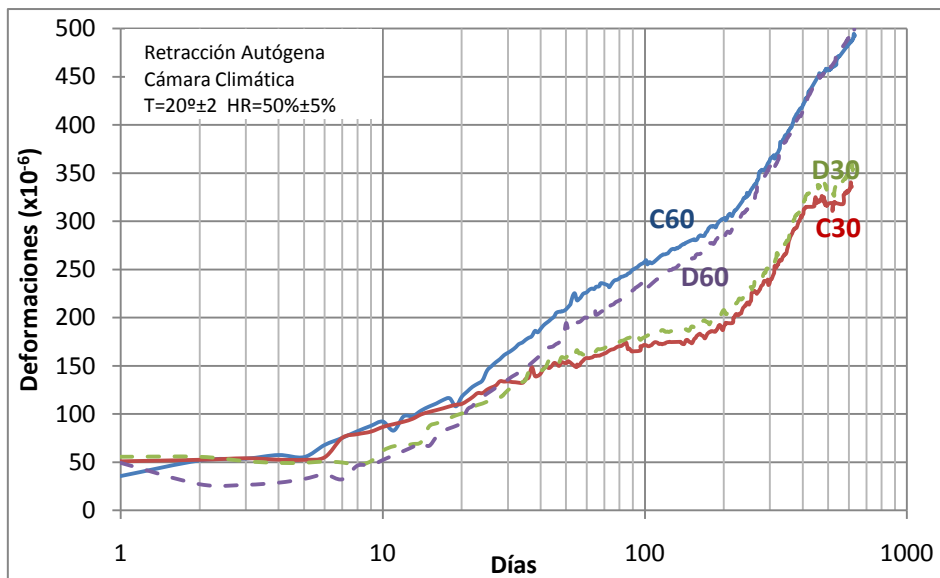


Figura 6.1 – Comparación de la retracción autógena entre las distintas series

Por otro lado, se observa que en todas las series se presenta un cambio de tendencia alrededor de los 200 días ( $\pm 20$  en función de la serie), el que se asocia a una pérdida de eficiencia en el sistema de sellado, lo cual se comenta en detalle en el Anejo B. Por ello, a partir de dicha edad las deformaciones medidas en las probetas selladas (correspondientes a retracción autógena) incluyen, probablemente, una parte de la retracción por secado. Ello queda en evidencia al analizar, con posterioridad, la retracción por secado en el apartado 6.3.4 (ver figura 6.5), por lo que en el apartado 6.3.6 se propone una corrección a la retracción autógena basada en el modelo del EC-2 y en los valores medidos hasta los 180 días.

En dicha figura 6.1, aparte de las diferencias de valores absolutos de la retracción para cada serie se puede ver que las cinéticas son diferentes. Así en la gama de la alta resistencia, aparte de valores mayores, también, se observa una retracción mayor entre los 100 y 180 días; lo cual se explica por el mayor contenido de cemento en las series de alta resistencia y su menor relación agua/cemento, lo que hace que las reacciones de hidratación del cemento tarden más en estabilizarse.

En todos los casos hay que remarcar que los valores de la retracción autógena son significativos, lo que responde a que en el HAC, más fácilmente que en el HC, puede darse una combinación de factores que podrían conducir a una significativa retracción autógena: un contenido de cemento superior, el uso de un cemento más fino, la mayor cantidad de material fino en general y las bajas relaciones agua/finos (Anejo 17 de la EHE-2008).

### 6.3.3. Análisis conjunto entre las series – Retracción Total

En este apartado se comparan los resultados de retracción total de cada serie, presentándose en la figura 6.2 el resultado promedio obtenido. Nuevamente se observa que las series de resistencia equivalente presentan resultados muy similares, por lo que se concluye que los cambios del esqueleto granular utilizados en este estudio no influyen en la retracción total, ya que la cantidad de pasta es prácticamente la misma.

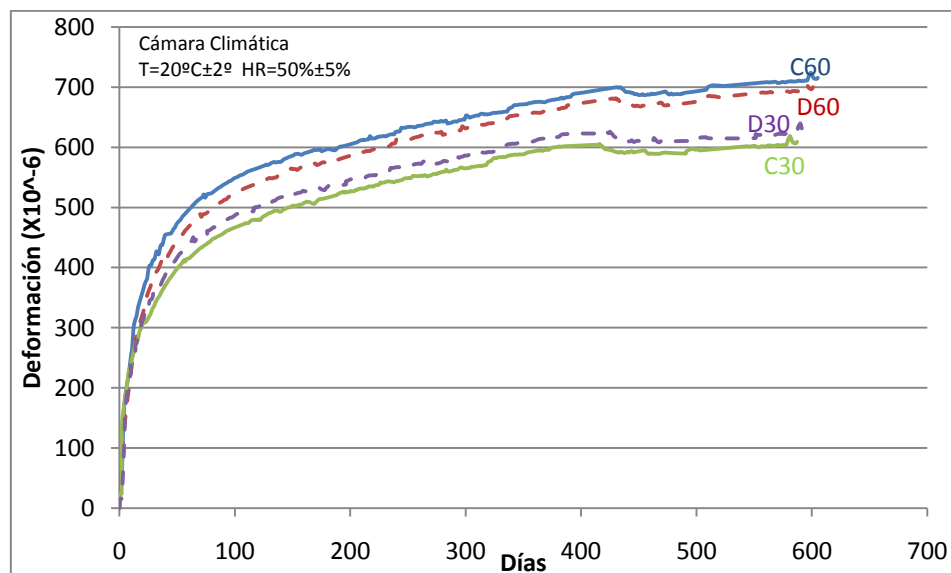


Figura 6.2 – Comparación de la retracción total entre las distintas series

Cabe recordar que el procedimiento de ensayo utilizado (UNE 83318) genera unas deformaciones iniciales de secado producidas por el cambio acentuado de humedad, tal como se observa en dicha figura. Ello deriva de que las probetas son curadas sumergidas en agua por 28 días, y posteriormente transferidas para un ambiente a 50% de HR, correspondiendo a la fecha de inicio del periodo de secado.

Por ello, se observa que la retracción total se incrementa de forma más rápida en las primeras edades, aunque sigue presentando incrementos durante todo el periodo de ensayo. Ello puede ser fruto, por un lado de la microestructura más densa del hormigón autocompactante (debido a la ausencia de vibración y de un mayor contenido de finos) que conduce a una reducción en la velocidad de exudación del agua libre; y por otro el alto contenido de cemento conduce a un mayor calor de hidratación.

Para calcular el valor máximo de la retracción en dichas series se ha realizado una regresión no lineal utilizando el programa de cálculo Curve Expert. Los resultados se presentan en la tabla 6.2, en la que puede verse tanto la ecuación utilizada para la curva de ajuste como los parámetros de dicha ecuación (a, b, c y d). En los cuatro casos el coeficiente de correlación ha sido superior a 0,99 lo que indica un ajuste muy preciso. Con posterioridad, a partir de esta ecuación, se ha calculado el valor de la retracción utilizando un valor de t en días correspondiente a 1, 5, y 50 años.

Tabla 6.2. – Regresión no lineal – retracción total

Serie	Ecuación	Parámetros			R <sup>2</sup>	Deformaciones (x10 <sup>-6</sup> m/m) (t en años):		
		a	b	c		t = 1	t = 5	t = 50
C30	$y = a \cdot \exp(b \cdot t^c)$ donde, t es el tiempo en días	882,7	-2,80	-0,32	0,996	579,3	686,6	782,9
D30		810,5	-3,22	-0,40	0,997	598,5	691,3	760,9
C60		948,6	-2,88	-0,36	0,998	669,8	780,2	870,7
D60		962,0	-3,16	-0,35	0,998	652,5	772,6	873,2

Los resultados muestran que la retracción total sigue creciendo con el tiempo, como es conocido para cualquier hormigón (Neville, 1995). A los 365 días los valores de retracción medidos representan un 77% del valor calculado para la retracción a 50 años (correspondiente a la vida útil estimada de algunas estructuras) y, a los 5 años la retracción se incrementa a un 90%.

Además los valores obtenidos son significativos. Así, a los 5 años, los hormigones correspondientes a las series de baja resistencia presentan unas deformaciones de 0,69 mm/m, mientras que para las series de alta resistencia el valor es de 0,78 mm/m. Para situar estos resultados con los obtenidos por otros investigadores en la figura 6.3 se presentan los resultados disponibles en la base de datos presentada por Agranati (2008). Dicha base incluye resultados de HAC y de HC, pudiéndose observar que los resultados medidos están dentro del rango de deformaciones medidas por otros investigadores tanto para HAC como para HC.

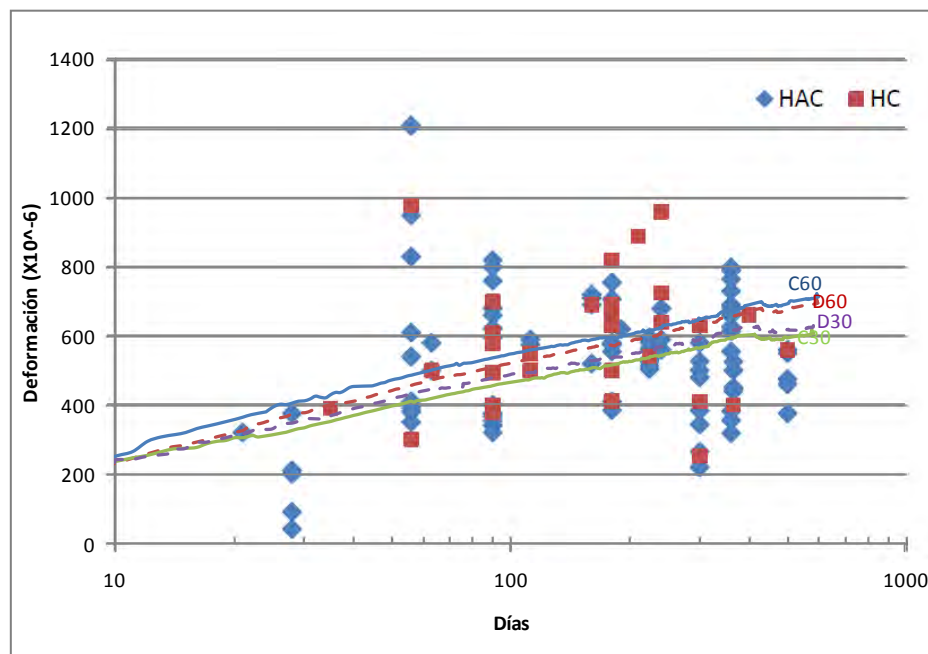


Figura 6.3 – Comparación de la retracción total con base de datos de Agranati (2008)

#### 6.3.4. Comparación de los resultados de retracción total con las normativas

Para comparar los resultados obtenidos con las predicciones de los modelos utilizados en las normativas se han considerado las siguientes: EHE (1998), EHE (2008), Eurocódigo (EC-2), ACI 209 (1992), y CEB-FIP (1990). También se ha utilizado el modelo B3 de Bazant y Baweja (1995); presentándose todos ellos de forma detallada en el anejo C, por lo que en lo que sigue sólo se hace un recordatorio de las características principales de los mismos.

El modelo considerado en la **EHE-98** tiene en cuenta, para la evaluación de la retracción: el grado de humedad ambiente, el espesor ficticio, la composición del hormigón y el tiempo transcurrido desde la ejecución, que marca la duración del fenómeno. Dicho modelo asume que la retracción total está compuesta por la

retracción autógena y por la retracción de secado, pero no las separa en el cálculo. Esta normativa ha sido revisada en 2008, y dicho modelo ha sido sustituido por el modelo del Eurocódigo 2.

El modelo de cálculo del **Eurocódigo 2** y de la **EHE-2008** es el primer modelo que separa la retracción en dos componentes: la retracción por secado y la retracción autógena. En dichas normativas se hacen las siguientes hipótesis: la retracción y la fluencia son independientes; los efectos de la humedad y de la distribución no uniforme de temperaturas son despreciables; se considera el principio de superposición a las acciones ocurridas en diferentes edades del hormigón.

El modelo del **ACI 209R-92** inicialmente fue desarrollado para la industria de los prefabricados, pero con los años se ha convertido en el modelo de referencia para hormigones en EE.UU. Este modelo también se utiliza en Canadá, Australia y en parte de América Latina. Es un modelo puramente empírico, basado en resultados experimentales anteriores al año 1968 (Al-Manaseer, 2005). El modelo es aplicable al hormigón de peso normal y a hormigón ligero con cementos tipo I y III, y curado en condiciones húmedas o con vapor. En su nivel más básico, los parámetros necesarios son: edad cuando comienza la retracción, método de curado, humedad relativa, expresada en decimales, y relación volumen/superficie. Este modelo permite utilizar factores correctores que consideran el contenido de árido fino, el contenido de aire, consistencia de la mezcla, y contenido de cemento.

El modelo de cálculo del Código Modelo **CEB-FIP 90** es válido para un hormigón estructural ordinario,  $12 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 80 \text{ MPa}$ , expuesto a humedades relativas del ambiente en el rango del 40% al 100% y temperaturas de 5°C a 30°C. Este modelo no es aplicable a hormigones sometidos a temperaturas extremas altas o bajas, a condiciones climáticas muy secas o a hormigón estructural de áridos ligeros. Los parámetros mínimos necesarios en el cálculo son: edad del hormigón al comienzo de la retracción, edad del hormigón en el instante de carga, humedad relativa, resistencia media a compresión del hormigón a la edad de 28 días, tipo de cemento, y espesor medio.

El **modelo B3** es relativamente complejo y requiere numerosos parámetros relacionados con la dosificación de la mezcla. Se basa en la teoría de la solidificación, según la cual, el envejecimiento del hormigón se debe al incremento de volumen de la porción resistente de la materia que ha solidificado. Los autores recomiendan su aplicación solo en caso de estructuras especiales, cuyo nivel de sensibilidad a la fluencia y retracción justifiquen un método de análisis más preciso. Si los parámetros

del modelo son calibrados mediante ensayos, el modelo es aplicable a cualquier hormigón de cemento Portland incluyendo hormigones ligeros y de alta resistencia.

Los valores de retracción para cada una de las series se han calculado utilizando los modelos anteriores, habiéndose utilizado en el cálculo, los parámetros expuestos al inicio de este capítulo en la tabla 6.1. Los resultados obtenidos para cada una de las series se presentan en la Figura 6.4.

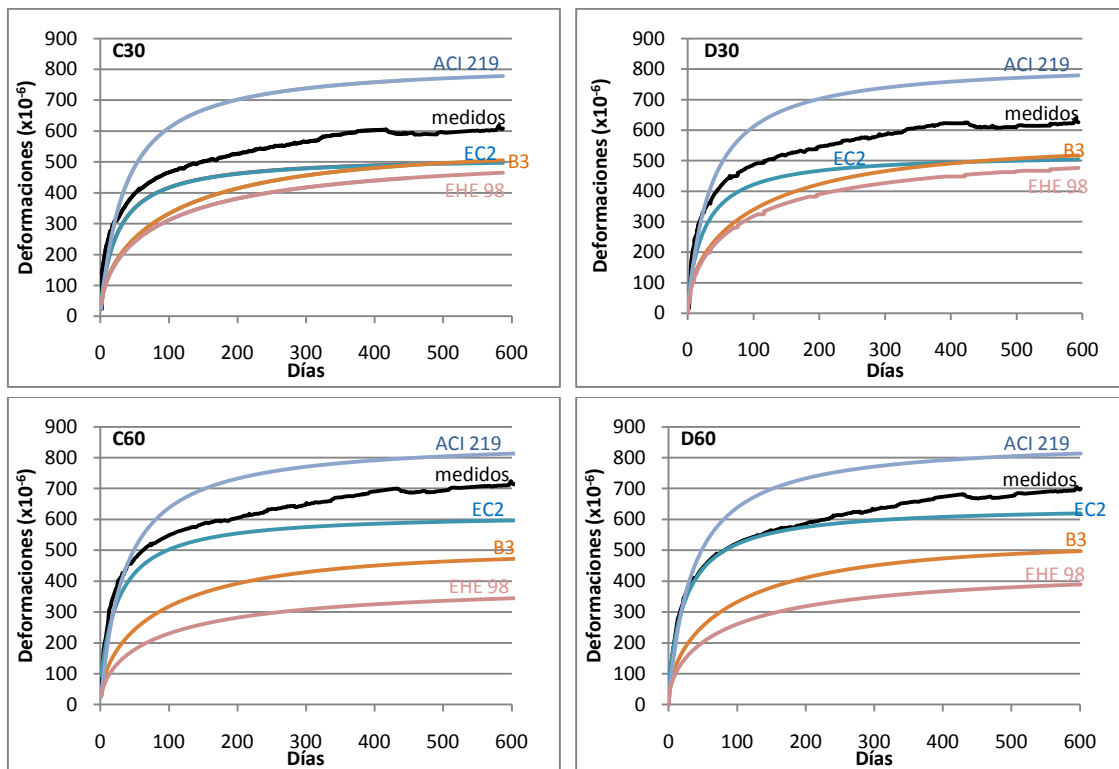


Figura 6.4 – Comparación de la retracción total con modelos de cálculo.

En primer lugar, se observa que los valores medidos están dentro del orden de magnitud de los modelos propuestos, con lo que es posible la aplicación de dichos modelos, si bien se recomienda el empleo de factores correctores tal como se muestra en el apartado 6.3.5.

Asimismo, puede verse que los resultados medidos están entre la previsión del EC-2 (EHE 2008) y del ACI 219, mientras que, el comportamiento de evolución de la retracción se asemeja más al modelo del ACI 219 ya que el modelo del EC-2, a partir de los 200, se incrementa de menor forma, tal como se ve claramente en el gráfico D60 de la citada figura 6.4.



Dado que dicho modelo (EC-2) separa la retracción en dos partes: la autógena y la de secado, parece conveniente ahondar en la causa de este comportamiento. Por ello, en la figura 6.5, se muestra la parte relativa a la retracción por secado calculada con el modelo del EC-2 (secado EC-2) y la diferencia entre la retracción total y la retracción autógena medidas en las probetas (calculado).

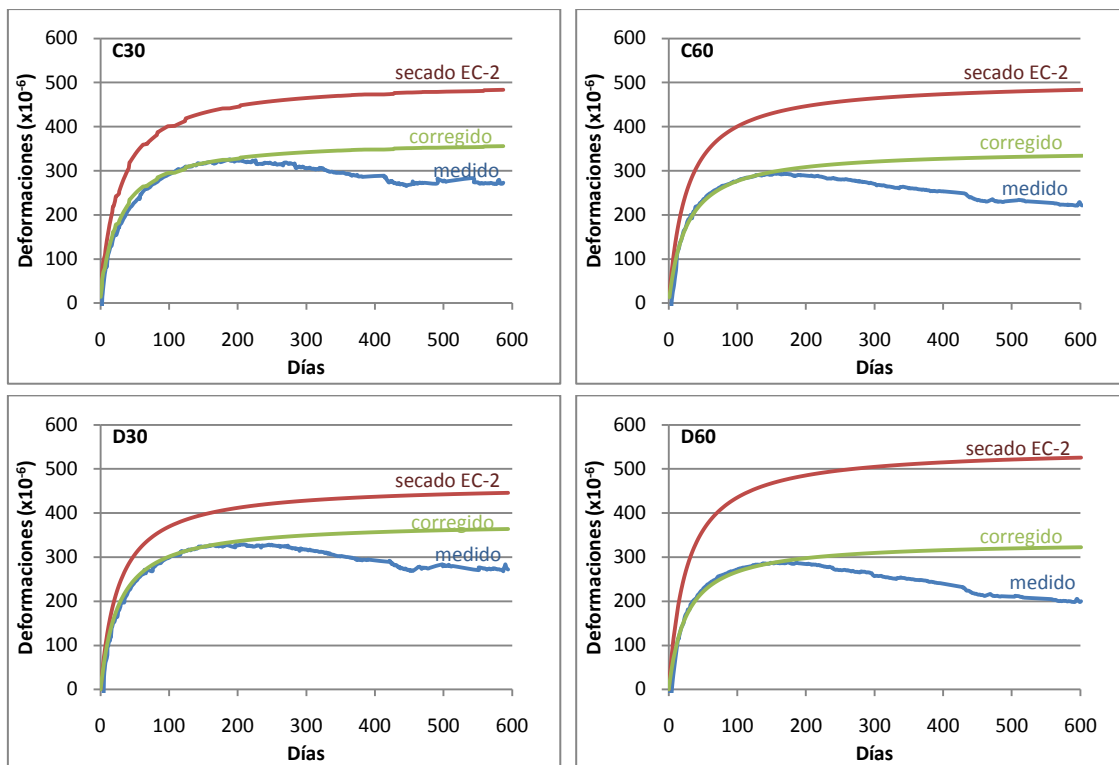


Figura 6.5 – Comparación de la retracción de secado con el modelo del EC-2

En ella, puede verse que el modelo del EC-2 sobrestima el valor de la parte de retracción de secado, mientras que, tal como se ha visto en la figura 6.4, el mismo modelo subestima la retracción total. Ello se puede asociar a que la retracción por secado está relacionada con la porosidad del hormigón (Poppe y De Schutter, 2005) y, debido a su mayor contenido de finos, el HAC es menos poroso que un HC y, por lo tanto debe presentar una menor retracción por secado.

Por otra parte, se observa que los valores medidos empiezan a disminuir, en el entorno de los 200 días ( $\pm 20$  días), como consecuencia de que la retracción por secado medida representa la diferencia entre la retracción total y la retracción autógena y, dada la problemática comentada con anterioridad, una parte de la retracción por secado está incluida en la retracción autógena correspondiente al descenso de las curvas de la figura 6.5. Por ello, en dicha figura se ha corregido la retracción por secado considerando la evolución de deformaciones similar al modelo

del EC-2 para edades superiores a los 200 días. Asimismo, la diferencia entre la curva corregida de retracción por secado y la calculada representa la parcela de retracción por secado incluida en la retracción autógena, de modo que en el apartado 3.6.6 se corrige la retracción autógena en función de ello.

En cualquier caso, para un ajuste de este modelo a los HAC parece necesario ahondar en el estudio con un mayor número de casos para obtener parámetros de corrección de la retracción autógena y de la retracción por secado, en función de la composición de los HAC.

El modelo B3 y el modelo de la EHE-98 subestiman en mayor medida el valor de la retracción aunque, dado que el modelo de la EHE-98 fue sustituido, se ha decidido no profundizar en ello. El modelo B3, por otro lado, es un modelo complejo y la evolución de la retracción en él, se produce de forma diferente a lo que se observa en los resultados experimentales, tal como puede verse en la figura 6.6, tanto en escala normal, como en escala semilogarítmica para el eje de abscisas representativo de la edad ( $t$ ), los resultados medidos de la serie C30 y el cálculo del modelo B3.

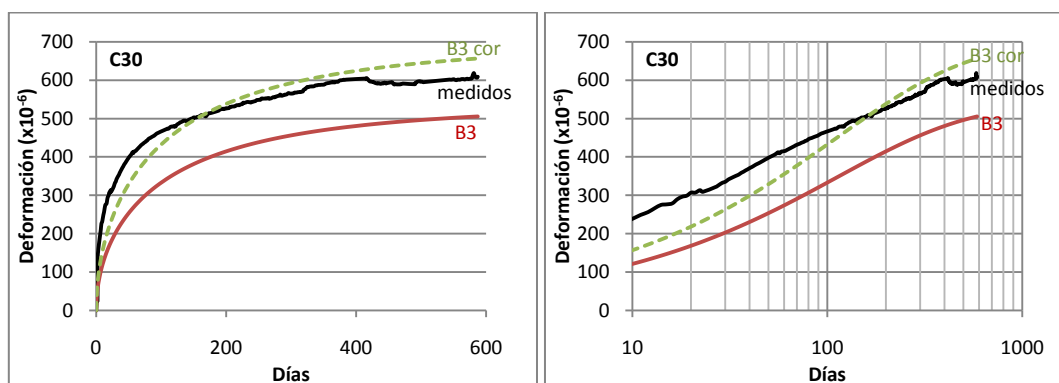


Figura 6.6 – Comparación de la retracción total medida con la obtenida según el modelo B3

Si bien, como puede verse en la citada figura los resultados del modelo B3 infravaloran los resultados medidos, en aras a comparar las cinéticas se ha corregido el modelo, haciendo que coincidan los valores para la edad de 180 días, por lo que se requiere multiplicar todos los resultados del modelo por 1,3. En base a ello, se observa que antes de esta fecha los valores calculados son inferiores a los medidos y posteriormente a esta edad dichos valores son superiores a los medidos; con lo que la forma de evolución del modelo B3 no coincide con la medida.

### 6.3.5. Propuesta para el coeficiente de consistencia del modelo del ACI 219

Considerando, por un lado, que el modelo del ACI 219 realiza una estimación que se ajusta bien a los valores medidos y, por otro lado, que uno de sus coeficientes representa la consistencia del hormigón, en este apartado se propone un ajuste de dicho coeficiente para el caso específico de los HAC estudiados.

Se trata del coeficiente  $\gamma_s$  definido en función del cono de Abrams para HC, según la ecuación 6.1:

$$\gamma_s = 0,89 + 0,00161s \quad [6. 1]$$

donde,  $s$  es el asentamiento del hormigón medido en el cono de Abrams, en mm.

Haciendo una extrapolación de esta expresión para los HAC de este estudio con valores de  $s$  entre 250 y 270 mm se obtendría un coeficiente  $\gamma_s = 1,3$ ; si bien cabe resaltar que este planteamiento no es válido para HAC, por lo que se plantea definir el factor corrector de la consistencia  $\gamma_s$  de los HAC en función del ensayo de escurrimiento.

En base a los resultados, se ha ajustado los coeficientes  $\gamma_s$  aplicados, obteniéndose valores de  $\gamma_s = 1,05$  para las serie C30 y D30 con escurrimientos de 68,5 y 66 cm respectivamente; y de  $\gamma_s = 1,10$  para las series C60 y D60 cuyos escurrimientos fueron de 69,5 y 70,5 cm. En la figura 6.7 se presenta el modelo modificado.

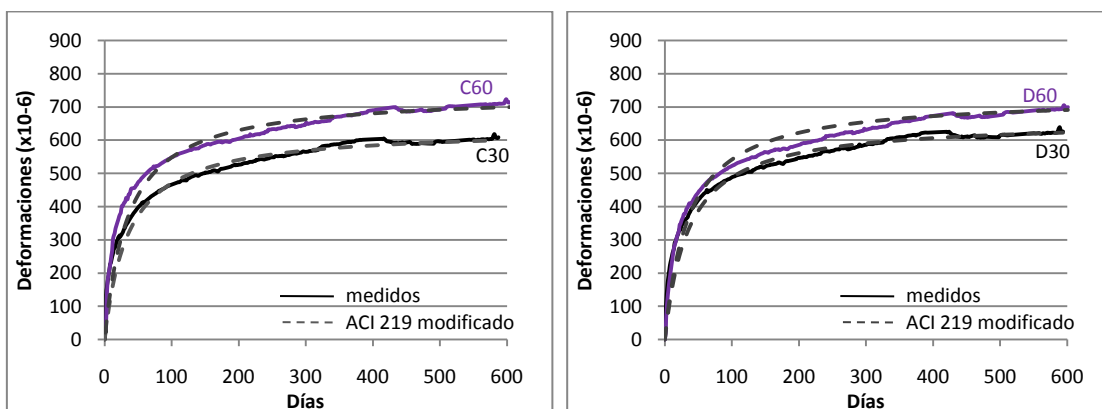


Figura 6.7 – Modelo ACI 219 modificado.

Aunque para un mejor ajuste del modelo son necesarios más datos experimentales, en base a los obtenidos en dicho trabajo se puede recomendar que:

- Para escurrimiento = 65 cm  $\therefore \gamma_s = 1,05$
- Para escurrimiento = 70 cm  $\therefore \gamma_s = 1,10$

### 6.3.6. Corrección de la retracción autógena medida en base al modelo el EC-2

Con anterioridad, en el apartado 6.3.4, se han comparado los resultados del modelo EC-2 para la estimación de la retracción por secado con los resultados medidos por diferencia entre la retracción total y la retracción autógena medidas. Los resultados se han presentado en la figura 6.5, en la que se observa que el decremento del gráfico corresponde a la edad en que el sellado pierde eficiencia, es decir, que las medidas de la retracción autógena incluyen una parte correspondiente al secado.

Teniendo en cuenta la corrección realizada en dicho apartado se puede estimar la retracción autógena en base a la diferencia de la curva de retracción total medida con respecto a la curva por secado corregida (en la anterior figura 6.5), tal como se presenta en la Figura 6.8. En la cual se ha realiza una regresión por el método de los mínimos cuadrados para los valores corregidos de la retracción autógena, pidiéndose ver que una vez corregida la curva de la retracción autógena se obtiene una evolución muy similar a las curvas de retracción total presentadas anteriormente.

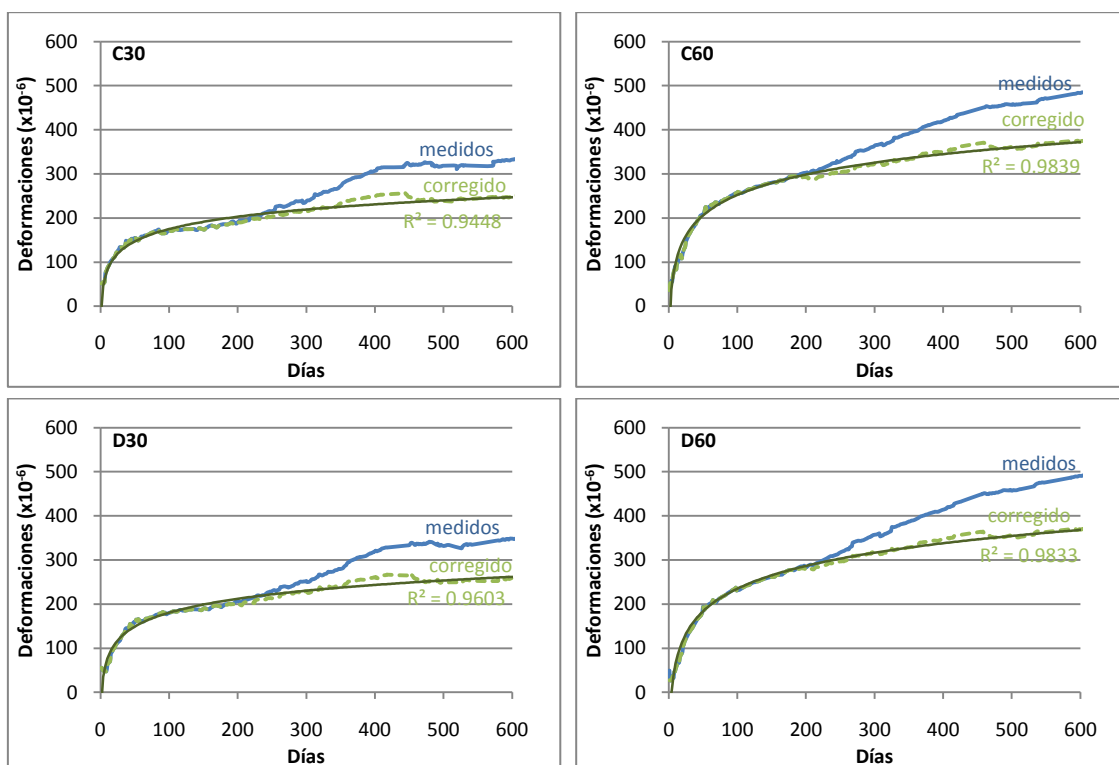


Figura 6.8 – Corrección de la retracción autógena.

Nuevamente se resalta que el esqueleto granular no ha influido en los resultados de retracción autógena ya que los valores han sido muy similares entre las series de misma resistencia. Aunque se destaca que los valores de la retracción autógena son significativos, del orden de los 0,24 mm/m a los 365 días para las series de baja resistencia (C30 y D30) y de 0,34 mm/m para las series de alta resistencia (C60 y D60). En este sentido, valores similares o superiores han sido observados por otros investigadores (0,25 mm/m – Turcry *et al* (2002); 0,32 mm/m - Assié *et al* (2003); 0,40 mm/m - Proust y Pons (2001) y Mazzotti *et al* (2007)).

Tal como se ha hecho para la retracción total, se utiliza la ecuación obtenida por la regresión no lineal para calcular el valor de la retracción autógena en edades superiores a las estudiadas. Los resultados se presentan en la tabla 6.3.

Tabla 6.3. – Regresión no lineal – retracción autógena

Serie	Ecuación	Parámetros			R <sup>2</sup>	Deformaciones (x10 <sup>-6</sup> m/m) (t en años):		
		a	b	c		t = 1	t = 5	t = 50
C30	$y = a \cdot \exp(b \cdot t^c)$ donde, t es el tiempo en días	2526,3	-4,09	-0,09	0,980	228,2	315,9	466,5
D30		614,4	-3,36	-0,22	0,984	240,2	316,6	410,6
C60		687,2	-3,72	-0,28	0,994	340,0	439,6	544,3
D60		640,8	-5,06	-0,35	0,996	333,2	440,8	541,5

En dicha tabla se presenta la ecuación utilizada para modelar la curva de los resultados promedios correspondientes a cada una de las series. Los parámetros de dicha ecuación se exponen en las columnas A y B. En los cuatro casos el coeficiente de correlación ha sido superior a 0,98 lo que indica un ajuste adecuado. De este modo se ha calculado el valor de la retracción utilizando un valor de t en días correspondiente a 1, 5, y 50 años.

Se puede observar que a diferencia de la retracción total, la retracción autógena sigue presentando incrementos significativos para edades superiores a los 5 años. Los valores medidos a 1 año representan entre el 50% y 60% (para series de 30 MPa y 60 MPa respectivamente). A igual manera, Mazzotti *et al* (2007) observó que la retracción autógena en una de sus mezclas presentó incrementos significativos para edades superiores a 1 año, sin embargo no se ha encontrado otros estudios en esta dirección en la literatura.

Por un lado, se puede concluir que ello ocurre al elevado contenido de cemento de las mezclas estudiadas, pero por otro lado, se puede considerar que aún hay una pequeña parcela del secado incluida en las medidas de la retracción autógena. Por lo que es necesario profundizar en el estudio de la retracción autógena a edades superiores a 1 año garantizando que no exista una pérdida de eficiencia en el sistema de sellado de la probeta.

## **6.4. RESULTADOS DE FLUENCIA**

De forma análoga a lo expuesto en el apartado anterior correspondiente a la retracción, en este apartado se presentan los resultados del ensayo de fluencia. En primer lugar se resumen los procedimientos de ensayo, ya expuestos en detalle en el Capítulo 3. A continuación, se presentan los resultados y se hace un análisis conjunto de los mismos. Los resultados explícitos de cada una de las series se presentan en el Anejo C.

### **6.4.1. Características específicas**

Para medir las deformaciones de los HAC bajo carga sostenida se han utilizado 2 probetas por dosificación. Dichas probetas fueron hormigonadas en el interior de una cámara climática ( $T=20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$   $HR=50 \pm 5\%$ ), desmoldeadas a las 24 horas, y curadas por inmersión en agua durante 28 días. Las deformaciones correspondientes al periodo de curado se han presentado en el apartado anterior, conjuntamente con las correspondientes a las probetas de retracción.

A los 28 días ambas probetas se pasan a la cámara climática en donde están ubicados los bastidores y, tras la preparación correspondiente, se someten a carga en serie en un mismo bastidor; las condiciones termohigrométricas en todo el periodo de carga son las correspondientes a la cámara climática. Debido a los problemas expuestos en el capítulo 3 de esta tesis, no se presentan los resultados referentes a la serie C60, como consecuencia de la pérdida de los mismos en la fase inicial del ensayo.

El análisis de los resultados que se presenta en los siguientes apartados se ha considerado que las deformaciones de fluencia se expresan por la diferencia entre las deformaciones medidas en las probetas bajo carga y las probetas sin carga (retracción). Si bien tal como señala Neville (1995) la retracción y la fluencia no son fenómenos independientes y se dan simultáneamente, en el análisis de los mismos

sobre la base de medidas experimentales se asume la hipótesis de linealidad o de superposición de efectos.

#### 6.4.2. Análisis conjunto entre las series – Fluencia

Este apartado tiene por objeto analizar los resultados del ensayo de fluencia entre las 3 series estudiadas. En primer lugar, se analizan los resultados en función de las deformaciones por fluencia; seguidamente se analizan los resultados en términos del coeficiente de fluencia y por último en función de la fluencia específica.

En la figura 6.9 se presentan los resultados para cada una de las series. Los valores de la deformación por fluencia ( $\varepsilon_d$ ) mostrados en ella se calculan a través de la relación 6.2.

$$\varepsilon_d = \varepsilon_T - \varepsilon_i - \varepsilon_r \quad [6.2]$$

donde,  $\varepsilon_T$  es la deformación bajo carga registrada en el ensayo;  
 $\varepsilon_i$  es la deformación elástica instantánea;  
 $\varepsilon_r$  es la deformación registrada en el ensayo de retracción.

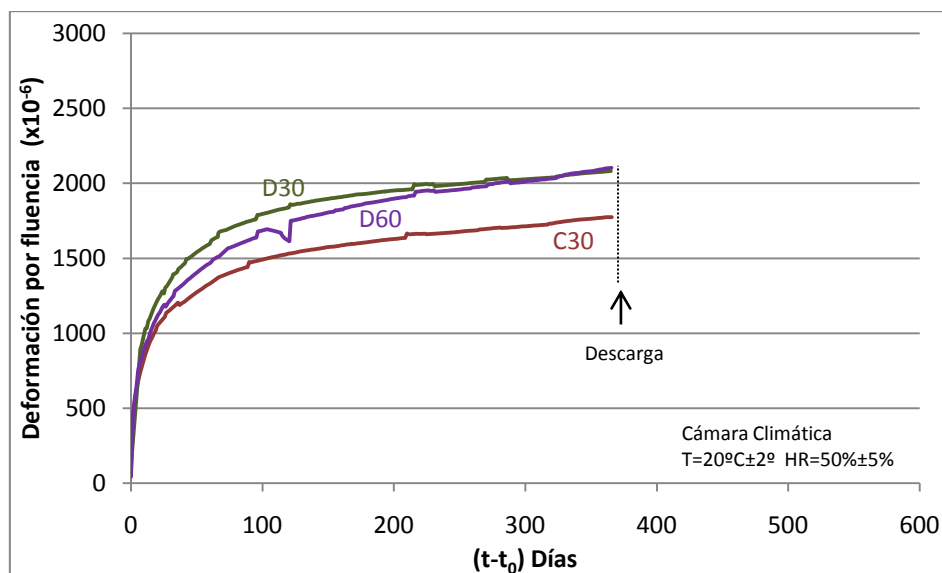


Figura 6.9 – Comparación de deformaciones por fluencia ( $\varepsilon_d$ )

Puesto que el módulo de elasticidad del hormigón aumenta con la edad, la  $\varepsilon_i$  va disminuyendo gradualmente y, según Neville (1995), la fluencia de debe tomar como una deformación que va más allá de la  $\varepsilon_i$  obtenida en el momento de la aplicación de la

carga. Para ello se ha utilizado los valores del modulo de elasticidad expuestos en el capítulo 5.

De modo general, los resultados muestran que el esqueleto granular continuo, para una misma resistencia y una misma relación agua/cemento presentan menores deformaciones por fluencia que el esqueleto discontinuo (C30 x D30); ello puede estar asociado a que el esqueleto continuo presenta un mejor empaquetamiento de los áridos que conduce a una estructura granular más rígida y, por lo tanto, a menores deformaciones cuando está sometido a carga.

Por otro lado, para un mismo esqueleto granular a diferentes resistencias (D30 x D60) se puede observar que las deformaciones por fluencias son similares, lo que nuevamente indica que el esqueleto granular tiene una gran importancia en cuanto a un limitante de deformaciones.

En la figura 6.10 se visualizan los resultados expresados en términos del coeficiente de fluencia ( $\phi$ ) y de la fluencia específica (SC); dichos valores se obtienen respectivamente según las ecuaciones 6.3 y 6.4

$$\phi = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_i} \quad [6.3]$$

$$SC = \frac{\varepsilon_d}{\sigma} \quad [6.4]$$

donde,  $\varepsilon_d$  es la deformación de fluencia;  
 $\varepsilon_i$  es la elástica instantánea;  
 $\sigma$  es la tensión aplicada (MPa)

En primer lugar, se puede observar que el esqueleto granular continuo ha presentado valores menores de  $\phi$  y de SC que el esqueleto discontinuo para la misma resistencia (30). Ello está en consonancia con lo que ya se ha comentado en términos de las deformaciones de fluencia.

Sin embargo, los valores de  $\phi$  y de SC dependen de la carga aplicada, ya sea por la deformación elástica ( $\phi$ ) o directamente por la tensión (SC). Cabe recordar que la carga aplicada ha sido correspondiente a un 40% de la resistencia a compresión, que es superior para la serie de 60 MPa (D60). Por ello, los valores de ambos coeficientes son menores para la serie D60 que la serie D30.



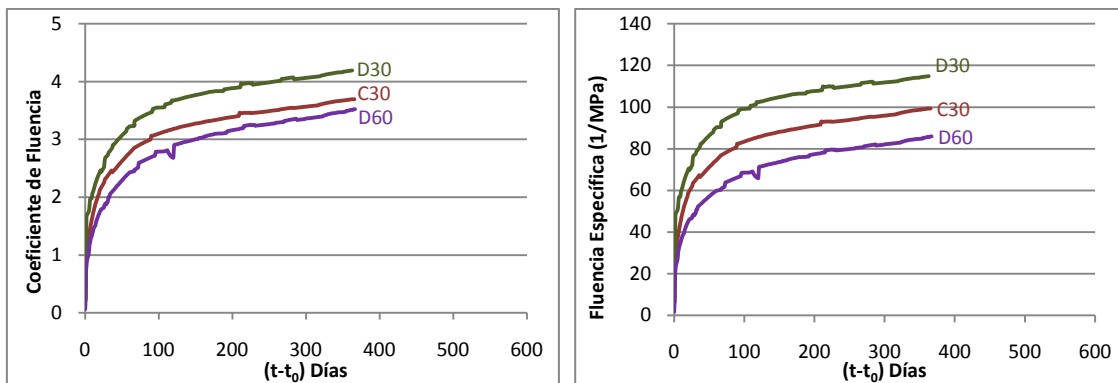


Figura 6.10 – Comparación de deformaciones  
a) Coeficiente de fluencia ( $\phi$ ) b) Fluencia Específica (SC)

Por otro lado, los valores absolutos así como el coeficiente de fluencia y la fluencia específica han resultado bastante elevados. Ello es reflejo del procedimiento de ensayo: inicialmente las probetas han sido sumergidas en agua durante 28 días y después han sido trasladadas a la cámara climática (HR=50% y 20°C). De este modo, al aplicar la carga las probetas aún presentaban una gran cantidad del agua del curado en sus poros y las medidas iniciales de fluencia reflejan la salida de esta agua. Este efecto se conoce como fluencia por secado o efecto Pickett (Pickett, 1942; Bazant y Xi, 1994) y se ha agravado por cambio de humedad impuesto a las probetas antes de la aplicación de la carga. Cabe recordar que la ASTM C512 establece un curado por 7 días, seguido de 21 días de secado (a 20°C y 50% de HR) antes de la aplicación de la carga, lo que minimiza la fluencia por secado.

En la figura 6.11 se presentan los valores de  $\epsilon_d$  y  $\epsilon_i$  medidos en la serie C30 (los resultados de las series D30 y D60, así como la explicación a detalle de dichos resultados se presentan en el anejo B).

En ella se observa que la  $\epsilon_i$  medida en la probeta (0,55 mm/m) es similar a la  $\epsilon_i$  calculada a través del módulo de elasticidad (0,5 mm/m). Sin embargo, la  $\epsilon_d$  presenta un incremento importante en las siguientes horas después de la aplicación de la carga, referente a la fluencia por secado ya comentada. Dicho incremento es tan significativo que a las 48 horas el valor de  $\epsilon_d$  es similar al de la  $\epsilon_i$  (lo que se refleja en el coeficiente de fluencia = 1).

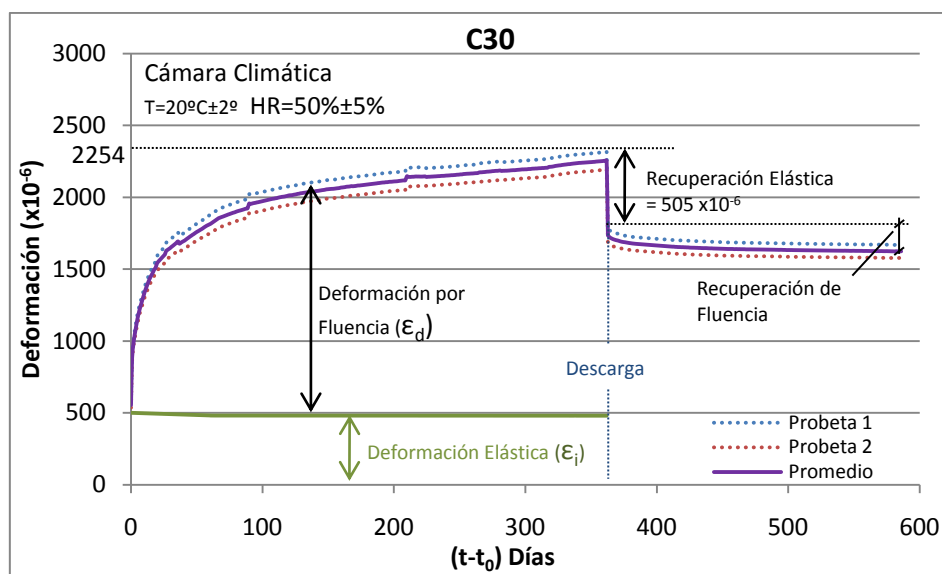


Figura 6.11 – Deformaciones bajo carga sostenida - Serie C30.

En base a los resultados obtenidos se ha realizado una proyección de los mismos en el tiempo, utilizando el programa de cálculo Curve Expert, al objeto de estimar las deformaciones bajo carga para períodos superiores al de la duración de los ensayos; los resultados de esta estimación se exponen en la tabla 6.4

Tabla 6.4 – Regresión no lineal – Fluencia

Serie	Ecuación	Parámetros			R <sup>2</sup>	Deformaciones ( $\times 10^{-6}$ m/m) (t en años):		
		a	b	c		t = 1	t = 5	t = 50
C30	$y = a \cdot \exp(b \cdot t^c)$ donde, t es el tiempo en días	2655	-2,22	-0,29	0,999	1764	2052	2324
D30		2603	-2,57	-0,41	0,998	2079	2320	2490
D60		4126	-2,58	-0,22	0,999	2091	2573	3117

En dicha tabla se presenta la ecuación utilizada para modelar la curva de los resultados promedios correspondientes a cada una de las series; cabe reseñar que la ecuación es la misma que la utilizada para la retracción. Los parámetros de dicha ecuación se exponen en las columnas a, b, c y d. En los cuatro casos el coeficiente de correlación ha sido superior a 0,99 lo que indica un buen ajuste. De este modo se ha calculado el valor de las deformaciones por fluencia para edades correspondiente a 1, 5 y 50 años.

En ella, se puede observar que la evolución de fluencia ha sido diferente entre las series de baja y alta resistencia, para las series de baja resistencia (C30 y D30) la

fluencia en el primer año representa un 85% aproximadamente de la fluencia a 50 años, mientras que en la serie de alta resistencia (D60) la fluencia representa solo un 74%. Asimismo a los 5 años, la fluencia de las series de baja resistencia se incrementa a un 95% de la fluencia a 50 años, mientras que en la serie de alta resistencia la fluencia se incrementa a un 89%. Tal como para la retracción, en la serie D60 debido al mayor contenido de cemento asociado a una menor relación agua/cemento, las reacciones de hidratación siguen desarrollándose de modo que los valores de las deformaciones siguen creciendo en mayor medida para períodos largos de tiempo, que las series de menor resistencia.

A título de comparación con otros resultados, se presenta en la Figura 6.12 la base de datos de Agranati (2008), así como los resultados obtenidos. Dicha base de datos incluye resultados de HAC y de HC.

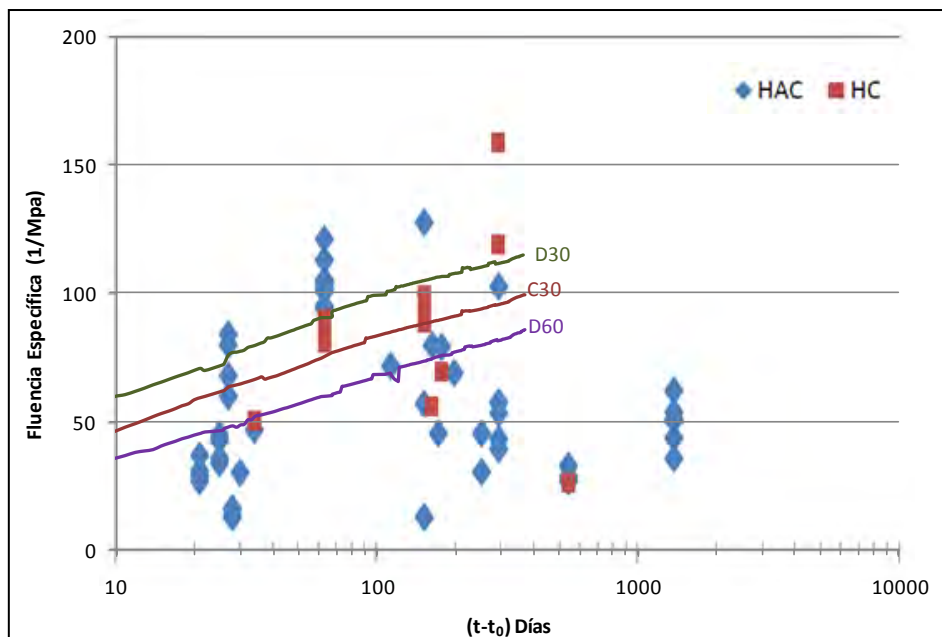


Figura 6.12 – Comparación de los resultados de fluencia con base de datos

En ella se observa que los resultados medidos están dentro del rango de deformaciones evaluadas por otros investigadores tanto para HAC como para HC. De modo general no se puede observar una diferencia clara entre HAC y HC sin considerar la composición empleada en cada caso.

#### 6.4.3. Comparación de los resultados de fluencia con las normativas

Tal como se ha realizado en los estudios de retracción, se han recogido varios modelos de cálculo existentes para calcular la fluencia de los HAC estudiados.

Los modelos utilizados en este trabajo que provienen de normativas son: EHE (1998), EHE (2008), Eurocódigo (EC-2, 2004), ACI 209 (1992), y CEB-FIP (1990). También se ha utilizado el modelo B3 de Bazant y Baweja (1995). Todos ellos presentan en detalle en el anejo C.

El modelo de cálculo del **Eurocódigo 2**, utilizado en la **EHE-08** y similar al modelo de la **EHE-98**, está basado en el modelo del CEB-FIP 1990. Para la fluencia se considera que la tensión aplicada debe ser menor a un 45% de la resistencia a compresión del hormigón. Las hipótesis presentadas en el apartado 6.3.4 también son válidas para la fluencia.

El modelo del **ACI 209R-92** es modelo puramente empírico, basado en resultados experimentales, siendo aplicable al hormigón de peso normal y a hormigón ligero con cementos tipo I y III, y curado en condiciones húmedas o con vapor. En su nivel más básico, los parámetros necesarios son: edad de puesta en carga, método de curado, humedad relativa, y relación volumen/superficie, o espesor medio, mm. Este modelo permite utilizar factores correctores que consideran el contenido de árido fino, el contenido de aire, la consistencia de la mezcla, y el contenido de cemento.

El modelo de cálculo del **CEB-FIP 90** es válido para un hormigón estructural ordinario,  $12 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 80 \text{ MPa}$ , expuesto a humedades relativas del ambiente en el rango del 40% al 100% y temperaturas de 5°C a 30°C. En el caso de la fluencia, este modelo no considera la duración ni las condiciones de curado. Los parámetros necesarios en el cálculo son: edad del hormigón en el instante de carga, humedad relativa, resistencia media a compresión del hormigón a la edad de 28 días, tipo de cemento, y espesor medio.

El **modelo B3** presenta una mayor complejidad y requiere numerosos parámetros relacionados con la dosificación de la mezcla, tal como ya se ha presentado en el apartado 6.3.8. En el caso de la fluencia la tensión aplicada debe ser menor que un 45% de la resistencia media a compresión en probetas cilíndricas. En este modelo la función de fluencia está compuesta por tres partes. La primera es la deformación instantánea del hormigón debido a una tensión unitaria, la segunda es la función de fluencia básica, y la última es la función de fluencia de secado.

De este modo, en la Figura 6.13 se presentan los valores de fluencia calculados utilizando los modelos anteriores. Para ello, se ha utilizado los parámetros expuestos al inicio de este capítulo en la tabla 6.1. En ella se puede observar que la fluencia medida es superior a la previsión de todos los modelos empleados en las tres series estudiadas.

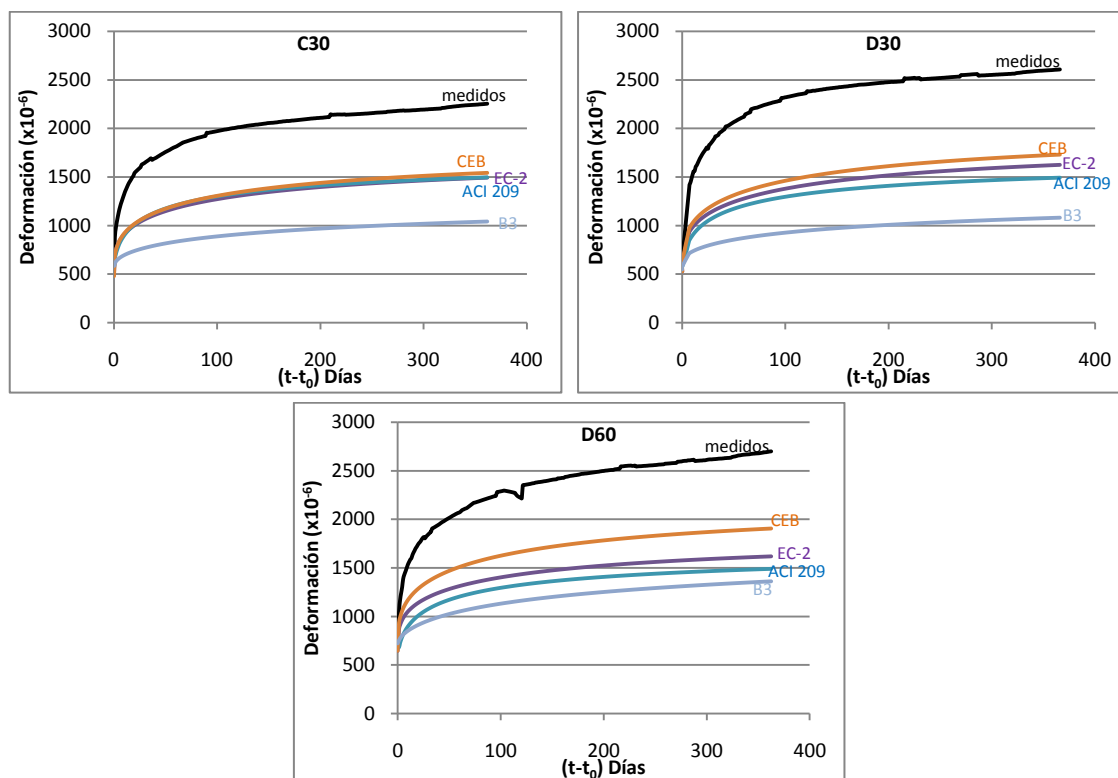


Figura 6.13 – Deformaciones de fluencia – comparación con las normativas.

De modo general, todos modelos presentan una misma forma de evolución de la fluencia, muy similar a la observada experimentalmente. Sin embargo, los valores absolutos difieren entre los mismos. Los modelos EC-2, CEB y ACI-219 presentan resultados muy similares entre sí en las series de baja resistencia. Mientras que el modelo B3 presenta resultados un 30% inferior a ellos. En la serie de alta resistencia, el modelo del CEB es el que se acerca más a los resultados medidos, mientras que los otros modelos presentan resultados similares.

# **CAPÍTULO 7:**

## **ENSAYO DE PENETRACIÓN**

### **7.1. INTRODUCCIÓN**

En los trabajos previos sobre hormigón fresco, se ha puesto de manifiesto la no existencia de ensayos normalizados de segregación (Capítulo 2) y la dificultad de medir la estabilidad de las mezclas, traducida en la resistencia a la segregación (Capítulo 4). El objeto del presente capítulo es presentar un nuevo ensayo de segregación de HAC basado en el principio de la penetración de una masa.

Para contrastar la bondad de la propuesta se hacen dos campañas de ensayos realizadas, una en la UPC, en el contexto del proyecto de colaboración con PROMSA y, otra campaña, realizada en Northwestern University, en la que se confronta los valores de la propuesta con otros ensayos de segregación. Ahora bien, dado que este tema no se ha tratado en el capítulo 2 del estado del conocimiento, en la primera parte de este capítulo se detallan los principales ensayos referenciados en la bibliografía

para medir la segregación, los cuales se utilizan posteriormente en la campaña de contrastación.

## **7.2. ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA SEGREGACIÓN**

### **7.2.1. Planteamiento metodológico**

Una elevada resistencia a segregación significa que los áridos estén uniformemente distribuidos en la mezcla tanto en dirección vertical como en horizontal. Dicha propiedad tiene un papel importante en los HAC, puesto que la presencia de segregación puede generar un bloqueo de los áridos alrededor de las armaduras y una mayor retracción por secado, así como una distribución no uniforme de resistencias y deformaciones.

En los últimos años se han desarrollado diferentes investigaciones con el fin de determinar de forma sencilla y fiable la resistencia a la segregación de un HAC. Las propuestas para determinar la uniformidad de la mezcla pueden clasificarse en dos grandes grupos: los que se realizan en hormigón fresco y los que se realizan en hormigón endurecido (Valcuente et al, 2007).

Por lo que respecta a los ensayos en hormigón endurecido, lo más habitual es analizar la posición de los áridos gruesos, ya sea viendo su distribución a lo largo de la pieza, o simplemente midiendo la distancia a la cara superior de hormigonado de los situados más cerca de ella (Gomes, 2002; Lowke *et al*, 2003; Bartos, 2005). Sin embargo, dichos ensayos no tienen sentido cuando el objetivo es conocer la resistencia a la segregación antes de la puesta en obra. Por ello, en este estudio se ha ahondado en el tema de los ensayos en fresco como un criterio potencial de aceptación.

### **7.2.2. Ensayos en fresco**

Para que un ensayo pueda emplearse como criterio de aceptación del hormigón en obra no debe requerir aparatos muy complejos, como puede ser a modo de ejemplo un reómetro. Entre las propuestas encontradas en la bibliografía se destacan tres ensayos:

- Columna de segregación (*settlement column segregation*) – ASTM C1610:2007)

- Ensayo de estabilidad de tamiz GMT (*sieve stability test*), propuesto por el contratista francés GMT (EFNARC, 2002) (Bartos, Sonebi, y Tamimi, 2002), (AFGC, 2002); (BIBM *et al*, 2005).
- Ensayo de penetración (*penetration test*), propuesto por Bui *et al* (2002).

El ensayo de la **columna de segregación** (ASTM C1610) consiste en comparar la cantidad de árido localizada en los extremos superior e inferior de una probeta cilíndrica de 660 mm de altura y 200 mm de diámetro, tal como se muestra en la Figura 7.1. Ello responde a que si hay segregación los áridos gruesos tienden a concentrarse en la parte inferior.

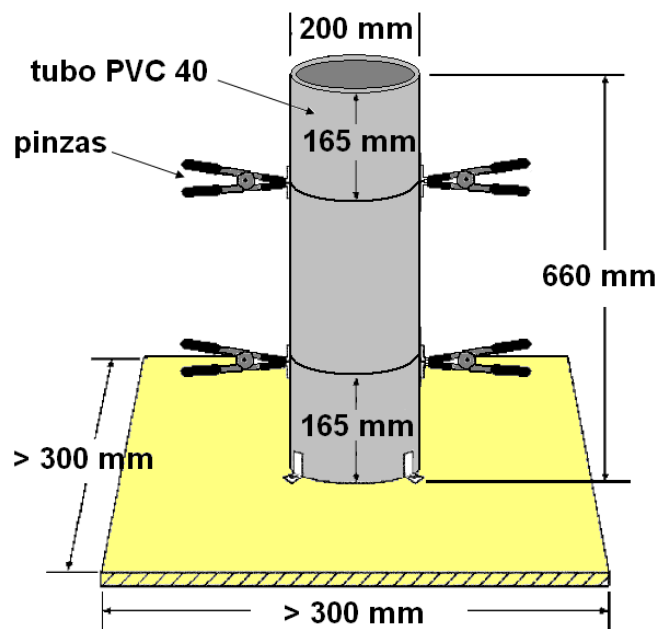


Figura 7.1 – Columna de segregación – ASTM C1610

El procedimiento es llenar la columna cilíndrica y dejar el hormigón reposar por 15 minutos. A continuación se toma las muestras de las partes superior e inferior, lavándolas en un tamiz de 5 mm de apertura. Para tomar las muestras se utiliza un plato colector, según la Figura 7.2. Se acopla el plato en la columna y se desplaza la parte superior para ello. En la misma figura 7.2 se puede ver el aparato utilizado en este estudio con su plato.

La resistencia a segregación se expresa a través de la relación entre el peso de áridos de la parte superior y de la parte inferior. Una relación baja indica que los áridos están concentrados en la parte inferior y que existe la posibilidad de segregación.



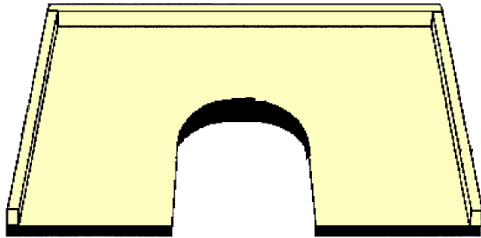


Figura 7.2 – Plato colector y columna empleada.

Para realizar dicho ensayo es necesario, además de la columna de segregación, un tamiz de 5 mm apertura, agua en cantidad suficiente para lavar las muestras y una báscula; ello hace que su aplicación en obra no sea tan sencilla como la del ensayo de escurrimiento.

En el **método de ensayo de estabilidad de tamiz GMT** (Figura 7.3). se toma una muestra de 10 litros de hormigón, se la deja reposar durante 15 minutos. Con posterioridad se vierten 5 kg sobre un tamiz (cilíndrico de apertura de malla 5 mm y 350 mm de diámetro) que se encuentra encima de una báscula. Pasados dos minutos se pesa el mortero que ha pasado a través del tamiz y se expresa como porcentaje de la muestra vertida. Este ensayo, si bien sencillo, no es rápido y requiere una báscula precisa, de modo que quizá no resulte adecuado para utilizarse en obra de forma sistemática (EFNARC, 2002).



Figura 7.3 – Método de ensayo de estabilidad de tamiz GMT

El **ensayo de penetración** consiste en medir la penetración de un cilindro hueco metálico de 54 gr en la superficie del HAC, empleando una estructura de soporte que permita un movimiento vertical del cilindro, tal como se muestra en la figura 7.4. Si la penetración medida es inferior a 8 mm, el hormigón presenta una buena resistencia a la segregación; mientras que si es superior a 8 mm, se considera una baja resistencia a la segregación.

Dicho ensayo es simple, rápido y de fácil aplicación, con lo que puede ser utilizado en obra. El único problema observado es la escala de medidas; en un laboratorio se tiene la precisión para trabajar en la escala de los milímetros, pero en obra no se tiene la misma precisión, por ello hay que pensar en trabajar en la escala de los centímetros de cara a proponer un nuevo método.

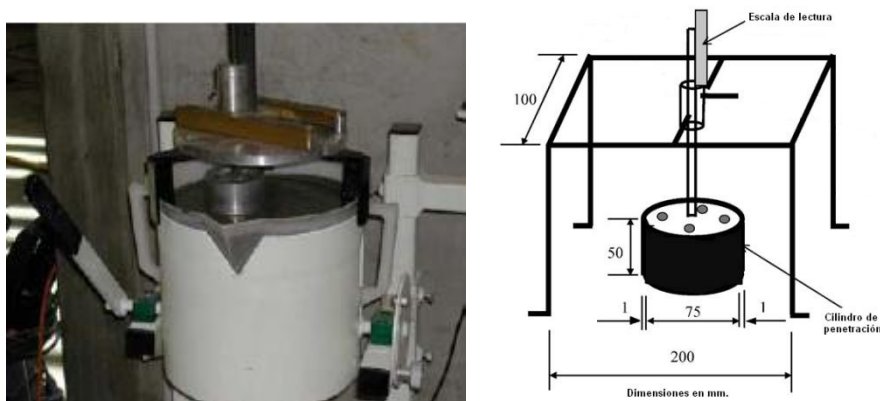


Figura 7.4 – Ensayo de penetración (Bui et al, 2002)

### 7.3. ENSAYO DE PENETRACIÓN UPC – PROMSA

#### 7.3.1. Estudios preliminares

El procedimiento propuesto consiste en dejar penetrar en la superficie del hormigón un cilindro de acero galvanizado, tal como se ilustra en la Figura 7.5. Este cilindro posee un diámetro de 6 cm y un peso de 330 gr. En este caso, la presión ejercida en la superficie del hormigón es de 1,15 MPa.

Dicho cilindro trabaja principalmente por la resistencia ejercida en toda su superficie (efecto de punta) a diferencia del ensayo de penetración (Bui et al, 2002) que trabaja principalmente por las tensiones tangenciales ejercidas en las paredes laterales del cilindro (que es hueco – no tiene fondo).



Figura 7.5 –Cilindro empleado en el posible ensayo de segregación del HAC

Esta propuesta se ha aplicado en la serie C3 de la primera campaña experimental, tal como se ha presentado en el Capítulo 3. Los valores de penetración obtenidos en ella se presentan en la Tabla 7.1. En ella, puede verse que los resultados muestran una buena correlación con el contenido de agua del hormigón, por lo que en primera instancia apuntan hacia una potencial correlación con la resistencia a segregación.

Tabla 7.1 – Resultados del ensayo propuesto

Amasada	Contenido de agua (l/m <sup>3</sup> )	Agua/finos	H medido (cm)
1 <sup>a</sup>	172	0,382	1,5 – 2,0
2 <sup>a</sup>	182	0,404	3,0 – 3,5
3 <sup>a</sup>	192	0,427	4,0
4 <sup>a</sup>	197	0,438	5,2

Considerando un líquido homogéneo de misma densidad que el hormigón, el cilindro quedaría estable para una penetración de aproximadamente 4,8 cm, según el principio del empuje de Arquímedes, tal como se ilustra la Figura 7.6; en ella también se muestra el resultado del cilindro en la 4<sup>a</sup> amasada.



Figura 7.6 – Ensayo de penetración a) Principio de Arquímedes  $P=E$  b) Resultado 4ª amasada.

En la Figura 7.7 se muestra la comparación del valor calculado con los resultados medidos. En ella se observa que el valor calculado está situado entre las amasadas con relación agua/finos de 0,427 (3ª) y 0,438 (4ª), coincidiendo con la apreciación visual que ha detectado segregación en la 4ª amasada.

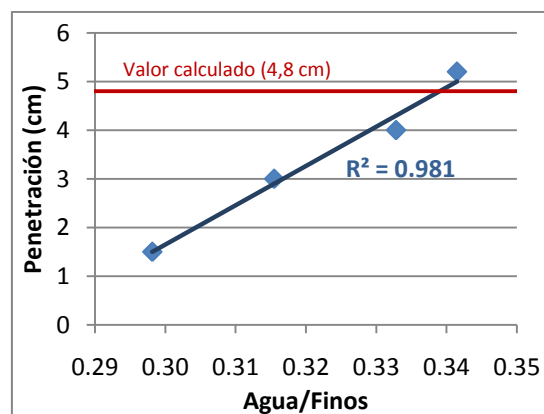


Figura 7.7 – Resultados preliminares del ensayo propuesto

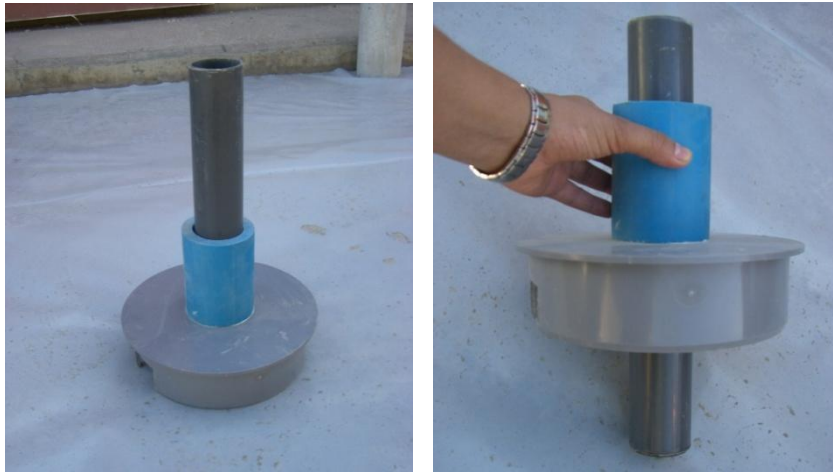
Los resultados obtenidos y la dificultad de mantener el cilindro en posición vertical y centrada en la probeta durante todo el ensayo, dieron lugar a un nuevo estudio para poder reproducir el mismo ensayo, de modo que los resultados no dependiesen de la persona que lo ejecutara.

### 7.3.2. El diseño del aparato

El diseño del aparato se ha realizado en base a garantizar por un lado la estabilidad vertical del cilindro al penetrar en el hormigón y, por otro, su centralidad en una probeta de 15 cm de diámetro. El aparato, tal como se muestra en la Figura 7.8, está compuesto por un anillo que se encaja en una probeta de 15 cm. de diámetro, y

por un el cilindro central de 5 cm de diámetro y 250 g de peso, hueco y con fondo. El cilindro se desplaza libremente en la dirección vertical.

El peso del cilindro se ha ajustado a 250 g para mantener el mismo orden de magnitud de los resultados obtenidos anteriormente, lo que representa una tensión en la superficie del hormigón de 1,27 MPa.



*Figura 7.8 – Aparato propuesto para el ensayo de segregación*

Una vez hormigonada la probeta se deja estabilizar durante 2 minutos, se acopla el anillo y el cilindro, de modo que este apenas toque la superficie del hormigón; a continuación se libera el cilindro hasta que este se estabilice. Se retira todo el conjunto de una vez para medir la penetración del cilindro en el hormigón según se muestra en la Figura 7.9.



*Figura 7.9 – Ensayo de segregación*

Utilizando el principio del Empuje de Arquímedes, para un líquido homogéneo de densidad 2,4 gr/cm<sup>3</sup>, el cilindro quedaría estable a una profundidad de 5,3 cm.

#### 7.4. CAMPAÑA DE CONTRASTACION UPC

Para la comprobación del nuevo diseño del aparato se realizó en el contexto de la tercera campaña experimental las pruebas referentes al ensayo propuesto. En la Tabla 7.2 se muestran los dos tipos de dosificación estudiados. Para cada dosificación se han realizado 5 amasadas con contenidos de agua distintos: 172, 177, 182, 187 y 192 l/m<sup>3</sup> para la dosificación “C4” y 172, 175, 177, 182 y 192 l/m<sup>3</sup> para la dosificación “D4”. Los resultados referentes a la caracterización de los HAC estudiados ya se han presentado en el Capítulo 4, y por lo tanto en este apartado sólo se incide en los resultados relacionados con el ensayo de segregación.

Tabla 7.2 – Dosificaciones empleadas

	C4	D4
Arena 0–4 mm	976	926
Garbancillo 5/12 mm	505	168
Gravilla 12/20 mm	292	674
Agua teórica	182	182
Melcret PF–75 (g)	2,70	2,70
Glenium C303 SCC	8,73	8,73
CEM II A–L 42,5R	450	450
Finos (kg/m <sup>3</sup> )	602	590

Terminado el proceso de amasado (descrito en el capítulo 3), el proceso de realización de los ensayos fue el siguiente:

1. Realizar el ensayo de extensión de flujo
2. Realizar el ensayo de extensión de flujo con anillo
3. Medir la densidad del hormigón fresco
4. Retornar el hormigón a la amasadora y mezclar durante 30 segundos
5. Realizar las medidas reológicas del hormigón (tensión umbral “ $\tau_0$ ” y viscosidad plástica “ $\eta$ ”)
6. Retornar el hormigón en la amasadora y mezclar durante 30 segundos
7. Moldear las probetas
8. Medir la penetración en una probeta.



La campaña experimental se ha realizado en dos días consecutivos. En el primer día (16-10-2007) se realizaron las 5 amasadas correspondientes a la dosificación C4, mientras que en el segundo día (17-10-2007) se realizaron las 5 amasadas correspondientes a la dosificación D4.

Los resultados de las medidas de penetración (en cm) se presentan en la Tabla 7.3. En ella también se incluyen los resultados del ensayo de escurrimiento y de los parámetros reológicos (tensión umbral y viscosidad) para realizar un análisis conjunto con los resultados del ensayo propuesto.

Tabla 7.3 – Resultados del ensayo de penetración

	C4					D4				
<b>Agua (l/m<sup>3</sup>)</b>	<b>172</b>	<b>177</b>	<b>182</b>	<b>187</b>	<b>192</b>	<b>172</b>	<b>175</b>	<b>177</b>	<b>182</b>	<b>192</b>
agua/finos	0,298	0,307	0,315	0,324	0,333	0,306	0,311	0,314	0,323	0,341
Penetración (cm)	0,4	2,2	1,5	1,8	1,5	0,8	1,25	1,5	2,2	3,5
Escurrimiento (cm)	60,5	62	67,5	76	78,5	57	66,5	68	72	77,5
Tensión Umbral (Pa)	14,57	12,42	11,22	11,42	7,96	53,53	8,54	12,23	18,20	3,66
Viscosidad (Pa.s)	103,52	78,08	83,48	52,48	41,05	93,15	104,14	85,28	54,73	47,96

En la Figura 7.10 se muestran esos resultados de forma gráfica. En ella se observa que los resultados de la serie D4 conducen a un ajuste lineal muy preciso ( $R^2=0,9995$ ) en función de la relación agua/finos, tal como se había observado en los estudios previos.

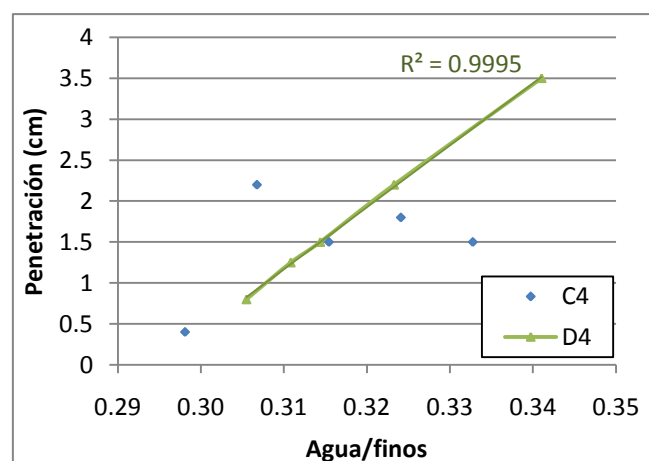


Figura 7.10 – Resultados del ensayo de penetración

En ella, se observa que los valores de penetración medidos en la serie C4 presentan grandes variaciones, las cuales no representan ni la segregación de la

mezcla ni están relacionadas con el contenido de agua presente. Estos resultados son contrarios a los obtenidos en el ensayo preliminar para la misma dosificación y también son contrarios a los resultados obtenidos para la serie D4.

Al realizar las medidas de penetración en esta serie se ha observado una resistencia superficial del hormigón, que impedía penetrar el cilindro, la cual puede ser fruto del elevado tiempo (30 - 50 minutos) transcurrido desde el aporte de los aditivos al hormigón, debido al tiempo necesario para el ensayo de reología, que fue distinto en cada serie. Además, los procedimientos de mezclado de las etapas 4 y 6 (referentes al retorno del hormigón a la amasadora), ya explicados anteriormente, pueden haber influido en los resultados. Por ello, en el segundo día se optó por medir la penetración en el cilindro utilizado para el ensayo de densidad en fresco, en la etapa 3 de los procedimientos de ensayos, evitando estos efectos.

Por otro lado, las mejoras del procedimiento del ensayo introducidas posteriormente se reflejan en la serie realizada con el esqueleto granular discontinuo (D4). El ajuste de los resultados mediante una regresión lineal conduce a un coeficiente de correlación de 99,9%.

La segregación de la mezcla D4 fue observada visualmente y en el ensayo reológico al realizar la amasada con 192 l/m<sup>3</sup> de agua, tal como se muestra en la Figura 7.11. En ella se observa que los áridos gruesos no llegan hasta el borde de la “torta” de hormigón, formando un labio de avance superior a los 10 mm en donde sólo hay pasta.

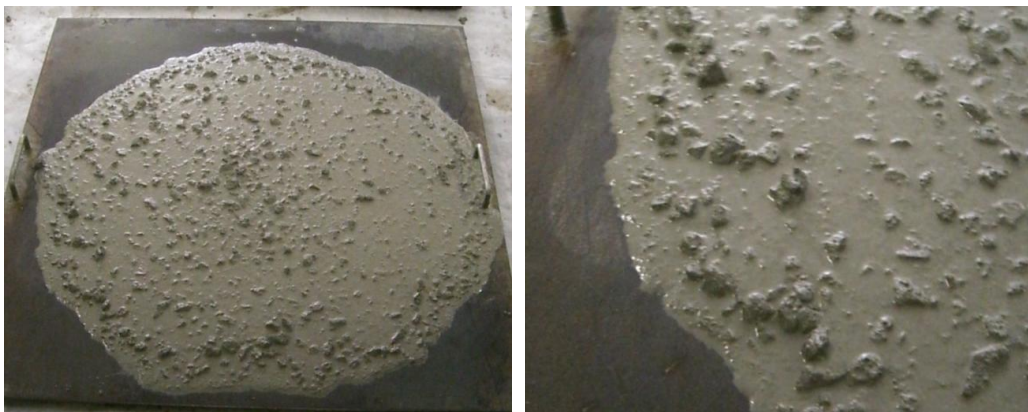


Figura 7.11 – Ensayo de escurrimiento – Serie D4–192

Asimismo, el valor presentado en el ensayo de penetración en esta serie (D4-192) fue de 3,5 cm, inferior al previsto de 5,3 cm. Ello puede ser fruto de que el valor de la penetración depende, además del efecto del empuje (efecto de punta), de un



efecto de pared (efecto de fuste) no considerado en la previsión inicial, tal como se muestra en la figura 7.12.

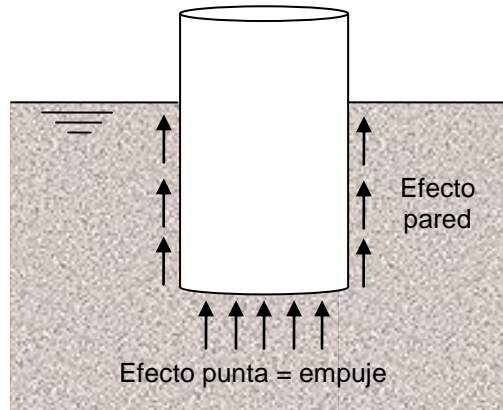


Figura 7.12 – Efectos que actúan en el ensayo propuesto

Dicho efecto actúa en el sentido de dificultar la penetración del cilindro, reduciendo de esta forma el valor de la penetración. Por ello que se hace necesario ajustar el valor a partir del cual se puede considerar el hormigón segregado.

Asimismo, en la Figura 7.13 se puede ver la comparación entre los resultados obtenidos en el ensayo preliminar en la serie C3 y los resultados obtenidos en esta campaña para la serie D4. En ella, se puede observar que ambas curvas presentan pendientes similares, desplazadas verticalmente, lo que indica que hay una relación entre los valores medidos en cada caso. Hay que resaltar que ambos ensayos presentaron el mismo nivel de tensión ejercido por el cilindro, lo que posiblemente condujo a la misma pendiente de la recta.

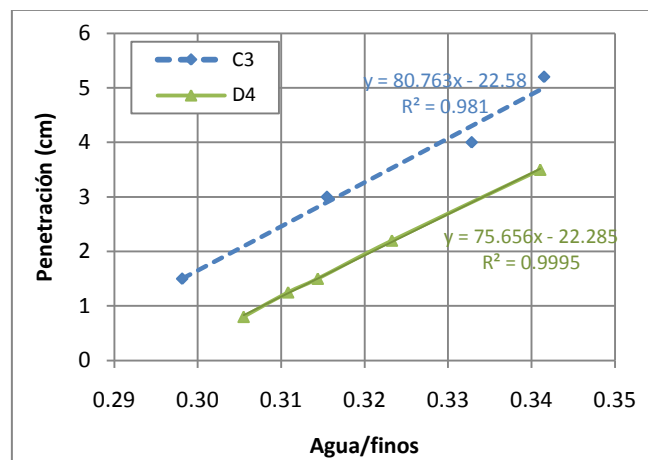


Figura 7.13 – Resultados del ensayo de penetración

La diferencia en los valores de penetración (es decir, diferente coordenada de la recta de regresión lineal en el origen) debe estar asociada probablemente al diámetro del cilindro, y quizá a la cantidad de árido grueso. Ya que las dos dosificaciones presentaban distintas cantidades de árido de 20 mm. Para confirmar estas hipótesis se hace necesarios más resultados experimentales.

En la figura 7.14 se analiza la relación existente entre los resultados del ensayo propuesto y los parámetros reológicos de tensión umbral y viscosidad presentados con anterioridad (Tabla 7.3 y capítulo 4). En ella puede verse que los valores del ensayo propuesto presentan una correlación lineal con la viscosidad de la mezcla; para una mayor viscosidad se obtiene una menor penetración. Sin embargo, dicha relación no se aprecia cuando se trata de la tensión umbral.

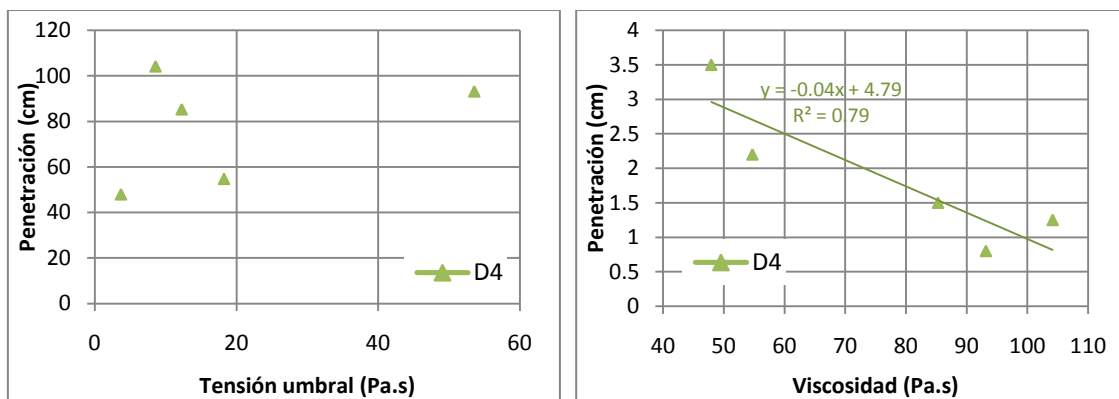


Figura 7.14 – Resultados del ensayo de penetración– Serie D4

Este resultado parece razonable ya que el ensayo de penetración mide en este sentido el rozamiento dinámico el cual está más relacionado con la viscosidad.

## 7.5. CAMPAÑA DE CONTRASTACIÓN

Esta campaña experimental tiene como objetivo comparar el ensayo propuesto con otros ensayos de segregación existentes en la bibliografía. Dicha campaña ha sido realizada en el laboratorio del “Center for Advanced Cement–Based Materials (ACBM)” de la “Northwestern University” ubicado en Evanston, Illinois E.E.U.U.

### 7.5.1. Dosificaciones

Para el desarrollo de dicho estudio, se ha fabricado la cantidad de 720 litros de hormigón, dividida en 18 amasadas de 40 litros. Las dosificaciones empleadas se muestran en la Tabla 7.4. Hay que resaltar que el objetivo de esta campaña es

comparar los métodos de ensayo para medir la segregación, de modo que se ha trabajado con dosificaciones diferentes y en diferentes estados de segregación. También responde a las diferentes condicionantes del laboratorio donde se realizaron estos ensayos.

Tabla 7.4 – Dosificaciones empleadas (kg/m<sup>3</sup>)

	Cemento	Cenizas Volantes	Grava	Arena	Agua total	Agua Absorción	Agua mezcla	a/f*	SP*	AMV*
AGR-0	360	150	790	890	180	37	143	0,28	6,1	2,05
AGR-10	360	150	790	890	170	37	133	0,26	6,1	2,05
AGR-20	360	150	790	890	160	37	123	0,24	6,1	2,05
AF0%CO	380	0	880	800	205	37	168	0,44	15,2	0
AF0%	266	114	880	800	205	37	168	0,44	1,5	0
AF2%	266	114	880	800	205	37	168	0,44	10,2	7,6
AF2%R	266	114	880	800	205	37	168	0,44	10,2	7,6
AF4%	266	114	880	800	205	37	168	0,44	13,1	15,2
AF10%	266	114	880	800	205	37	168	0,44	12,3	38,0
T1	570	0	780	850	235	36	199	0,35	3,2	3,8
T2	570	0	780	850	235	36	199	0,35	9,5	10,1
T3	570	0	780	850	235	36	199	0,35	7,5	11,4
T4	570	0	780	850	235	36	199	0,35	6,3	11,4
T5	570	0	780	850	235	36	199	0,35	5,0	11,4
T6	400	170	780	850	235	36	199	0,35	3,2	3,8
T7	570	0	780	850	235	36	199	0,35	3,2	3,8
M1	355	152	780	880	235	37	198	0,39	2,70	3,8
M2	355	152	780	880	185	37	148	0,29	2,70	0

\* a/f = Relación agua/finos \* SP = Superplastificante \* AMV = Aditivo Modificador de Viscosidad

Los componentes comunes a todas las dosificaciones son: el tipo de cemento (Lafarge tipo I 42,5R), la arena (0–4 mm caliza de machaqueo) y el aditivo superplastificante (tipo policarboxilato – Grace ADVA 360). Las características específicas de los materiales empleados en dicha campaña experimental se presentan de forma detallada en el anejo A.

Asimismo, cabe resaltar que, para controlar la humedad de los áridos se les ha sometido a un proceso de secado y, posteriormente se ha añadido a la mezcla el volumen correspondiente al agua de absorción de los áridos. El proceso de secado consiste en mantener el material en estufa (110°) durante un período de 24 horas, y un posterior enfriamiento natural en el interior del laboratorio de un mínimo de 24 horas antes de la fabricación del hormigón.

Las dosificaciones empleadas en este estudio pueden dividirse en cuatro grupos en función de los materiales empleados:

- Las AGR – árido grueso calizo rodado de 19 mm; ceniza volante clase C (ASTM C618–08a) y AMV RHEOMAC 362 del fabricante Master Builders (anejo A). El objetivo de esta serie es analizar como miden los diferentes ensayos la variación del contenido de agua.
- Las AF – gravilla (“*pea gravel*” – tipo de árido calizo rodado de tamaño máximo de 12 mm); cenizas volantes clase C (ASTM C618–08a) y AMV Grace VMAR–3 (anejo A). El objetivo de esta serie es analizar la influencia de los aditivos en las respuestas de los diferentes ensayos manteniendo constante el valor del escurrimiento (70 cm), cambiando el porcentaje de AMV (0%, 2%, 4% y 10%) y, consecuentemente, el porcentaje de superplastificante necesario.
- Las T son dosificaciones teóricas cuyo objetivo es analizar la influencia del árido grueso en las diferentes formas de medir la segregación. Se ha empleado un árido grueso discontinuo (anejo A) con elevado porcentaje del diámetro 19 mm (con excepción de la dosificación T7 en que se ha empleado la gravilla “*pea gravel*”), y AMV Grace VMAR–3. No se han empleado finos, por lo que el contenido de cemento ha sido elevado ( $570 \text{ kg/m}^3$ )
- Las M – gravilla (“*pea gravel*”); cenizas volantes de clase F (ASTM C618–08a); AMV Grace VMAR–3. El objetivo de estas dosificaciones es analizar la influencia del contenido de agua. Estas dosificaciones presentaron una estabilidad visual muy buena en las amasadas previas de 8 litros, pero al realizar los ensayos en la amasada de 40 litros mostraron señales de segregación.

### 7.5.2. Resultados y análisis

En la tabla 7.5 se resume los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos de segregación, en este sentido los detalles de cada ensayo se presentan en el Anejo D. En dicha tabla se marcan los valores que indican la segregación de la mezcla de acuerdo con los criterios establecidos para cada ensayo:

- Penetración Bui:  $> 8 \text{ mm}$ ;
- Tamiz: SR  $> 15\%$  (Clase SR2 según BIMB *et al*, 2005);
- Columna R  $> 0,900$  (Cussigh y Bonnard, 2004).

Tabla 7.5 – Resumen de los resultados de los ensayos de segregación

Ensayo	Escur. D (cm)	Segregación visual	Columna ASTM 1610 R	Tamiz SR (%)	Penetración Bui et al, 2002 (mm)	Ensayo propuesto (mm)
AGR-0	72	no	0,900	22	17	48
AGR-10	70	no	0,899	9	12	45
AGR-20	67	no	0,905	3	4	42
AF0%C0	77	si	0,188	24	45	60
AF0%	70	si	0,882	8	6	47
AF2%	71	no	0,947	5	9	38
AF2%R	71	si	0,881	11	16	47
AF4%	71	si	0,822	12	15	48
AF10%	66	no	0,864	13	16	45
T1	52	no	0,888	15	3	18
T2	75	si	0,748	28	20	41
T3	70	si	0,587	8	12	41
T4	60	no	0,760	7	4	20
T5	58	no	0,710	0	2	13
T6	68	si	0,668	44	10	44
T7	56	no	0,891	3	5	22
M1	70	si	0,874	22%	5	46
M2	75	si	0,689	18%	40	50

En base a estos criterios se puede decir de modo general que los valores de penetración del ensayo propuesto:

- < 40 mm, las series no han presentado segregación;
- > 45 mm, las series han presentado segregación;

En base a ello se puede decir que el límite del ensayo está situado entre 40 y 45 mm, aunque puede ser diferente para cada serie en función de las características específicas de cada una, como puede ser la viscosidad de la mezcla y el contenido de árido grueso.

Para comparar el resultado obtenido en el ensayo propuesto y los demás ensayos realizados en la Figura 7.14 se presentan los gráficos que correlacionan dichos resultados. En ella se observa que se puede correlacionar el ensayo propuesto con el ensayo del tamiz y de penetración a través de una función exponencial mientras que no se logra una correlación con el ensayo de la columna.

La forma de la función de correlación entre el ensayo del tamiz y el propuesto, responde a que en una primera etapa (inicio de la segregación) los valores de dichos ensayos se incrementan de forma proporcional, mientras que para valores de segregación más elevados dicha correlación cambia. Por un lado, el ensayo propuesto presenta un valor máximo, a partir del cual el cilindro flota en la superficie del hormigón no aumentando la penetración con la segregación extrema. Por otro lado, el ensayo del tamiz presenta resultados que aumentan con la segregación hasta un valor de un 100%, que representaría un caso extremo en que no haya ningún árido (> 5 mm) en la muestra de hormigón vertida en el tamiz.

Asimismo, la correlación con el ensayo de penetración presenta la misma forma, con una primera etapa con valores en ambos ensayos que se incrementan de forma proporcional. En este caso, para una segregación extrema el aparato de Bui sigue penetrando en la superficie del hormigón hasta un valor que depende de la configuración del ensayo (por ejemplo el límite de la barra que cuelga el aparato), sin ningún sentido físico en cuanto a la segregación.

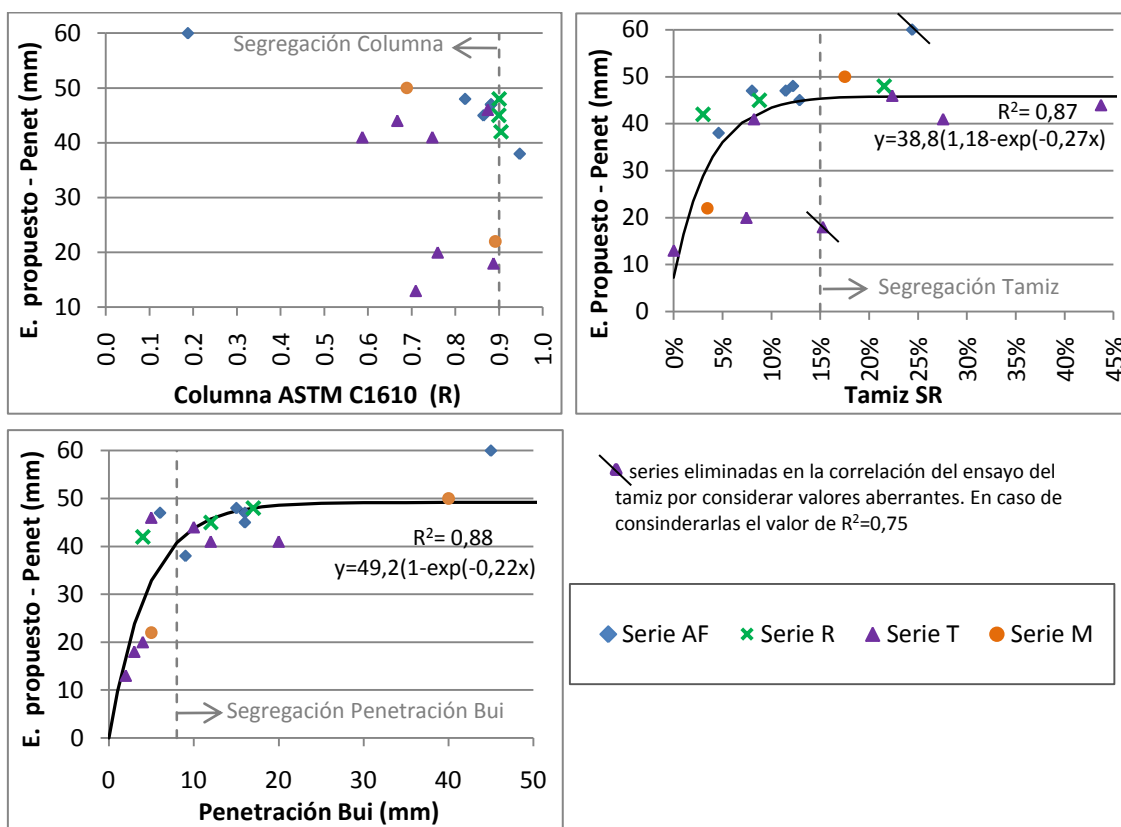


Figura 7.15 – Comparación del ensayo Propuesto X Columna, Tamiz y Penetración.

En base a los límites de segregación dados anteriormente se obtiene los límites para el ensayo propuesto; así para un valor de SR = 15% en el ensayo del tamiz se

obtiene un valor de 44 mm en el ensayo propuesto mientras que para una penetración de 8 mm se obtiene un valor de 41 mm. Se nota que los ambos valores son muy similares.

Ahora bien, considerando también los resultados previos obtenidos en la 3ª campaña experimental realizada en la UPC (apartado 7.4) se puede ampliar el análisis de los resultados. Hay que recordar que los materiales empleados en ella son totalmente diferentes a los empleados en las distintas series analizadas en esta 4ª campaña realizada con materiales de los EEUU.

En la serie D4 se ha detectado la segregación en la mezcla (D4–192) con una penetración de 35 mm; valor inferior a los obtenidos para las demás series. En base a que se puede concluir que el ensayo propuesto no presenta un límite único para todas las dosificaciones.

Para poner en evidencia los distintos límites del ensayo de penetración propuesto, se muestra en la Figura 7.15 la relación con el escurrimiento.

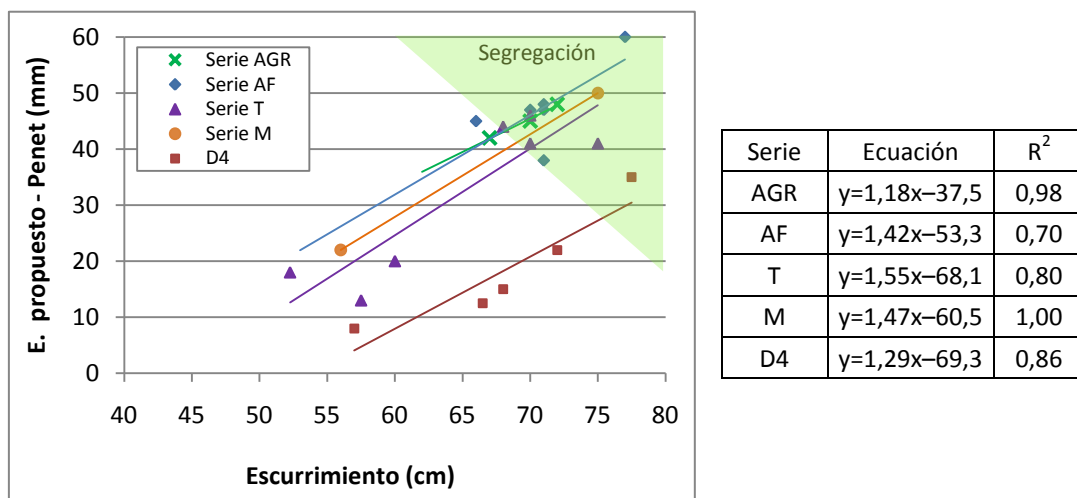


Figura 7.16 – Ensayo propuesto X escurrimiento.

En ella se observa que las diferentes dosificaciones presentan una correlación lineal del ensayo propuesto con el escurrimiento, presentando pendientes similares en todos los casos desplazadas verticalmente. Ello refleja que los resultados del ensayo de penetración no dependen solo del valor del escurrimiento pero también de alguna característica específica de cada serie, como podría ser la viscosidad de la mezcla. Dichos resultados son coherentes, ya que la segregación no se puede correlacionar

directamente con el escurrimiento, sino depende de las características de cada dosificación.

Para establecer el valor máximo de penetración en cada caso se hace necesario determinar la zona de segregación marcada en verde en la anterior figura, en ella se ha graficado de modo aproximado en base a los resultados de los otros ensayos. Para lograr dicho objetivo son necesarios más estudios para determinar cuál es la propiedad de la dosificación responsable por los desplazamientos verticales obtenidos en la anterior figura.

De esta forma se concluye que el ensayo propuesto puede ser empleado como parámetro de aceptación en relación a la segregación del HAC asociado al ensayo de escurrimiento. Los valores límites para cada dosificación se deben ajustar mediante una calibración previa, que se realiza una única vez, y del mismo modo se puede especificar un valor de penetración requerido. A modo de ejemplo, se puede definir los criterios de aceptación de un HAC como:  $D = 65 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ ; penetración =  $30 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ . Si no se cumple uno de ellos no se acepta el hormigón. Dicho ensayo puede ser muy útil en una aplicación en que el volumen de HAC es elevado y se fabrica en distintas amasadas, o bien, en una producción industrial como es el caso de los prefabricados.





## **CAPÍTULO 8:**

# **CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN**

### **8.1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se exponen en primer lugar, las conclusiones que se derivan de los distintos estudios desarrollados a lo largo de este trabajo. Estas conclusiones se presentan en forma de conclusiones generales y de conclusiones específicas.

Las conclusiones generales responden al cumplimiento de los objetivos principales que han guiado el desarrollo de la tesis. Estos, se han centrado en el estudio de la influencia del esqueleto granular del hormigón autocompactante, asociado al sistema de puesta en obra, en el comportamiento del hormigón. Este estudio se ha abordado desde distintas vertientes contemplando de forma dual el comportamiento en estado fresco y el comportamiento en estado endurecido, éste último, tanto a nivel instantáneo como a nivel diferido.

Las conclusiones específicas obedecen a distintos aspectos concretos referentes a los estudios que se han realizado encaminados a conseguir los objetivos propuestos.

Finalmente, se presentan las diferentes líneas futuras de investigación que han surgido en el transcurso del presente trabajo, ya sean al no haber cerrado alguna de ellas en la presente tesis, por la gran dimensión de las mismas o bien, por haber aparecido algunos caminos nuevos en el desarrollo del trabajo.

## 8.2. CONCLUSIONES GENERALES

Como consecuencia de dicho estudio las conclusiones principales son las siguientes:

- En base a los dos tipos de esqueletos granulares estudiados (continuo x discontinuo), asociados a diferentes tipos de puesta en obra (vertido directo x bombeo), se concluye que:
  - El esqueleto granular continuo presenta menor tendencia a segregarse; ello se debe a que los áridos más pequeños, forman una malla que evita parcialmente el descenso de los más grandes. En el caso de granulometrías discontinuas, la falta de tamaños de árido intermedios, aumenta la posibilidad de segregación.
  - El esqueleto granular continuo presenta propiedades mecánicas ligeramente superiores para un mismo nivel de resistencias; lo cual puede ser reflejo de una estructura más rígida y con un mejor engranamiento de los áridos.
  - La influencia del tipo de esqueleto granular ha sido similar en los niveles de resistencia estudiados (30 y 60 MPa);
  - Ambos tipos de esqueletos granulares conducen a hormigones adecuados por lo que no parece que exista una forma única de dosificar HAC, sino que hay que atender al sistema de puesta en obra, de acuerdo con la hipótesis inicialmente planteada.
- El ensayo de escurrimiento puede conducir a errores importantes en la evaluación de la segregación de HAC principalmente en la gama de alta

fluidez. Por ello, se ha propuesto un nuevo ensayo de penetración para medir la segregación, que se puede utilizar como criterio de aceptación en obra. Dicho método es rápido, sencillo y económico, y los resultados se miden en la escala de los centímetros, lo que facilita su aplicación.

- Cara a poder predecir el valor del escurrimiento en función de las características de la dosificación, lo que puede ser interesante en la práctica, se ha propuesto un modelo matemático mediante una función exponencial que se ajusta de forma satisfactoria al comportamiento real del HAC. No obstante, en este sentido, se precisa de una mayor amplitud de resultados para poder contrastar de forma más precisa los parámetros de entrada.
- La evolución, tanto de la resistencia a compresión como de la retracción y fluencia de los HAC estudiados, presenta incrementos significativos para edades superiores a los 28 días (resistencia) y 365 días (retracción y fluencia). Ello se asocia a una cinética de la hidratación del cemento más lenta debido al mayor contenido de pasta.
- Del estado del conocimiento se desprende que, a pesar de la gran cantidad de trabajos realizados en los últimos años en HAC, existen numerosas lagunas e imprecisiones en las que avanzar. Así, los numerosos métodos de dosificación existentes no tienen en cuenta el sistema de puesta en obra, o bien, no existe un método aceptado por la gran mayoría de autores para medir la segregación de un HAC. Asimismo se observan desequilibrios entre los estudios del material y la repercusión estructural de los mismos.

### **8.3. CONCLUSIONES ESPECIFICAS**

En lo que sigue se presentan las conclusiones específicas de las etapas de los estudios realizados en la tesis, organizadas de acuerdo con las distintas temáticas abordadas.

#### **8.3.1. Relativas al estado fresco del HAC**

Del estudio realizado en el capítulo 4 se puede realizar las siguientes conclusiones:

- El comportamiento en fresco del HAC puede dividirse en dos fases: la primera, en que el escurrimiento (fluidez) es proporcional a la relación agua/finos; la

segunda, en que el escurrimiento no cambia con dicha relación. Entre ellas se sitúa el “punto de segregación”, que se define como el valor de la relación agua/finos a partir del cual empieza la segregación en la mezcla, situado entre 0,32 y 0,34 en las dosificaciones estudiadas.

- Un HAC puede estar segregado sin que se observe visualmente en el ensayo de escurrimiento. En este caso, los aditivos hacen que los áridos fluyan hasta el labio de avance en el ensayo de escurrimiento, pero no son capaces de mantenerlos homogeneizados en una probeta en vertical, debido a la mayor energía potencial.
- Para las dosificaciones estudiadas, existe una relación entre los parámetros reológicos (tensión umbral “ $\tau_0$ ” y viscosidad plástica “ $\eta$ ”) y los ensayos ingenieriles (extensión de flujo o el T50 en el ensayo de escurrimiento). Esta relación es lineal si bien la pendiente es diferente para cada una de las series estudiadas, por lo que no se ha podido establecer una relación única.

### 8.3.2. Relativas al estado endurecido del HAC

Las principales conclusiones del estudio de las propiedades en estado endurecido del HAC recogidas en el capítulo 5 se presentan a continuación.

- En base a los dos tipos de esqueletos granulares estudiados se concluye que el esqueleto granular continuo conduce a valores ligeramente superiores de la resistencia a compresión, a tracción (medida indirectamente) y del módulo de deformación longitudinal, entre un 2 y un 15%, en algunas de las propiedades citadas. Ello puede ser reflejo de un mejor engranamiento de los áridos.
- Con respecto a los resultados de adherencia, el esqueleto granular parece que no influye, ya que las series de misma resistencia presentan valores similares. Ello puede deberse a factores contrapuestos debido a los diferentes mecanismos de adherencia; por un lado el esqueleto discontinuo puede presentar una mayor adhesión mecánica dada por el mayor contenido de árido grueso, y, por otro lado, el esqueleto continuo puede presentar una mayor adhesión dada por la mayor cantidad de pasta (más finos debido al mayor contenido de arena).
- Los HAC estudiados presentaron un incremento importante de resistencia a edades superiores a los 28, logrando un 30% al final de un año. Ello se puede justificar por la hidratación más lenta del cemento debido a la mayor cantidad

de material con mayor finura

- Con respecto a la evolución del módulo de deformación con la edad, se esperaba un incremento con la edad debido al mayor contenido de pasta, sin embargo dicho incremento ha sido de sólo un 5% en el primer año.
- Los HAC estudiados presentan una evolución rápida de la adherencia, logrando a los 7 días un 95% del total de la adherencia a los 28 días.
- En cuanto al procedimiento de ensayo de adherencia, se ha observado una rotura frágil, lo que ha originado deformaciones excesivas de la probeta, perjudicando la ejecución del ensayo en el segundo lado, principalmente en las series de alta resistencia.
- la UNE 36740 prevé 2 ensayos por viga (uno de cada lado), sin embargo en las dosificaciones de alta resistencia, se ha observado una dificultad de ensayar el segundo lado debido a las deformaciones excesivas del primero, originadas de la rotura frágil.

### **8.3.3. Relativas a las deformaciones diferidas**

Del estudio de las deformaciones diferidas de los HAC realizado en el capítulo 6 se puede realizar las siguientes conclusiones:

- El tipo de esqueleto granular no afecta de forma significativa ni la retracción autógena, ni la retracción total; ya que dicho comportamiento se ve dirigido principalmente por la pasta de cemento. Los valores medidos de la retracción autógena han sido de 0,25 y 0,38 mm/m al final de 600 días para las series de baja y alta resistencia respectivamente, mientras que la retracción total ha sido de 0,6 y 0,7 mm/m.
- La retracción autógena es significativa para todos los HAC estudiados, lo que se asocia al elevado contenido de cemento y a la baja relación agua/cemento (0,4 y 0,44);
- El esqueleto granular tiene un papel importante en la fluencia de los HAC, ya que las dosificaciones con esqueleto granular continuo presentaron un 15% menos de deformación por fluencia que las dosificaciones con el esqueleto discontinuo para un mismo nivel de resistencia (30 MPa).

- La fluencia específica es menor para hormigones con mayor resistencia, sin embargo las deformaciones diferidas (en valores absolutos) han sido similares para las series con el esqueleto granular discontinuo. Ello refleja la importancia del esqueleto granular, que es capaz de limitar las deformaciones a un mismo nivel aún cuando la pasta de cemento es diferente.
- Los valores obtenidos para la retracción total así como para la fluencia están dentro del rango de deformaciones medidas por otros investigadores tanto para HAC como para HC.

#### **8.3.4. Relativas al ensayo de penetración propuesto**

De la propuesta de ensayo para medir la de los HAC realizada en el capítulo 7 se puede realizar las siguientes conclusiones:

- El ensayo de penetración propuesto es muy sencillo, rápida y económico, pudiéndose utilizar los resultados como criterio de aceptación o rechazo en obra.
- El valor de penetración a partir del cual se puede considerar el HAC segregado es variable en función de las características de la dosificación (tipo y cantidad de finos, aditivos y cantidad de árido grueso).
- El ensayo se debe realizar a continuación del ensayo de escurrimiento, previamente al empleo del hormigón. El tiempo posterior a ello puede influir en los resultados debido a la evaporación superficial y al inicio del fraguado.

#### **8.4. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN**

A lo largo del trabajo han ido surgiendo otras posibles temáticas asociadas, o aspectos en los cuales profundizar el conocimiento, que resultan interesantes plantear para futuras líneas de investigación. A continuación se exponen las que puedan estar más relacionadas con los aspectos tratados en esta tesis doctoral:

- Profundizar el estudio de la influencia de la puesta en obra en las dosificaciones considerando el esqueleto granular. Convendría realizar pruebas en escala industrial con diferentes sistemas de puesta en obra; para poder cuantificar la influencia del mismo;

- Estudiar la influencia del tamaño máximo de los áridos y de su superficie específica en las propiedades en fresco del HAC, principalmente en la sensibilidad a los cambios de agua, cara a lograr una mayor robustez de la mezcla a través de la física de los materiales.
- Extender y afinar el modelo matemático propuesto para poder predecir el escurrimiento considerando una base de datos más amplia, que incluya otros tipos de dosificaciones (por ejemplo con finos diferentes a la arena); y así reducir el número de ensayos necesarios al momento de definir las dosificaciones.
- Medir la segregación a través del ensayo propuesto en diferentes dosificaciones de HAC para establecer valores de penetración a partir de los cuales se puede considerar cada tipo de hormigón segregado. Verificar cual es la relación con la viscosidad del hormigón para determinar el límite del ensayo. Además convendría, estudiar los efectos de borde causados por la dimensión de la probeta.
- Profundizar en el estudio de la retracción autógena cara a tener en cuenta las deformaciones reales al momento de proyectar con HAC.



