



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

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

TESIS DOCTORAL

**PROPIEDADES MECÁNICAS Y REOLÓGICAS
DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES
SOMETIDOS A CARGA A EDADES
MUY TEMPRANAS Y TEMPRANAS**

AUTOR:

LUIS VICENTE GARCÍA BALLESTER

DIRECTORES:

Prof. Dr. PEDRO SERNA ROS

Prof. Dr. MANUEL VALCUENDE PAYÁ

COMITÉ EVALUADOR EXTERNO:

Prof. Dr. Juan Gómez Acosta

Prof. Dr. Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro

Prof. Dr. Francisco Segado Vazquez

TRIBUNAL DE TESIS:

Prof. Dr. Javier Benlloch Marco

Prof. Dr. Albert de la Fuente Antequera,

Prof. Dr. Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro

VALENCIA, DICIEMBRE DE 2015

A mi mujer Maribel y
a mis hijos Luis José y María Isabel

A Luis[†] y Carmen, mis padres

Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.

Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

A mis Directores de Tesis, los Profesores Dr. D. Pedro Serna Ros y Dr. D. Manuel Valcuende Payá, por sus consejos, orientaciones y ayuda para poder desarrollar esta Tesis Doctoral

Al Departamento de Ingeniería de la Construcción y P.I.C. por poder realizar esta tesis dentro de su Programa de Doctorado.

Al Departamento de Construcciones Arquitectónicas por permitirme desarrollar la experimentación en su Laboratorio de Materiales de la ETSIE y al personal de éste, Rafael Calabuig y Jesús Martínez, por brindarme su apoyo incondicional en la realización de esta tesis.

A Rosa C. Cecche Lintz, Luisa A. Gachet-Barbosa, Belén Cabanes y Elvis Alberto Flores Galán, a todos ellos por su apoyo en la parte experimental

A mis compañeros profesores José Ramón Albiol, Vicente Monzó, Arsenio Navarro, Héctor Navarro y Marisa Navarro; Fernando Cerveró, Montse Haro y M^a Jesús Lledó por su ánimo y ayuda.

A la profesora Victoria Borrachero por haber realizado los ensayos de granulometría laser y termogravimetría en el Laboratorio de Química del Departamento de Ingeniería de la Construcción y al profesor Juan Soto por su apoyo desde hace muchos y su asesoramiento en la utilización del método de mínimos cuadrados

También quisiera agradecer a las empresas SIKA España, CEMENTVAL SL Materiales de Construcción, Áridos Carasoles, Cales La Plana CAPLANSA-Hormigón, por haber suministrado de forma desinteresada los materiales que han permitido fabricar los hormigones de esta tesis.

A mi mujer Maribel y a mis hijos Luis José y María Isabel, por las horas que he dejado de estar con ellos durante estos años y el apoyo que me han prestado en todo momento. Gracias. Muchísimas Gracias

RESUMEN

La necesidad de obtener una mayor durabilidad del hormigón y una mejora en la puesta en obra, hizo que se desarrollara en 1989 por el profesor Okamura un nuevo tipo de hormigón, que en la actualidad se conoce como Hormigón Autocompactante (HAC).

Su utilización ha aumentado progresivamente en el tiempo, especialmente en la industria de prefabricados de hormigón, no ha sucedido lo mismo con el hormigón para estructuras in situ, aunque sus propiedades y características le permiten adecuarse a las situaciones más precarias de la elaboración de cualquier elemento estructural.

Las propiedades mecánicas y reológicas de los hormigones autocompactantes a muy temprana y temprana edad (primeras horas) así como los de retracción aún no han sido estudiadas con profundidad y hasta ahora se han tratados por separado.

En esta tesis se realiza una investigación en la literatura científica, conocida hasta el presente, de las propiedades mecánicas y reológicas del hormigón a edades muy tempranas y tempranas, en conjunto con un programa experimental con la finalidad de medir a primeras horas (8, 10, 12, 24 y 48 horas): Resistencia a compresión, resistencia a tracción indirecta, módulo de deformación (módulo de Young), retracción autógena, por secado y total, así como la determinación de la pérdida de peso. Estas mismas determinaciones se han realizado para las edades convencionales de 7 y 28 días.

Se ha experimentado con 7 tipos de hormigones, 4 hormigones autocompactantes (HAC) de dos tamaños máximos de árido, en los que se han considerado las variables escurrimiento, cantidad y tipo de cemento, y tipo de aditivo; y 3 hormigones convencionales no vibrados (HCV) con las mismas especificaciones aunque en este caso se ha utilizado solo un asentamiento, en lugar del escurrimiento. A partir de los datos obtenidos se ha procedido a su análisis y comparación entre los dos tipos de hormigón. Finalmente, se ha estudiado la validez a edades muy tempranas y tempranas de los modelos de los códigos de evolución con el tiempo de las propiedades anteriores.

RESUM

La necessitat d'obtenir una major durabilitat del formigó i una millora en la posada en obra, va fer que es desenvolupés el 1989 pel professor Okamura un nou tipus de formigó, que en l'actualitat es coneix com Formigó autocompactant (HAC).

La seva utilització ha augmentat progressivament en el temps, especialment en la indústria de prefabricats de formigó, no ha succeït el mateix amb el formigó per estructures in situ, encara que les seves propietats i característiques li permeten adequar-se a les situacions més precàries de l'elaboració de qualsevol element estructural.

Les propietats mecàniques i reològiques dels formigons autocompactants a molt primerenca i primerenca edat (primeres hores) així com els de retracció encara no han estat estudiades amb profunditat i fins ara s'han tractats per separat.

En aquesta tesi es realitza una investigació en la literatura científica, coneguda fins al present, de les propietats mecàniques i reològiques del formigó a edats molt primerenques i primerenques, en conjunt amb un programa experimental amb la finalitat de mesurar a primeres hores (8, 10, 12, 24 i 48 hores): Resistència a compressió, resistència a tracció indirecta, mòdul de deformació (mòdul de Young), retracció autògena, per assecat i total, així com la determinació de la pèrdua de pes. Aquestes mateixes determinacions s'han realitzat per a les edats convencionals de 7 i 28 dies.

S'ha experimentat amb 7 tipus de formigons, 4 formigons autocompactants (HAC) de dues dimensions màximes d'àrid, en els quals s'han considerat les variables escorriments, quantitat i tipus de ciment, i tipus d'aditiu; i 3 formigons convencionals no vibrats (HCV) amb les mateixes especificacions encara que en aquest cas s'ha utilitzat sol un assentament, en lloc del escorriments. A partir de les dades obtingudes s'ha procedit al seu anàlisi i comparació entre els dos tipus de formigó. Finalment, s'ha estudiat la validesa a edats molt primerenques i primerenques dels models normatius d'evolució amb el temps de les propietats anteriors.

ABSTRACT

The need for concrete durability and an improvement of casting work, lead Professor Okamura to the development of a new type of concrete in 1989, today known as Self Compacting Concrete (SCC).

Its use has increased steadily over time, especially in the precast concrete industry, but not with in situ concrete structures, although their properties and characteristics let it adapt to the most precarious situations in the development of any structural item.

The mechanical and rheological properties of self-compacting concrete at an early and young age as well as shrinkage have not yet been deeply studied, been treated separately up to the present.

In this thesis, a research in the scientific literature known up to the present of the mechanical and rheological properties of concrete at very early and early age is performed, along with a experimental program pursuing the measurement of the early hours (8, 10 12, 24 and 48 hours): Compressive strength, indirect tensile strength, modulus of elasticity (Young's modulus), autogenous shrinkage, drying and complete, and determining weight loss. These same determinations have been made for conventional ages of 7 and 28 days.

Seven types of concretes have been studied, 4 self-compacting concrete (SCC) of two maximum aggregate sizes, in which it has been considered variables of runoff, amount and type of cement, and type of additive; and 3 not vibrated conventional concrete (VCC) with the same specifications but in this case using only a settlement, instead of runoff. From the data obtained and from its analysis a comparison between the two types of concrete has been performed. Finally, the validity in a very early and early ages of the normative evolutions models over time of the properties mentioned has been studied..

INDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN	3
1.2 OBJETIVO GENERAL	4
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.4 RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.5 ESTRUCTURA DEL TRABAJO	7
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1 INTRODUCCIÓN	11
2.2 COMPORTAMIENTO A EDAD TEMPRANA.....	13
2.2.1 <i>Hidratación del cemento durante las primeras horas</i>	13
2.2.2 <i>Concepto de edad temprana</i>	17
2.3 EFECTO DEL FILLER CALIZO EN EL HAC	23
2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES....	30
2.4.1 <i>Introducción</i>	30
2.4.2 <i>Resistencia a compresión</i>	33
2.4.3 <i>Resistencia a tracción</i>	43
2.4.4 <i>Módulo de deformación</i>	49
2.4.5 <i>Adherencia acero-hormigón</i>	55
2.4.6 <i>Retracción y fluencia</i>	59
2.4.7 <i>Durabilidad</i>	66
2.5 MODELOS DE LOS CÓDIGOS DE EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES CON LA EDAD 68	
2.5.1 <i>Propiedades mecánicas</i>	68
2.5.2 <i>Retracción</i>	73

CAPÍTULO 3.	PLAN EXPERIMENTAL Y METODOLOGIA.....	75
3.1	INTRODUCCIÓN.....	77
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	77
3.2.1	<i>Planteamiento del programa de trabajo experimental.....</i>	<i>77</i>
3.3	DISEÑO DE LA DOSIFICACIÓN Y AMASADAS DE PRUEBA.....	82
3.3.1	<i>Dosificaciones estudiadas.</i>	<i>83</i>
3.4	PROCEDIMIENTO DE TRABAJO.	85
3.5	METODOLOGÍA.....	87
3.6	CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES.....	88
3.6.1	<i>Cemento.....</i>	<i>88</i>
3.6.2	<i>Áridos.....</i>	<i>88</i>
3.6.3	<i>Aditivos.....</i>	<i>94</i>
3.7	FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN.	94
3.8	PROCEDIMIENTO DE AMASADO.....	97
3.8.1	<i>Operaciones Previas.....</i>	<i>97</i>
3.8.2	<i>Amasado hormigón.....</i>	<i>97</i>
3.9	ENSAYOS SOBRE EL HORMIGÓN FRESCO.....	98
3.9.1	<i>Ensayo de escurrimiento.....</i>	<i>98</i>
3.9.2	<i>Ensayo de escurrimiento automatizado.....</i>	<i>99</i>
3.9.3	<i>Determinación de inicio y final de fraguado.....</i>	<i>101</i>
3.9.4	<i>Ensayo aire ocluido.....</i>	<i>104</i>
3.10	ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO.....	105
3.10.1	<i>Preparación probetas.....</i>	<i>105</i>
3.10.2	<i>Ensayo de resistencia a compresión en probeta cilíndrica.....</i>	<i>106</i>
3.10.3	<i>Ensayo de resistencia a tracción indirecta.....</i>	<i>108</i>
3.10.4	<i>Módulo de deformación.....</i>	<i>109</i>
3.11	ENSAYOS DE RETRACCIÓN.....	110
3.11.1	<i>Ensayo de retracción autógena a edad temprana.....</i>	<i>111</i>
3.11.2	<i>Ensayo de retracción autógena y total.....</i>	<i>113</i>

3.11.3	<i>Pérdida de peso</i>	116
CAPÍTULO 4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	119
4.1	INTRODUCCIÓN	121
4.2	CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO	121
4.2.1	<i>Comportamiento reológico del hormigón en estado fresco</i>	121
4.2.2	<i>Tiempo de fraguado del hormigón</i>	124
4.3	PROPIEDADES MECÁNICAS.....	125
4.3.1	<i>Resistencia a compresión</i>	126
4.3.2	<i>Resistencia a tracción indirecta</i>	140
4.3.3	<i>Módulo de deformación</i>	150
4.4	RETRACCIÓN	161
4.4.1	<i>Pérdida de peso</i>	161
4.4.2	<i>Retracción autógena a edades tempranas</i>	163
4.4.3	<i>Retracción autógena y total a partir de 48 horas</i>	164
CAPÍTULO 5.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	171
5.1	COMPORTAMIENTO REOLOGICO	173
5.2	TIEMPOS DE FRAGUADO	173
5.3	PROPIEDADES MECÁNICAS	173
5.4	RETRACCIÓN.....	175
5.5	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	175
BIBLIOGRAFÍA	177

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Hormigón autocompactante (Domone, 2010)	12
Figura 2 Etapas del proceso de hidratación (a) evolución del calor durante la hidratación y (b) deformación autógena lineal a edad temprana (Esping & Löfgren, 2006).	14
Figura 3. Compuestos hidratados formados durante las etapas 3 a 5. (Taylor, et al., 2007).....	15
Figura 4 Curva de desprendimiento de calor durante la hidratación del cemento. (Gartner et al., 2002).....	18
Figura 5. Cambios producidos durante la hidratación del cemento con y sin finos calizos (Lothenbach et al., 2008)	25
Figura 6. Distribución de tamaños de poro normalizada en hormigones autocompactantes (A) y hormigones convencionales (T) (Valcuende et al., 2007).....	26
Figura 7. Volumen medio de poros en la zona de transición árido-pasta en hormigones autocompactantes (SCC) y hormigones convencionales (CVC), medido desde la cara del árido (Leemann et al., 2006).	27
Figura 8. Desprendimiento de calor en pastas con distinto contenido de finos calizos: (Ye et al., 2007)	28
Figura 9. Resistencia a compresión a la edad de 28 días en hormigones autocompactantes (A) y hormigones convencionales (T) (Valcuende et al., 2007).....	29
Figura 10. Resistencia a compresión a la edad de 28 días en hormigones autocompactantes y hormigón convencional (Zhu y Gibbs, 2005).....	29
Figura 11 Interfaz árido-pasta en HCV y en HAC con filler calizo, relación a/c=0,60 (Microscopía electrónica 200 μm , 100 μm y 50 μm). (Coppola, Cerulli y Salvioni, 2004).	31
Figura 12. Relación entre la resistencia a compresión y la relación a/c en hormigones autocompactantes y en hormigones convencionales(Agranati, 2008).	34
Figura 13 Evolución de la resistencia a compresión relativa (relación $f_{cm}(t)/f_{cm}$) para HAC hechos con diferentes tipos de filler y comparados con las predicciones del CEB Model Code 90 (Klug & Holschemacher, 2003).....	36
Figura 14. Relación entre resistencia a compresión medida en probeta y los valores medidos mediante el método de reflexión de onda ultrasónica (Voigt et al., 2006a).....	38
Figura 15. Evolución de la resistencia a compresión con la edad obtenida mediante rotura de probetas fabricadas mediante técnica de extrusión (Voigt et al., 2006b)	39
Figura 16. Evolución de la resistencia a compresión con la edad obtenida mediante rotura de probetas fabricadas mediante técnica de extrusión (Voigt et al., 2006b)	40
Figura 17. Equipo Ultrasonic Cement Analyzer (Shuker et al., 2014)	42
Figura 18. Estimación de la resistencia a compresión mediante el equipo Ultrasonic Cement Analyzer (Shuker et al., 2014)	42
Figura 19. Relación entre la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica en pastas de cemento (Xiao y Wei, 2011)	43

Figura 20. Resistencia a tracción indirecta del hormigón autocompactante en comparación con los valores teóricos proporcionados por el CEB-FIB Model Code 903 (Klug y Holschemacher, 2003).	45
Figura 21. Evolución de la resistencia a tracción a edades tempranas en hormigones de distinta resistencia (Khan, 1995) (Arshad et al., 1996)	47
Figura 22. Deformaciones de tracción en el instante de la fisuración recogidas por distintos autores a distintas edades (Roziere et al., 2015)	48
Figura 23. Variación de la capacidad de deformación a tracción en función del grado de hidratación del cemento (Roziere et al., 2015).	49
Figura 24. Módulo de deformación del hormigón autocompactante en comparación con los valores teóricos proporcionados por el CEB-FIB Model Code 903 (Klug y Holschemayer, 2003).	50
Figura 25. Relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión y su relación con respecto al modelo propuesto por el Eurocódigo 2 (Domone, 2007)	51
Figura 26. Molde para monitorizar el comportamiento del hormigón durante el proceso de endurecimiento sin necesidad de desmoldar las probetas (Boulay et al., 2014)	52
Figura 27. Evolución del módulo de deformación (Boulay et al., 2014)	52
Figura 28. Evolución del módulo de deformación a tracción y de la resistencia a tracción en función del grado de hidratación del cemento (Roziere et al., 2015)	53
Figura 29. Relación entre el módulo de deformación y la resistividad eléctrica (Hongyu et al., 2015)	54
Figura 30. Curvas tensión deformación (Voigt et al., 2006b)	55
Figura 31. Variación de la adherencia con la edad en dos tipos de hormigones (Song et al., 2015).	58
Figura 32. Concentración de árido.	63
Figura 33. Influencia de la relación a/c (Neville, 1996).	64
Figura 34. Influencia de la resistencia a compresión (a) Hormigón convencional y hormigón ligero (Neville, 1996). (b) Hormigón autocompactante y Hormigón convencional (Perssons, 2001)	64
Figura 35. Influencia de la relación entre la tensión aplicada y la fluencia (Neville, 1996).	65
Figura 36 Evolución del coeficiente $\beta_{cc}(t)$ con la edad para los modelos EHE-08, EC-2 y MC-10	71
Figura 37 Grafica de la granulometría del árido total tamaño máximo 20	85
Figura 38 Grafica de la granulometría del árido total tamaño máximo 12,5	85
Figura 39 TG del árido 0/4	89
Figura 40 TG del árido 0/2	90
Figura 41 Granulometría de los áridos gruesos (a) árido 8/20 y (b) árido 4/12,5	91
Figura 42 Gráfica de la granulometría de los árido 8/20 y 4/12,5	91
Figura 43 Granulometría de los áridos finos (a) árido 0/4 y (b) árido 0/2	92
Figura 44 Gráfica de la granulometría de los árido 0/4 y 0/2	92
Figura 45 Granulometría laser de la fracción < 63 μm de los áridos finos	92
Figura 46 TG del filler calizo	93
Figura 47 Gráfica de la granulometría del filler	94
Figura 48 Amasadora planetaria de 70 litros	95

Figura 49 Equipos ensayos HCV fresco.....	96
Figura 50 Proceso de ensayos HAC fresco.....	96
Figura 51 Medición diámetros	99
Figura 52 Equipo Rheometer 4C	99
Figura 53 (a) Vertido del hormigón (b) Ensayo.....	100
Figura 54 Pantalla evolución escurrimiento (a) Inicio (b) Final	101
Figura 55 Gráfica de evolución del escurrimiento y Resultados.....	101
Figura 56 Penetrómetro y agujas para tiempos de fraguado	102
Figura 57 Ensayo de fraguado: (a) Mortero a ensayar (b) Inicio (c) Resultado primera penetración (d) Resultado última penetración	103
Figura 58 (a) Equipo de ensayo (b) Proceso (c) Resultado	105
Figura 59 (a) Probeta sin refrentar, (b) Refrentada con azufre, (c) Refrentada pulida.....	106
Figura 60 (a) Equipo de ensayos mecánicos , (b) Probeta preparada para rotura.....	107
Figura 61 Dispositivo de ensayo a tracción indirecta	108
Figura 62 (a) Probeta con equipo adquisición de datos (b) Ejemplo de resultado del ensayo	109
Figura 63 Preparación de los moldes en el ensayo de retracción	112
Figura 64 Probetas retracción autógena	112
Figura 65 (a) Transductores LVDT (b) Equipo de adquisición de datos.....	113
Figura 66 (a) Disposición de los transductores LVDT (b) Disposición final del equipamiento	113
Figura 67 Preparación de probetas para el ensayo de retracción. (a) Retracción autógena (b) Retracción total	114
Figura 68 (a) Colocación del comparador (b) Colocación de las probetas en la cámara.....	115
Figura 69 (a) Cámara (b) Control de humedad y temperatura	115
Figura 70 Cámara de curado 20°C y 50% Humedad (a) Exterior (b) Interior	116
Figura 71 Pesadas del ensayo de pérdida de peso	117
Figura 72 Interface del 4C-Rheometer	122
Figura 73. Comportamiento de los HAC ensayados	123
Figura 74 Escurrimiento hormigones AC20A60 y AC12A70	123
Figura 75 Determinación gráfica del PF y FF de los hormigones de tamaño máximo 20 mm	124
Figura 76. Determinación gráfica del PF y FF de los hormigones de tamaño máximo 12,5.	125
Figura 77 Evolución de los hormigones de tamaño máximo 20 mm con la edad.....	128
Figura 78 Evolución de los hormigones de tamaño máximo 12,5mm con la edad.....	129
Figura 79. Evolución resistencia relativa a los 28 días y a edades iniciales	131
Figura 80 Evolución de la resistencia de los hormigones AC20A60 y AC20A70 comparada con los modelos.....	132

Figura 81. Evolución de la resistencia del hormigón CV20A comparada con los modelos	133
Figura 82. Histograma de la Evolución de la resistencia a compresión	133
Figura 83. Evolución resistencia relativa a 28 días y a edades tempranas.....	134
Figura 84. Evolución de la resistencia de los hormigones AC12A70 y AC12B70 comparada con los modelos de los códigos.	135
Figura 85. Evolución de la resistencia de los hormigones CV12A y CV12B comparada con los modelos.	136
Figura 86. Histograma de la evolución de la resistencia a compresión	137
Figura 87 Modelo de la EHE-08 sin ajuste y con ajuste por tiempo de fraguado	138
Figura 88 Modelos de la EHE sin ajuste y con ajuste de t_0 y s en los hormigones de tamaño máximo del árido de 20 mm	139
Figura 89 Modelos de la EHE sin ajuste y con ajuste de t_0 y s en los hormigones de tamaño máximo del árido de 12,5 mm	140
Figura 90 Evolución de la resistencia a tracción de los hormigones de tamaño máximo 20 mm con la edad.....	142
Figura 91 Evolución de la resistencia a tracción de los hormigones de tamaño máximo 12,5mm.....	143
Figura 92 Evolución de la resistencia por tipo de hormigón	144
Figura 93 Evolución de la resistencia a tracción de los hormigones de tamaño máximo 20 mm.....	145
Figura 94. Histograma de la evolución de la resistencia a tracción	146
Figura 95. Evolución de resistencias a tracción indirecta.....	147
Figura 96. Histograma de la evolución de resistencia a tracción.....	148
Figura 97. Resistencia a tracción indirecta en función a la resistencia a compresión	149
Figura 98. Relación resistencia tracción - compresión respecto a la edad	149
Figura 99. Tendencia por cada tipo de hormigón	149
Figura 100. Comparación de cada tipo de aditivo de acuerdo a la relación tracción-compresión	150
Figura 101 Evolución del módulo secante de los hormigones AC20A60, CV20 y AC20A70.....	152
Figura 102 Evolución del módulo secante de los hormigones AC12A70, CV12A, AC12B70 y CV12B	153
Figura 103 Evolución del módulo de deformación por tipo de hormigón.....	154
Figura 104 Evolución del módulo relativo secante con la edad	155
Figura 105 Evolución del módulo relativo secante con la edad	156
Figura 106 Evolución del módulo secante.....	157
Figura 107. Módulo de deformación en función a la resistencia a compresión de los hormigones de tamaño máximo de árido 20 mm	158
Figura 108. Detalle de la relación módulo-deformación respecto a las normas y tendencia por cada edad de ensayo	159
Figura 109. Módulo de deformación en función a la resistencia a compresión de los hormigones de tamaño máximo de árido 12,5 mm	160
Figura 110. Detalle de la relación módulo de deformación respecto a los modelos de los códigos	161

Figura 111. Pérdida de peso de hormigones de tamaño máximo de árido 20 mm	162
Figura 112 Pérdida de peso de hormigones de tamaño máximo de árido 12,5 mm	162
Figura 113. Comparación del HAC con aditivos distintos	164
Figura 114. Retracción total y autógena de los hormigones AC20A60, CV20 y AC20A70	166
Figura 115. Retracción total y autógena de los hormigone AC12A70, CV12A, AC12B70 y CV12B	167
Figura 116. Retracción total.....	168
Figura 117. Retracción autógena	168
Figura 118. Diferencias entre muestras selladas y no selladas a partir de 48 horas	169
Figura 119. Retracción total y autógena por tipo de aditivo	169

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Definición del período de edad temprana (Nehdi & Soliman, 2011) y elaboración propia.....	21
Tabla 2. Proyección de edad respecto al cemento a utilizar.	22
Tabla 3 Coeficientes en función de la clase del cemento	22
Tabla 4 Modelos de los códigos (EHE-08, EC-2, MC-10, ACI 209.2R 08) para las propiedades mecánicas en función al tiempo.....	69
Tabla 5 Valores típicos recomendado de a y b según ACI 209.2R.....	70
Tabla 6 Modelos de los códigos (EHE-08, EC-2, MC-10, ACI 209.2R) para la retracción en función al tiempo.....	73
Tabla 7 Especificaciones y Designación de los hormigones estudiados.....	79
Tabla 8 Edades de ensayo y sistema de conservación.....	81
Tabla 9. Propiedades determinadas	82
Tabla 10. Detalle de ensayos y m ³ utilizados.....	82
Tabla 11 Dosificaciones de los hormigones de tamaño máximo 20 mm.	84
Tabla 12 Dosificaciones de los hormigones de tamaño máximo 12,5 mm	84
Tabla 13 Cronograma para los ensayos previos	86
Tabla 14 Cronograma para los ensayos de características mecánicas.....	86
Tabla 15 Cronograma para los ensayos de retracción.....	87
Tabla 16 Materiales Utilizados	88
Tabla 17 Propiedades de los áridos.....	89
Tabla 18 Propiedades del filler	93
Tabla 19 Tolerancias peso componentes	97
Tabla 20 Dimensiones agujas	102
Tabla 21 Codificación de los hormigones utilizados	121
Tabla 22. Resultados de los ensayos del hormigón en estado fresco.	122
Tabla 23. Propiedades reológicas con el reómetro	122
Tabla 24. Datos finales del principio y final de fraguado.....	124
Tabla 25 Resistencias y módulo de deformación de los hormigones estudiados	126
Tabla 26 Diferencia en porcentaje entre las resistencias de los HAC y el CV.....	127
Tabla 27 Diferencias existentes entre las resistencias de los hormigones estudiadas	128
Tabla 28 Coeficientes de los modelos EHE-08, EC-2, MC-10, y ACI 209.2R.....	130
Tabla 29 Resultados medios de la resistencia a compresión y relación $f_{cm}(t)/f_{cm28}$	130
Tabla 30. Resultados medios de la resistencia compresión $f_{cm}(t)$ y relación $f_{cm}(t)/f_{cm28}$	134

Tabla 31 Valores del coeficiente s ajustados para hormigón.....	139
Tabla 32 Diferencia en porcentaje entre las resistencias a tracción entre los hormigones AC20A 60 y AC20A70 con el hormigón convencional CV20A.....	141
Tabla 33 Diferencia en porcentaje entre las resistencias a tracción entre los hormigones AC12A 70 y AC12B70 con los hormigones convencionales CV12A y CV12B.....	142
Tabla 34 Resultados medios de la resistencia a tracción y relación $f_{ctm}(t)/f_{ctm28}$	145
Tabla 35. Resistencia a tracción y evolución de los hormigones.....	146
Tabla 36 Diferencias existentes entre las resistencias de los hormigones estudiadas.....	147
Tabla 37 Diferencia en porcentaje entre los módulos de los HAC y el CV.....	151
Tabla 38 Diferencia en porcentaje entre las resistencias a tracción entre los hormigones AC12A 70 y AC12B70 con los hormigones convencionales CV12A y CV12B.....	152
Tabla 39 Coeficientes de los modelos EHE-08, EC-2, MC-10.....	155
Tabla 40 Modulo de deformación y relación $E_{cm}(t)/E_{cm28}$ de los hormigones de tamaño máximo 20 mm.....	155
Tabla 41 Modulo de deformación y relación $E_{cm}(t)/E_{cm28}$ de los hormigones de tamaño máximo 12,5 mm.....	156
Tabla 42. Media de resultados a compresión y módulo de deformación.....	158
Tabla 43. Media de resultados a compresión y módulo de deformación.....	159
Tabla 44 Pérdida media de peso de los hormigones.....	161
Tabla 45 Estados de conservación de cada probeta.....	164
Tabla 46 Valores medios de la retracción de los hormigones a la edad de 28 días.....	165

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

El hormigón es el material más utilizado en la industria de la construcción debido a que puede adquirir casi cualquier forma y por su relativamente bajo precio. El hormigón convencional tiene el defecto de que para poder compactarlo es necesario realizar importante trabajo de vibración, como consecuencia de esto se prolonga el tiempo de puesta en obra y puede quedar comprometida la durabilidad ya que es necesaria la utilización de mano de obra, a veces no suficientemente cualificada. Para solucionar este problema se diseñó a finales de los años 80 del siglo pasado el Hormigón Autocompactante HAC (Self-compacting concrete SCC) que además de que permite la colocación sin vibración, también tenía una capacidad de fluir muy superior a los hormigones convencionales superfluidificados, lo que permite rellenar el encofrado y rodear a las armaduras en su totalidad.

En la industria de prefabricación se utilizan secciones muy delgadas que en muchos casos están fuertemente armadas, lo que hace necesario la utilización de sistemas de vibración externos con costes de tiempo y energéticos importantes.

La vida útil de una estructura de hormigón está afectada de las estructuras de hormigón de forma importante por las propiedades y comportamiento del hormigón a edad temprana. Sin embargo, los mecanismos fundamentales que afectan este comportamiento no se entiende todavía completamente. Esto es debido a los diversos factores interrelacionados que influyen en él y la complejidad de los ensayos y de las técnicas necesarias para su investigación.

En todos los tipos de construcciones, las propiedades del hormigón a corto plazo son de vital importancia, en las primeras horas se precisa actuar sobre los elementos constructivos por necesidad de: desencofrado, transmisión de pretensados o movimiento de la planta, todo con el fin de optimizar el uso de las instalaciones.

Si bien en los últimos años se han estudiado ampliamente las propiedades en estado fresco y en estado endurecido de los HAC, no ha sucedido lo mismo con las edades muy tempranas¹ y tempranas. Los mecanismos fundamentales que afectan el comportamiento a esas edades no se entiende todavía completamente, por lo que se pueden plantear dudas sobre la evolución de las propiedades mecánicas (uso de dosificaciones ricas en finos, empleo de elevadas cantidades de aditivo, utilización de combinaciones de aditivos), asimismo algunas propiedades especiales, retracción y fluencia, pueden seguir ritmos de crecimiento no similares a las propiedades elementales (resistencia a compresión), en particular la retracción autógena y la retracción por secado. En este contexto se plantea el trabajo, con la finalidad de valorar experimentalmente la evolución de algunas propiedades de los hormigones autocompactantes.

1.2 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta tesis es estudiar y analizar la evolución de las propiedades mecánicas y reológicas a edades tempranas de hormigones autocompactantes y compararlas con las de hormigones convencionales vibrados equivalentes, estudiando la influencia que pueda tener el escurrimiento, el tipo de cemento y el tipo de aditivo. t

Para desarrollar esta tesis se pretende analizar las propiedades mecánicas y reológicas del Hormigón Autocompactante a edad temprana (8, 10, 12, 24 horas) y a edades 48 horas, 7 días y 28 días y las del hormigón convencional vibrado (HCV) a las mismas edades Se dosifican cuatro HAC todos con la misma relación agua cemento, pero diferente tamaño máximo de árido y/o aditivo Se fabrican también tres hormigones convencionales vibrados (HCV) con el mismo asiento pero diferente cemento y/o aditivo y tamaño máximo del árido.

¹ No existe un consenso sobre cuando se consideran edades muy tempranas y tempranas. En esta tesis se realiza una propuesta a tal fin

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos de este trabajo se han establecido como consecuencia de investigación en el estado del arte (capítulo 2) de materiales para la elaboración de hormigones autocompactantes. Los objetivos específicos se presentan a continuación:

- Caracterización de los HAC y los HCV a edades muy tempranas y tempranas, realizando para cada tipo de hormigón 5 tipos de ensayo:
 1. Ensayo de resistencia a compresión.
 2. Ensayo de módulo de elasticidad.
 3. Ensayo tracción indirecta.
 4. Ensayo de retracción autógena.
 5. Ensayo de retracción total por secado
- Realizar una campaña experimental, con la finalidad de ensayar 7 tipos de hormigones (4 autocompactante y 3 convencionales), con dos tipos de cemento y dos tipos de aditivos, a edades tempranas (8 a 48 h.),
- Evaluar el comportamiento de los HAC en comparación con los HCV
- Establecer las correlaciones entre las diferentes propiedades estudiadas
- Estudiar la congruencia entre las formulaciones de las normas nacionales e internacionales para el hormigón convencional con los datos experimentales obtenidos para el hormigón autocompactantes (HAC). Para las edades objeto de esta tesis.

1.4 RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.

La evolución de los procesos constructivos y las necesidades de obtener mayor productividad tanto en las obras como en la industria de prefabricación, ha provocado que en muchas ocasiones en contra de una puesta en obra y curado óptimos y de la vida útil de las construcciones, puede provocar que se sometan a los elementos estructurales a acciones y cargas de todo tipo antes del momento óptimo.

En consecuencia, el módulo de deformación es una característica importante del hormigón. Es un parámetro básico necesario para estimar las pérdidas del pretensado, y deformaciones inmediatas y dependientes del tiempo debido a cargas tempranas. Some-

ter el hormigón a acciones de flexión y cargas a edades tempranas provoca fisuras excesivas inmediatamente y a largo plazo y otros problemas asociados a la durabilidad. Estos problemas relacionados con el hormigón joven han sido atribuidos a las bajas, relativamente, propiedades físicas del hormigón a la edad a la que ha sido sometido a las primeras acciones.

Los errores catastróficos de estructuras de hormigón en construcción revelan el peligro inherente de aplicar cargas significativas cuando el hormigón aún no está suficientemente endurecido. Grandes cargas durante la construcción pueden exceder de la capacidad de soporte y de resistencia a la deformación que la estructura haya desarrollado en este tiempo. Por lo tanto, verificar la relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión del hormigón y conocer cómo evoluciona con un alto grado de confianza, es importado por los primeros días críticos después de la fabricación del hormigón.

Cada vez el uso del HAC está más extendido y por los motivos expuestos anteriormente es necesario e importante conocer las propiedades de este hormigón a edades tempranas. Si además, tenemos en cuenta que su uso principal es la industria del prefabricados conocer el módulo de deformación del HAC resulta de absoluta necesidad para reducir de forma segura el tiempo del proceso de fabricación. Lo que se sumaría y aumentaría las ventajas que tiene para esta industria y para la construcción en general, como es la reducción del tiempo de ejecución además del aumento de la durabilidad de los encofrados, en el caso del hormigonado en obra y los moldes, en el caso de los prefabricados, que supone una disminución en los costes de los mismos.

A pesar de la importancia del conocimiento de estas propiedades mecánicas a edades tempranas, la bibliografía sobre estudios experimentales es mucho menos importante que para las propiedades en estado fresco y estado endurecido a edades tradicionales. Por ello de la importancia de este estudio que nos permitirá conocer la evolución de estas propiedades durante los dos primeros días y si se comportan según lo previsto con las normas actuales estudiadas para HCV y por lo tanto si son aplicables al HAC.

La tecnología química ha desarrollado productos cada vez más activos (p.e. aditivos superfluidificantes), así como el desarrollo de nuevos productos procedentes de procesos industriales (cenizas volantes, humo de sílice, escorias siderúrgicas, ...) que forman parte de la composición de los hormigones actuales, incluso fibras de todo tipo (fibras metálicas, fibras poliméricas, ...), quedan algunas interrogantes sin resolver:

- ¿El uso de aditivos pueden variar el coeficiente de edad del hormigón?
- La Evolución de la resistencia mecánica o los coeficientes edad del hormigón ¿son extrapolables a temprana edades? ¿Los valores son conservadores?
- La validez de las teorías de Neville et al (1983) de fluencia y retracción con relaciones de agua/cemento elevadas y uso de aditivos en hormigones autocompactantes.

1.5 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Este documento está estructurado en 7 capítulos, el apartado de referencias bibliográficas y 2 anexas.

En el Capítulo I, contiene la introducción de este presente trabajo, los objetivos generales y específicos de esta investigación.

A continuación, en el Capítulo II se expone el estado actual del conocimiento del hormigón autocompactante. Primero se define y explica sus orígenes para luego entrar a detallar sus particularidades, en la tipificación, dosificación, colocación en obra y control de calidades así como las ventajas y desventajas de su utilización. Seguidamente se realiza un análisis de los estudios de las características mecánicas del hormigón autocompactante y para terminar comentado los principales estudios que se pueden encontrar con respecto a las propiedades del hormigón autocompactante, en especial del módulo elástico y de su comportamiento a edades tempranas. Finalmente se exponen los estudios recientes de retracción a temprana edades y edades posteriores del hormigón.

En el Capítulo III, define el programa experimental, la programación, condiciones de la investigación, registro de datos y el tipo de formato para cada ensayo. Tam-

bién se describe el procedimiento operativo de los ensayos, la descripción del procedimiento técnico de cada ensayo, así como las condiciones del entorno y herramientas de laboratorio a utilizar.

En el siguiente capítulo, Capítulo IV, se describen los resultados de los ensayos y el análisis de los datos, gráficos y resumen de todos los ensayos realizados. La discusión de los resultados analiza la influencia de los diferentes parámetros estudiados, cómo evolucionan y se comparan los resultados obtenidos con los resultados previsibles según las normativas actuales. Presenta un análisis paramétricos de los datos experimentales y los cálculos teóricos. Se propone dos ecuaciones de ajuste a temprana edad.

En el Capítulo V se sintetiza el trabajo realizado y las conclusiones obtenidas, para terminar indicando futuras líneas de investigación que se podrían abrir a partir de esta investigación

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

Las propiedades del hormigón endurecido dependen de las características de sus componentes, de las proporciones de estos, del proceso de fabricación y colocación, y de las condiciones de entorno endógenas y exógenas durante el proceso de fraguado y endurecimiento. Los daños y acciones no intencionados que puedan ocurrir durante este período no son, o sólo con grandes gastos, reparables.

El hormigón es especialmente vulnerable durante las primeras etapas en que va desarrollando sus propiedades mecánicas y reológicas en estado sólido. Una sobrevaloración de estas propiedades por parte de los técnicos que participan en el proceso constructivo de una obra puede conducir al colapso de la estructura durante el período de construcción (Kaminetzky & Stivaros, 1994), a asentamientos excesivos o a un aumento de las deformaciones a largo plazo que en muchos casos no son recuperables.

Las propiedades mecánicas y reológicas del hormigón a edad temprana influyen en la determinación de la velocidad de construcción y la calidad. Los ingenieros y arquitectos durante la ejecución de las obras deben tomar decisiones en temas tales como plazos de desencofrado, tiempos de curado, entrada en servicio del elemento estructural, etc., por lo que es muy importante que tengan una comprensión adecuada del comportamiento a edad temprana.

El hormigón autocompactante (HAC) se compone de los mismos componentes que el hormigón convencional vibrado (HCV) (cemento, agua, áridos, aditivos y adiciones minerales), pero la composición final de la mezcla y sus características frescas son diferentes. En comparación con el hormigón convencional, el HAC requiere mayor cantidad de aditivos reductores de agua de alto rango y el tamaño máximo del árido grueso normalmente es menor. Además, suele contener cantidades importantes de adiciones, tales como filler calizo, cenizas volantes, humo de sílice o escorias siderúrgicas.

El hormigón autocompactante se diferencia de los hormigones convencionales vibrados principalmente por sus propiedades en estado fresco. Es capaz de fluir bajo su propio peso, con gran capacidad de paso y de relleno, y permanece homogéneo durante el vertido (sin segregación dinámica) y tras su colocación (sin segregación estática) (Figura 1).



Figura 1 Hormigón autocompactante (Domone, 2010)

Para lograr este comportamiento el HAC se dosifica de forma diferente que el HCV. En el HAC, la pasta, que se define como la mezcla de cemento, agua, aditivos y finos (filler, adiciones y finos aportados por los áridos) se aumenta en detrimento del árido grueso. Generalmente, el HAC tiene un mismo contenido de cemento y agua que su HCV equivalente y un volumen similar de árido fino. Las proporciones exactas de cada componente dependen del método de formulación elegido.

Los cambios en la dosificación o puesta en obra del material, que presentan los HAC, pueden conducir a una modificación de las propiedades físicas y mecánicas del material (Parra, 2005) (Parra, 2005; Valcuende et al., 2005; Domone, 2007; Valcuende et al., 2009). Por ejemplo, en los HCV cuando se aumenta la fluidez o se utilizan mezclas ricas en arena la adherencia disminuye (Martín, 1982). Por otro lado, la ausencia de compactación en los HAC disminuye los riesgos que este proceso conlleva (Aïtcin, 1999; Chan et al., 2003), ya sea por exceso de vibrado (sangrado o segregación) o por falta del mismo (presencia de aire atrapado). Por ello, es muy importante investigar si todas las hipótesis asumidas para las estructuras ejecutadas con hormigón convencional vibrado son también válidas para estructuras de hormigón autocompactante.

El estudio del comportamiento del hormigón a edades avanzadas ha producido un número importante de trabajos de investigación, artículos de revistas, normas, etc. Sin embargo, el número de trabajos y estudios que se han realizado sobre las propiedades mecánicas del hormigón a edad temprana es mucho menor. Mayoritariamente el período de resistencias estudiado corresponde al intervalo entre los 3 y 28 días. Existen varias razones para ello, una de las cuales es que no existe un criterio único sobre que período

del proceso de endurecimiento del hormigón, tanto en el HCV como en el HAC, es el que debe considerarse como edad temprana, y otra, y tal vez la principal, es la dificultad de realizar ensayos mecánicos destructivos a edades muy cercanas al final de fraguado.

Uno de los primeros trabajos realizados sobre el comportamiento del HCV a edades tempranas es el de Lew y Reichard (1978) que estudiaron la resistencia a compresión, resistencia a tracción indirecta y el módulo de deformación del hormigón convencional vibrado para diferentes temperaturas y grados de hidratación. En 1976 RILEM creó el comité 42-CEA y publicó cinco años después el documento "Properties of Set Concrete at Early Ages. State-of-the-Art Report" (RILEM, 1981). La tesis doctoral de Byfors (1980) es el primer estudio sistemático sobre el comportamiento del hormigón en masa a edad temprana.

2.2 COMPORTAMIENTO A EDAD TEMPRANA

2.2.1 Hidratación del cemento durante las primeras horas

La hidratación del cemento consiste en un conjunto de procesos químicos acoplados, cada uno de los cuales se produce a una velocidad que está determinada por la naturaleza del proceso y por el estado del sistema en ese instante. Estos procesos ocurren cuando el cemento anhidro, o alguna de sus fases constituyentes, se mezcla con agua, desarrollándose las etapas recogidas en la Figura 2. Los productos resultantes de la hidratación del cemento poseen baja solubilidad en agua, lo que justifica la estabilidad de la pasta de cemento endurecida en contacto con el agua. Los procesos de hidratación suelen estudiarse analizando algunos parámetros calorimétricos, como la evolución de temperatura o el desprendimiento de calor en pequeñas muestras (Poppe y De Schutter, 2005; Ye et al., 2007; Barluenga et al., 2015), porque la hidratación del cemento es una reacción exotérmica. No obstante, las técnicas calorimétricas, como las calorimetrías isotérmica y adiabática modifican la temperatura de las muestras y pueden alterar el proceso de hidratación (Robeyst et al., 2008; Barluenga et al., 2013). Algunos autores también plantean la posibilidad de medir el fraguado, el endurecimiento y el incremento de resistencia del hormigón mediante el uso de pulsos ultrasónicos (Demirboga et al., 2004; Gu et al., 2006; Wang y Zhu, 2011, Barluenga et al., 2015), si bien a edades muy

tempranas a veces resulta muy difícil interpretar correctamente los valores medidos (Reinhardt y Grosse, 2004).

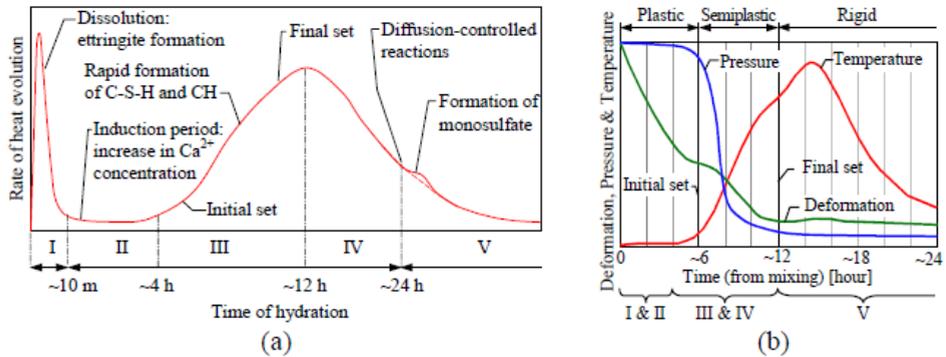


Figura 2 Etapas del proceso de hidratación (a) evolución del calor durante la hidratación y (b) deformación autógena lineal a edad temprana (Esping & Löfgren, 2006).

El proceso de hidratación del cemento Portland puede dividirse en cinco etapas (Figura 3): hidrólisis inicial, periodo de reposo o latente, fraguado y aceleración, endurecimiento y el estado de desaceleración (Aïtcin, 2008). En la primera etapa, tras el contacto del cemento con el agua, los iones de calcio se liberan rápidamente de la superficie de cada partícula, como por ejemplo del silicato tricálcico (C_3A), y el pH de la disolución de poro aumenta por encima de 12 en pocos minutos. Las partículas de cemento empiezan a cubrirse de silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) y por etringita (es la combinación de yeso, agua y C_3A , formándose sulfoaluminato tricálcico hidratado o también denominado etringita o sal de Candlot). Esta hidrólisis se desacelera rápidamente, pero continúa durante todo el período latente (etapa 2), que se desarrolla entre 1 y 2 horas después del amasado. El C-S-H y la etringita siguen formándose, pero la portlandita todavía no se ha formado ya que su proceso de creación es mucho más lento que el de los C-S-H. La solución acuosa está saturada de iones de calcio, dando lugar a un continuo incremento de la conductividad de la disolución. La tercera etapa se corresponde con el fraguado y aceleración de la hidratación y se produce unas 5 horas después del amasado, con una rápida precipitación de cristales de portlandita. Al disminuir en consecuencia la concentración de iones de calcio y de hidróxido la conductividad disminuye rápidamente y se libera algo de calor. Este aumento de la temperatura no es muy importante al principio

porque la precipitación de portlandita es endotérmica. La mezcla empieza a adquirir rigidez debido a la formación de cristales de etringita.

Durante las etapas 4 y 5 la hidratación continúa, aumentando el espesor de la capa de hidratos y formando una barrera a través de la cual el agua debe fluir para alcanzar las partículas de silicatos tricálcicos (C_3S) no hidratadas. Durante la etapa de endurecimiento (etapa 4), la etringita, que no es estable, empieza a descomponerse (libera iones sulfato) y se combina con el C_3A para formar cristales de monosulfato de calcio, que es más estable. Esta reacción, que viene a producirse en torno a las 9 horas, es rápida y genera un pico exotérmico. El calor que se libera acelera a su vez la velocidad de hidratación de los silicatos.

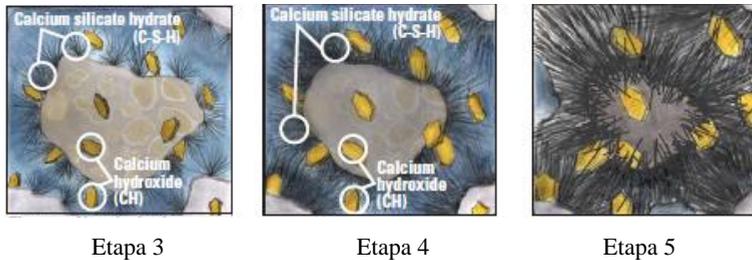


Figura 3. *Compuestos hidratados formados durante las etapas 3 a 5. (Taylor, et al., 2007)*

En definitiva, la hidratación del cemento da lugar a la formación de diversos hidratos, principalmente silicatos cálcicos hidratados, portlandita (hidróxido cálcico) y etringita (sulfoaluminato de calcio). Los C-S-H son el componente mayoritario de los productos hidratados y representan del 50 al 60% del volumen de las fases sólidas de la pasta de cemento endurecida si se logra su total hidratación. En presencia de pequeñas cantidades de calcita, normalmente incluida en todos los cementos portland, también hay que considerar la formación del monocarbonato de calcio (Lothenbach & Winnefeld, 2006) (Lothenbach, et al., 2008).

El yeso, presente en el cemento como regulador de fraguado, y otras fases de sulfato de calcio se consumen antes de 24 horas, mientras que las fases del clínker se hidratan a diferentes velocidades: las fases alita y aluminato reaccionan más rápidamente que belita y ferrita (Taylor, 1997).

La hidratación del silicato tricálcico (alita) y del silicato bicálcico (belita) da lugar a un sólido poroso y amorfo (poco cristalino) de silicatos cálcicos hidratados, llamado gel de C-S-H (Mehta, 1993; Taylor, 1997). No obstante, Neville (1988) señala que estos hidratos tienen un carácter cristalino. La composición química de C-S-H varía con la relación a/c , temperatura y edad de hidratación. La alita tiende a dominar el periodo de hidratación temprana, que comprende el fraguado y desarrollo de la resistencia inicial (Bullard et al., 2011). El elemento básico del C-S-H es más o menos esférico y de aproximadamente 2 nm. Estos componentes fundamentales flocculan para formar unidades mayores (Jennings, 2000).

La hidratación de la belita y sobre todo de la alita genera una cantidad importante de portlandita (CH). La alita libera un 39%, en peso, de CH frente al 18% de la belita. Para sistemas que incluyen materiales puzolánicos, que consumen CH en su reacción, se debe primar cementos ricos en C_3S . Los cristales de CH ocupan del 20 al 25% del volumen total de sólidos de la pasta de cemento totalmente hidratada. Suelen presentarse en forma de cristales hexagonales, aunque su morfología puede variar. Se trata de cristales relativamente grandes y, por tanto, su capacidad cementicia es mucho menor que la del gel de C-S-H. La mayor parte suele estar ubicada en el espacio ocupado inicialmente por el agua, como por ejemplo la zona interfacial de transición árido-pasta.

El C_3A es la fase más reactiva en el clínker de cemento portland (Donatello et al., 2013) y su reacción con el agua es muy rápida, provocando un inmediato endurecimiento de la pasta. La hidratación C_3A sin la presencia de sulfato es incontrolada y puede conducir a la rápida formación de hidratos de aluminato de calcio que son metaestables y mal ordenados que con el tiempo se transforman (Mehta 1993; Bullard et al., 2011; Donatello et al., 2013). Para evitar esto y regular el fraguado, se añade yeso al clínker del cemento. La hidratación del aluminato tricálcico en presencia de sulfatos da lugar inicialmente a la formación de trisulfoaluminato de calcio (etringita) y se caracteriza por la presencia de un pico en la curva de evolución del calor de hidratación (etapa 1, Figura 2) durante la primera media hora. En una segunda fase, cuando se agota la fuente de iones sulfato, la etringita se vuelve inestable y se va transformando en monosulfoaluminato de calcio hidratado y en aluminato de calcio hidratado (Quennoz y Scrivener, 2012). Según Nevi-

Ile (1988), el hidróxido cálcico liberado durante la hidratación de los silicatos cálcicos retarda la hidratación del C_3A . Esto puede deberse a que el hidróxido cálcico reacciona con el C_3A y el agua, formándose una capa protectora sobre la superficie de los granos no hidratados de C_3A , o bien a que el hidróxido cálcico disminuye la concentración de iones de aluminato en la solución, disminuyendo así la velocidad de hidratación del C_3A .

Por lo que respecta a la fase férrica, muchos autores consideran que su hidratación es similar a la de los aluminatos, aunque según Mehta (1993), en general, la reactividad es algo más lenta.

2.2.2 Concepto de edad temprana

La determinación del momento exacto, o tiempo cero (t_0), en que las tensiones empiezan a producirse en el hormigón es de gran interés para la medida de algunas propiedades, como por ejemplo la retracción. El hormigón comienza a retraer en el instante en que tienen lugar las reacciones de hidratación del cemento. Según Aïtcin (1999) si no se fija correctamente el tiempo cero los valores de retracción medidos pueden ser sustancialmente inferiores a los reales, especialmente en el caso de hormigones de baja relación a/c en los que la retracción autógena es importante. Ahora bien, tal y como se ha señalado anteriormente, no existe un consenso sobre la determinación del t_0 ni sobre el concepto de edad temprana (tabla 1). Esta falta de normalización y aceptación general hace que sea difícil establecer comparaciones entre los resultados obtenidos por los distintos autores.

a) Tiempo cero.

Algunos autores señalan que la evolución interna de la temperatura del hormigón, especialmente a partir del momento en que la temperatura comienza a aumentar rápidamente, podría ser utilizada para determinar el t_0 (Mindess y Young, 1981). De hecho, estos autores propusieron como t_0 el final del periodo latente (etapa 2, Figura 2) que se produce tras la rápida hidratación del aluminato tricálcico (etapa 1) que se caracteriza por la presencia de un primer pico en la curva de evolución del calor de hidratación durante aproximadamente la primera media hora.

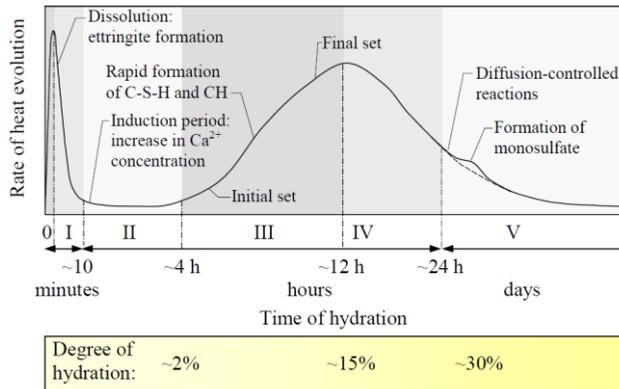


Figura 4 Curva de desprendimiento de calor durante la hidratación del cemento. (Gartner, et al., 2002)

Posteriormente Kada et al. (2002) y, más recientemente, Granju et al. (2004) o Cusson y Hoogeveen (2007) también han considerado este parámetro como referencia para establecer el t_0 . Dada la dificultad en establecer concretamente el final del periodo latente, muchos autores recomiendan tomar como t_0 el inicio de fraguado (Tazawa y Miyazawa, 1995; Aïtcin, 1999; Tazawa et al. 2000), tiempo que en cualquier caso se corresponde bastante bien con el del final del periodo latente (Figura 2). Existe también autores que establecen propuestas más simples, como fijar un t_0 igual a 6 horas para todos los hormigones (Lee et al., 2003). No obstante, esta última propuesta es más discutible pues, por ejemplo, el uso de superplastificantes o de ciertas adiciones, como por ejemplo cenizas volantes, en la dosificación pueden retrasar el fraguado del hormigón (Pinto y Hover, 2007; Guneyisi et al., 2009) y el uso de finos calizos, muy utilizados en la fabricación de hormigones autocompactantes, lo puede acelerar (Valcuende, 2012b).

Según la norma americana ASTM C 403-08 (ASTM, 2008), el tiempo de fraguado se establece en base al endurecimiento del hormigón, por medio de la resistencia a la penetración de agujas. La realización de este ensayo se efectúa sobre una muestra de mortero resultante de tamizar el hormigón por un tamiz de 5 mm de luz de malla. A intervalos de tiempo regulares se mide la resistencia del mortero a la penetración, considerándose que el inicio de fraguado se alcanza cuando la resistencia es de 3,5 MPa y que el final de fraguado se alcanza cuando la resistencia es de 27,6 MPa.

A pesar de que en la práctica este ensayo es bastante habitual por su sencillez y economía, las medidas obtenidas plantean ciertas dudas:

1. La muestra de mortero obtenido por tamizado del hormigón no incluye los áridos gruesos de tamaño mayor de 5 mm. Como es sabido, el árido grueso en el hormigón puede cambiar significativamente la microestructura, y las propiedades físicas y mecánicas del hormigón (resistencia mecánica, deformabilidad, coeficiente de dilatación térmica, permeabilidad, etc.). En principio, a medida que aumenta el contenido de áridos aumenta la resistencia del hormigón. No obstante, esta afirmación sólo es válida mientras siga existiendo un volumen de pasta suficiente para rellenar todos los huecos, pues de lo contrario aumentaría la porosidad del hormigón con la consiguiente pérdida de resistencia.
2. La hidratación y evolución de la resistencia del hormigón depende de la temperatura de conservación, evolucionando más rápidamente cuanto mayor es la temperatura, pues la temperatura actúa como catalizador de las reacciones de hidratación del cemento. Dado que cuanto mayores son las dimensiones de la muestra de hormigón mayor es el incremento de temperatura que se produce, la utilización de una pequeña muestra de mortero para el ensayo puede no ser totalmente representativa del comportamiento real del hormigón en piezas de mayores dimensiones.
3. En el caso de hormigones de consistencia muy seca es muy difícil obtener una muestra de mortero tamizada, por lo que este ensayo se hace poco práctico para este tipo de hormigones.
4. En este ensayo los valores de inicio y final de fraguado se establecen en base a unos valores arbitrarios asociados al desarrollo de la resistencia mecánica y no exactamente en base a cambios en la microestructura del material (Mehta y Monteiro, 2006). El fraguado hace referencia al incremento progresivo de rigidez de la mezcla sin llegar a desarrollar una resistencia a compresión significativa (Taylor, 1997). Es decir, el término fraguado implica una transición gradual del estado fluido al estado sólido y su moni-

zación es importante porque proporciona el tiempo durante el cual la mezcla es trabajable y el momento a partir del cual empieza a ganar resistencia.

5. La exactitud de la medida de resistencia a la penetración depende en gran medida de la habilidad y experiencia de la persona que realiza el ensayo.
6. La sucesión de datos que se obtienen durante el ensayo es discreta y, por lo tanto, su interpolación puede dar lugar a errores, especialmente en el caso de mezclas con fraguado rápido.

Existen otras alternativas para medir el inicio de fraguado pero que son menos utilizadas por los investigadores, como son la medida de la conductividad eléctrica del hormigón, o la medida de la velocidad de propagación de impulsos de ondas longitudinales de ultrasonidos (Kojima, 1991; Reinhardt et al. 2000; Rapoport et al. 2000; Lee et al. 2004).

b) Edad temprana.

Por lo que respecta al concepto de edad temprana, Turcry et al. (2006) definen esta edad como el período que se extiende desde que el hormigón se vierte hasta el inicio del endurecimiento. Otra definición es la que aparece en la prenorma prNE 83160 (AENOR, 2014), donde se indica que para cada hormigón la edad temprana se corresponde con el período de tiempo que va desde el final de fraguado hasta que se alcanza el 50% de la resistencia a 28 días. Esta definición tiene dos grandes ventajas: primero acota el tiempo, que es variable para cada tipo de hormigón, y segundo, establece dos parámetros que acotan este tiempo. Estos parámetros son medibles de forma normalizada en cualquier entorno. El final del fraguado se puede determinar por medio de la norma UNE 83311-86 (AENOR, 1986), que es equivalente a la norma ASTM C 403-08 (ASTM, 2008), y la resistencia a compresión a 28 días se determina de acuerdo con la norma UNE EN 12390-3 .,

El estudio del período que puede considerarse como edad temprana es fundamental ya que el material se ve sometido durante este tiempo a grandes cambios debidos a la hidratación del cemento (fraguado, liberación de calor, deformaciones debidas a las reacciones químicas) y, por lo tanto, va a influir en la evolución de las propiedades mecánicas a largo plazo (Bentz, 2008). Estos fenómenos, que se originan de manera

endógena, pueden verse afectados por factores externos derivados de las condiciones del entorno que pueden producir deshidratación, aumento de la temperatura y deformaciones de origen térmico. La necesidad de optimizar los procesos de producción de elementos prefabricados, con el fin de reducir los tiempos de encofrado y entrada en servicio, son también factores que influyen en la exigencia de obtener resistencias más rápidamente.

Tabla 1 Definición del período de edad temprana (Nehdi & Soliman, 2011) y elaboración propia

Período Edad Temprana	Campo de estudio	Referencia
Hasta destesado en vigas pretensadas (16-24 horas)		(Koehler, et al., 2007)
Primeras horas/Primeros días	Fraguado	(Pigeon, et al., 2003)
6-8 horas después del vertido		(Turcry y Loukily, 2011)
Fin fraguado hasta 50% f_{ck}	Fraguado y Resistencia	(AENOR, 2014)
1-2 días primeros	Propiedades del hormigón	(Mehta & Monteiro, 2006)
24 horas después de la puesta en obra del hormigón	Retracción	(Wongtanakitcharoen & Naaman, 2007), (Holt, 2001)
	Retracción y Fluencia	(Brooks & Megat-Johari, 2001)
	Fluencia y relajación	(Holt & Leivo, 2004)
Hasta 48 horas	Propiedades del hormigón	(RILEM, 1981)
3 días después de la puesta en obra del hormigón	Resistencia	(Khan, 1995), Oluokun et al., 1991)
4 días después del vertido	Resistencia	(Kahouadji et al., 1997)
5 días después del vertido	Retracción y Fluencia	(Altoubat, 2002)
	Fluencia	(Østergaard et al., 2001)
Hasta 7 días después del vertido	Resistencia	(Jin y Li, 2000)
	Retracción	(Nassif et al., 2003)
	Resistencia	(Kovler et al., 1999)
	Fluencia y relajación	(Pane y Hansen, 2002)
	Fluencia	(Bissonnette y Pigeon, 1995)
Hasta 10 días después del vertido		(Atrushi, 2003)

Para el caso de hormigones convencionales vibrados, aplicando los criterios establecidos en la prNE 83160 (AENOR, 2014) y en la Instrucción EHE-08 (MFOM, 2012), se

puede establecer que el final de la edad temprana se corresponde con los valores de la tabla 2.

Tabla 2. Proyección de edad respecto al cemento a utilizar.

Condición del hormigón	Cemento	Relación a/c	Edad a la que $f_{ci}=0.50 f_{c28}$	
			horas	días
Endurecimiento rápido	CEM 42,5R	$\leq 0,60$	36	1,5
	CEM 52,5			
	CEM 52,5R			
	CEM 32,5R	$\leq 0,50$	48	2
	CEM 42,5			
Endurecimiento normal	CEM 32,5	$\geq 0,50$	84	3,5
	CEM 42,5			

Los valores de la Tabla 2 se han obtenido utilizando la ecuación propuesta en los códigos modelos MC-90 (CEB, 1993), MC-10 (FIB, 2013) y que aparece en los comentarios de la EHE-08:

$$f_c(t) = \beta_{cc}(t) f_{c,28} \quad 2.1$$

donde $\beta_{cc}(t)$ es un coeficiente de valor:

$$\beta_{cc}(t) = e^{\left[s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right]} \quad 2.2$$

siendo:

$f_c(t)$ Resistencia a compresión a la edad t

$f_{c,28}$ Resistencia a compresión a la edad de 28 días

s Coeficiente que depende del tipo de cemento y que adopta los valores de la tabla 3

Tabla 3 Coeficiente s en función de la clase del cemento

Coeficiente	Clase resistente del cemento (MPa)		
	42,5R 52,5 - 52,5R	32,5R 42,5N	32,5 N
s	0,20	0,25	0,38

2.3 EFECTO DEL FILLER CALIZO EN EL HAC

La utilización de adiciones en los hormigones y cementos es una práctica cada vez más extendida por razones medioambientales y de sostenibilidad. El HAC no es ajeno a esta práctica ya que la adición de filler o de adiciones cementantes es casi imprescindible para obtener una buena autocompactabilidad.

Por otra parte, no hay que olvidar que los cementos con adición de finos vienen utilizándose desde hace tiempo ampliamente en Europa. La norma europea (AENOR, 2000) contempla dos clases, el CEM II/A-L y el CEM II/B-L, en los que el contenido máximo de filler calizo es del 20 y 35%, respectivamente. Además, los cementos Portland sin adiciones (CEM I) también pueden llevar hasta un 5%. El uso de hasta un 5% de filler calizo también está permitido por las normas canadienses de cementos desde principios de los años 89 y en más de otros 25 países ya que se ha visto que sustituciones de hasta un 5% prácticamente no tienen influencia en las propiedades mecánicas del hormigón endurecido.

Los finos calizos se han utilizado tradicionalmente como sustitución del cemento portland (Bonavetti et al., 2003), no solo para reducir la huella de carbono sino para mejorar algunas propiedades, como aumentar la resistencia a compresión a edades tempranas, disminuir el sangrado en hormigones con bajo contenido de cemento (Barluenga et al., 2015) o reducir la sensibilidad a los defectos de curado (Moir y Kelham, 1997). Así, por ejemplo, Chen y Kwan (2012) sustituyeron parte del cemento con el fin de disminuir el calor de hidratación, y obtuvieron resistencias a compresión ligeramente mayores. Igualmente, Li y Kwan (2015) observaron una mejora de la resistencia a tracción, del módulo de deformación y de la durabilidad.

La aparición de los aditivos superfluidificantes de última generación ha permitido la utilización de mayor cantidad de finos sin que ello afecte a la trabajabilidad de la mezcla y no sea necesaria la adición de más cantidad de agua, lo que ha hecho posible la aparición de los HAC a finales de los años 80 en Japón (Ozawa et al., 1988). Estos hormigones se fabrican con un alto contenido en pasta, cuyo objetivo no es únicamente rellenar los huecos entre los áridos, sino también crear una película de pasta alrededor de los áridos que actúe como lubricante para conseguir una buena fluidez y mantenga

suficientemente separados los áridos para evitar bloqueos al pasar por zonas estrechas. De hecho, en mezclas muy fluidas y con baja cohesión las partículas más grandes entran en contacto unas con otras y, debido al mayor rozamiento entre ellas, durante el vertido del hormigón se puede producir un bloqueo de los áridos al pasar por secciones estrechas. Una de las soluciones más empleadas para aumentar el volumen de pasta sin aumentar el contenido de cemento es la utilización de finos calizos (Bonavetti et al., 2003; Li y Kwan, 2015).

El filler calizo tiene una influencia importante en el comportamiento del HAC, tanto en estado fresco como endurecido (Poppe y De Schutter, 2005; Ye et al., 2007; Barluenga et al., 2015). En ocasiones es considerado como una adición inerte, es decir una adición tipo I. No obstante, existen investigadores que entienden que aunque el filler no tiene carácter puzolánico sí que se puede considerar como una adición mineral de baja reactividad. A este respecto De Schutter señala que el filler puede afectar al hormigón auto-compactante de varias formas: efecto químico, efecto físico y efecto de relleno.

a) Efecto químico.

El efecto químico ha sido estudiado por Bonavetti et al. (2003) o Lothenbach et al. (2008) revelando que en cementos portland la incorporación de filler calizo modifica las reacciones. Durante las primeras 24 horas las fases hidratadas del cemento son prácticamente iguales en presencia o no de filler, pero posteriormente empiezan a haber diferencias (Lothenbach et al.; 2008). En los ensayos realizados por Bonavetti et al. (2003), tres días después del amasado se detectó monocarboaluminato en la pasta hidratada. Este compuesto, que no está presente en los cementos sin finos calizos (Figura 5), también ha sido detectado por otros investigadores (Lothenbach, et al., 2008). La presencia de este compuesto evita que la etringita, que no es un compuesto estable, se transforme en monosulfoaluminato (la etringita tiende a reaccionar con el C_3A libre para formar monosulfoaluminato, pero al haberse formado monocarboaluminato, $C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$, no queda C_3A libre). Al ser la etringita más voluminosa que el monosulfoaluminato, esto da lugar a un aumento del volumen total de las fases sólidas, reduciéndose la porosidad (Lothenbach, et al., 2008).

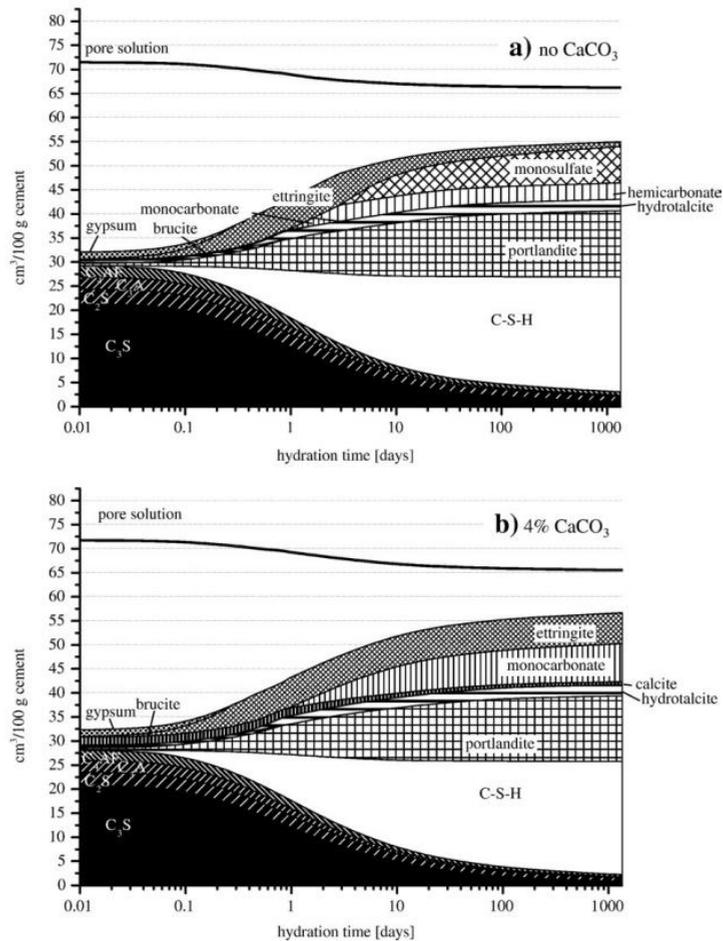


Figura 5. Cambios producidos durante la hidratación del cemento con y sin finos calizos (Lothenbach, et al., 2008)

b) Efecto físico.

Varios autores señalan que el proceso de hidratación dentro de las primeras horas se acelera como consecuencia de la presencia de los finos calizos, lo cual hace que se consigan resistencias a compresión más altas a edades tempranas (Bosiljkov, 2003). Las partículas finas proporcionan sitios de nucleación adicionales en la superficie del relleno para los hidratos del cemento portland. Al haber otras superficies sobre las que depositarse los hidratos, el espesor de la capa de hidratos sobre las fases anhidras del clínker se reduce, mejorando la reacción de las fases anhidras y acelerando así la hidratación.

c) Efecto relleno.

Se produce un mejor empaquetamiento de las partículas como consecuencia de la adición de los finos calizos, los cuales hacen la distribución de partículas más ancha, proporcionando una matriz cementante más densa al ocupar los espacios entre las partículas de cemento que, de otro modo, estarían ocupados por agua. En general, este mejor empaquetamiento de las partículas, además de originar una menor porosidad total en el hormigón, hace que la red de poros sea más tortuosa, por lo que, según la ley de Darcy de circulación de fluidos por un lecho poroso, el coeficiente de permeabilidad del material es más bajo, dado que éste es directamente proporcional a la porosidad del sólido y al cuadrado del radio medio del poro, e inversamente proporcional al cuadrado de la tortuosidad de la estructura porosa.

Según algunos autores, debido a un mayor contenido de filler, en los HAC la estructura porosa de la pasta tiende a ser más densa que en los HCV (Boel y De Schutter, 2006; Boel y De Schutter, 2007a; Boel y De Schutter, 2007b; Valcuende et al., 2012), lo que les confiere mejores prestaciones (Valcuende et al., 2005). Así, por ejemplo, en los ensayos de porosimetría de mercurio realizados por Valcuende et al. (2007) se observa que tanto el contenido total de poros capilares (tamaño entre $0,01 \mu\text{m}$ y $1 \mu\text{m}$) como el de poros de gel (tamaño inferior a $0,01 \mu\text{m}$) es menor en los hormigones autocompactantes (Figura 6).

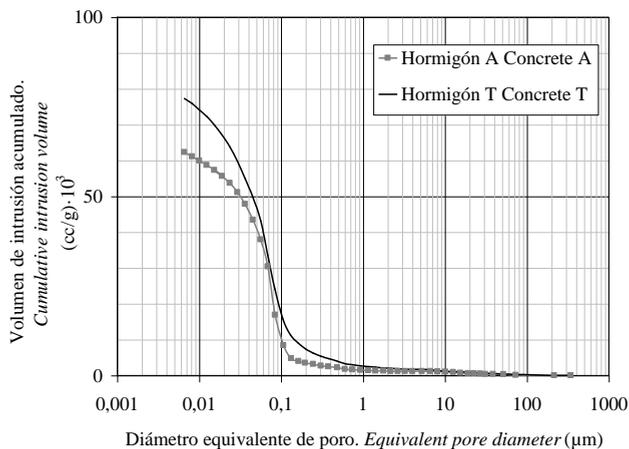


Figura 6. Distribución de tamaños de poro normalizada en hormigones autocompactantes (A) y hormigones convencionales (T) (Valcuende et al., 2007).

Trägårdh (1999) o Zhu y Bartos (2005) ponen de manifiesto también que las zonas de transición árido-pasta y acero-pasta, que constituyen el punto más débil de los sistemas cementicios, son más densas (Figura 7), más resistentes y más rígidas en los HAC que en los HCV fabricados con la misma relación a/c; además, Leemann et al. (2006) señalan que dicha zona es algo más estrecha.

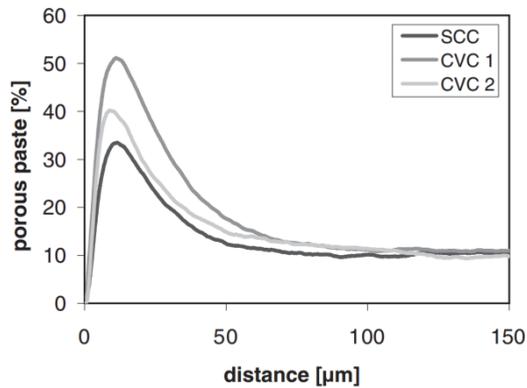


Figura 7. Volumen medio de poros en la zona de transición árido-pasta en hormigones autocompactantes (SCC) y hormigones convencionales (CVC), medido desde la cara del árido (Leemann et al., 2006).

Por otro lado, tal y como se ha comentado anteriormente, los ensayos realizados por diversos autores ponen de manifiesto que los finos calizos influyen claramente en la hidratación de la pasta. De hecho, en la Figura 8, donde se ha representado el desprendimiento de calor durante las primeras horas, se observa que los finos provocan tres fenómenos: un acortamiento del periodo latente (etapa 2 de la figura 2), una aceleración de las reacciones de hidratación durante el periodo de fraguado (etapa 3 de la figura 2) y la aparición de un tercer pico de calor al cabo de unas 12 horas. Aunque existen ciertas dudas al respecto, los dos primeros fenómenos podrían justificarse por el "efecto físico" de los finos, al actuar estos como centros de nucleación para los hidratos del cemento portland. El tercer fenómeno podría deberse al "efecto químico", según el cual los finos no son realmente inertes sino que juegan un papel activo en las reacciones, al activar reacciones que no se producen o se producen de forma menos importante en los hormigones convencionales sin finos calizos. En concreto, la aparición del tercer pico de calor a las 12 horas podría explicarse por la formación de monocarboaluminato en vez de en monosulfoaluminato, al ser el primero más estable, lo que da lugar a un mayor despren-

dimiento de calor. No obstante, tal y como se ha comentado antes, esta última cuestión es discutible, pues según algunos autores, como Ye et al. (2007), los finos calizos no participan en las reacciones químicas, pero según otros autores, como Lothenbach et al. (2008), sí que lo hacen.

Como consecuencia de todos estos aspectos, el filler calizo tiende a proporcionar mayores resistencias a compresión a edades tempranas, así como a 28 días (Bosiljkov, 2003). También Klug y Holschemacher (2003), Valcuende et al. (2005) o Domone (2007), afirman que la adición de filler calizo contribuye significativamente a la resistencia a compresión al menos hasta edades de 28 días. Igualmente, Sonebi et al. (2000), González (2002) o Assie (2005) señalan que para iguales relaciones agua/cemento los hormigones con filler calizo como adición poseen mayores resistencias que aquellos hormigones autocompactantes que no poseen adiciones. También Zhu y Gibbs (2005) llegan a la misma conclusión, obteniendo a los 28 días diferencias entre ambos hormigones de hasta un 40% para relaciones agua/cemento bajas (Figs. 9, 10).

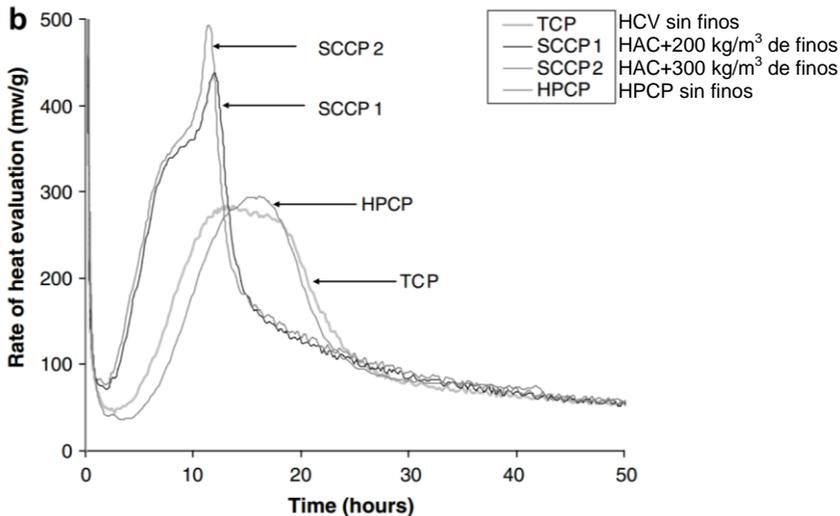


Figura 8. Desprendimiento de calor en pastas con distinto contenido de finos calizos: (Ye et al., 2007)

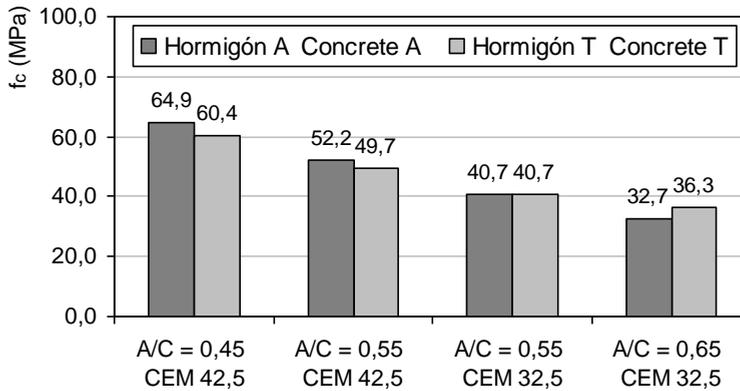
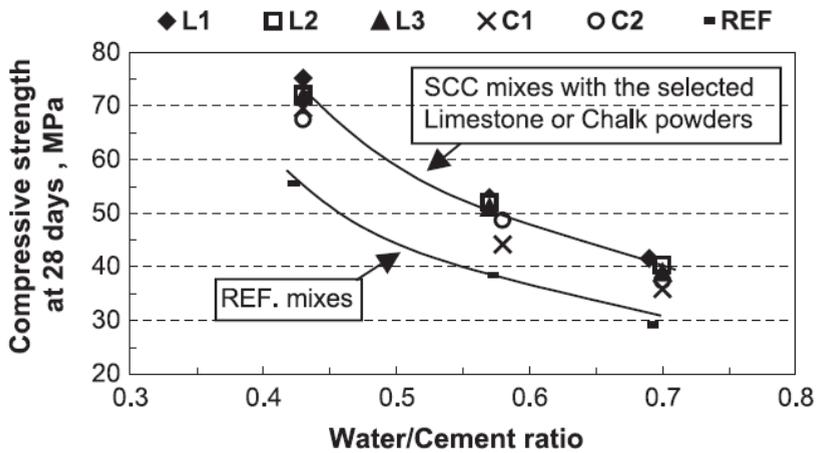


Figura 9. Resistencia a compresión a la edad de 28 días en hormigones autocompactantes (A) y hormigones convencionales (T) (Valcuende et al., 2007).



HAC: L1 a L3 Filler Calizo, C1 y C2 Filler de Creta. HCV: REF

Figura 10. Resistencia a compresión a la edad de 28 días en hormigones autocompactantes y hormigón convencional (Zhu y Gibbs, 2005).

2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES

2.4.1 Introducción

En los hormigones autocompactantes el contenido de finos es más elevado que en los hormigones tradicionales vibrados. Tal y como se ha señalado anteriormente, debido a un mayor contenido de filler, en los hormigones autocompactantes la estructura porosa de la pasta es normalmente más densa que en los hormigones convencionales (Boel y De Schutter, 2006; Boel y De Schutter, 2007a; Boel y De Schutter, 2007b; Valcuende et al., 2012), lo que les confiere mejores prestaciones mecánicas y mayor durabilidad (Valcuende et al., 2005).

Estas mejores prestaciones también pueden ser debidas a una mayor homogeneidad del material (Valcuende, 2009) y a la ausencia de compactación durante su puesta en obra hormigón (Klug y Holschemacher, 2003). La ausencia de vibración durante la colocación del HAC hace que se eliminen los defectos que este proceso conlleva (Aïtcin, 1999; Chan et al., 2003), ya sea por exceso de vibrado (sangrado o segregación) o por falta del mismo (presencia de aire atrapado). Para una determinada dosificación, el volumen de huecos está condicionado por el proceso de vertido y vibrado. La importancia de que ambos procesos se hagan correctamente lo pone de manifiesto el hecho de que incrementos en el contenido de aire reducen la resistencia a compresión considerablemente.

Así, en un HCV, la presencia de un 5% de aire puede llegar a reducir la resistencia hasta en un 30%, y si el contenido en aire se incrementa hasta un 10%, la resistencia puede disminuir hasta la mitad (Tattersall, 1991). Según Makishima et al. (2001), en HAC un 1% de aire puede disminuir la resistencia entre un 3% y un 7%, siendo este descenso mayor cuanto mayor es la resistencia del hormigón.

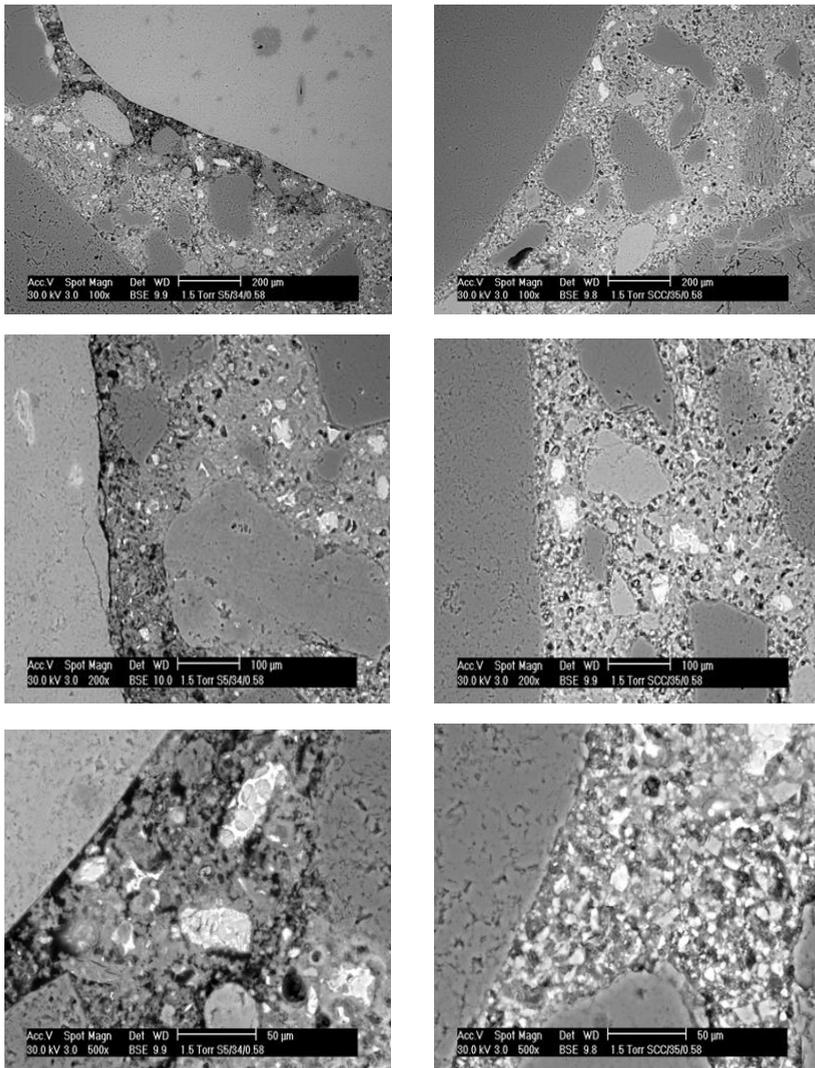
Hormigón Convencional (HCV) $a/c=0,60$ Hormigón Autocompactante (HAC) con filler calizo $a/c=0,60$

Figura 11 Interfaz árido-pasta en HCV y en HAC con filler calizo, relación $a/c=0,60$ (Microscopía electrónica 200 μm , 100 μm y 50 μm). (Coppola, Cerulli y Salvioni, 2004).

En la figura 11 puede observarse unas largas áreas oscuras en la zona de interfaz del hormigón convencional, lo cual confirma la alta porosidad en la microestructura de su zona de interfaz

Por lo que respecta a la homogeneidad, de acuerdo con los escasos trabajos realizados hasta la fecha para determinar la resistencia a la segregación de los HAC, los resultados obtenidos por Khayat et al. (1997, 1999), Gibbs y Zhu (1999), Zhu et al. (2001) y Valcuende et al. (2009), donde se analizan algunas de las propiedades mecánicas y físicas del material en piezas de 1,5 y 3 m de altura, parecen indicar que la estabilidad de las mezclas es similar, o incluso algo mejor, a la de los hormigones convencionales. Esta mayor estabilidad no sólo se traduce en una distribución más uniforme de sus propiedades mecánicas, sino que también parece influir en la calidad de las interfaces árido-pasta y acero-pasta (que constituyen el punto más débil de los sistemas cementicios) habiéndose observado por microscopía electrónica y mediante ensayos de nanoindentación una estructura más densa, más resistente y más rígida de la zona de transición (Trägårdh, 1999; Petrov et al., 2001; Coppola et al., 2004; Zhu y Bartos, 2005; Olafusi et al., 2015) (Figura 11); incluso, según Leemann et al. (2006) dicha zona es algo más ancha (Figura 7).

Por otra parte, en los hormigones se produce una concentración de agua en la cara inferior de los áridos debido al sangrado, lo que incrementa en estas zonas la relación a/c (Aïtcin, 1999) y por lo tanto afecta negativamente a las propiedades mecánicas. Las diferencias entre las partes inferior y superior de los áridos o de las armaduras es menor en los HAC que en los HCV (Zhu et al., 2004; Zhu y Bartos, 2005). No obstante, según Hoffmann y Leemann (2003) no existen diferencias significativas entre ambos tipos de hormigón, si bien los hormigones autocompactantes tienden a presentar una mayor homogeneidad cuando se trabaja con piezas de geometría compleja o fuertemente armada, donde no es posible garantizar una correcta compactación de los hormigones convencionales, siendo, por lo tanto, las condiciones de ejecución un factor importante a tener en cuenta.

Por lo que respecta al estudio de las propiedades mecánicas a edades tempranas (inferiores a 48 horas) de los HAC y de los HCV las investigaciones realizadas hasta la fecha son muy escasas, centrándose casi exclusivamente todos los trabajos en analizar la retracción y no otras propiedades como la resistencia a compresión, la resistencia a trac-

ción o el módulo de deformación, debido probablemente a la dificultad en analizar estas propiedades mediante ensayos durante las primeras horas.

La utilización de adiciones activas produce una mejora en la microestructura (menor porosidad y mejor distribución de los poros), especialmente en la zona de transición interfacial árido-pasta, mejorando la adherencia entre ambos elementos, lo que influye de manera significativa en las resistencias mecánicas.

2.4.2 Resistencia a compresión

La calidad del hormigón se establece generalmente por referencia a su resistencia a compresión, si bien, en ocasiones, pueden ser más importantes otras características, como por ejemplo la durabilidad o la impermeabilidad. No obstante, la resistencia suele dar una imagen general de la calidad del hormigón, puesto que está directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento endurecida (Neville, 1996). La resistencia es un valor convencional establecido a través de un ensayo normalizado y puede definirse como la tensión para la que se alcanza el agotamiento.

Para una misma relación a/c algunos investigadores indican que la resistencia a compresión de los hormigones convencionales es ligeramente menor que la de los hormigones autocompactantes (Buron et al, 2006; Agranati, 2008; Vilanova, 2009; Coppola et al, 2004) (Figura 12). Por el contrario, otros autores como Parra (2005), Leemann y Hoffman (2005), Marti et al., (2006) o Ambroise y Perea (2001) obtienen resistencias similares, con diferencias que suelen ser inferiores al 10%. En cualquier caso, las comparaciones entre hormigones son difíciles de establecer ya que en muchas investigaciones se han utilizado HAC que incorporan, a diferencia de los HCV de referencia, adiciones activas para satisfacer la gran demanda de finos que precisan este tipo de hormigones. Estas adiciones conducen generalmente a una mayor resistencia a compresión. De hecho, Druta (2003) y Pedersen et al. (2003), entre otros, afirman que por regla general el uso de adiciones en el hormigón autocompactante aunque sean inertes o hidráulicamente inactivas, mejoran en líneas generales las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante e incrementan su resistencia a compresión.

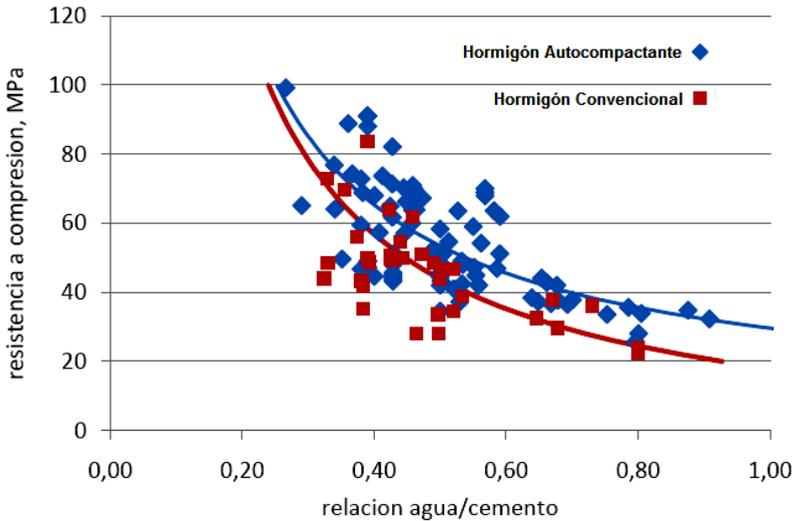


Figura 12. Relación entre la resistencia a compresión y la relación a/c en hormigones autocompactantes y en hormigones convencionales (Agranati, 2008).

La gran variedad de parámetros que afectan a la resistencia hacen complicado la generalización de conclusiones. Así, por ejemplo, la ausencia de compactación en los HAC mejora la adherencia entre el árido y la pasta, y además el uso de aditivos permite una mayor dispersión de las partículas de cemento en la pasta, consiguiendo así mayor resistencia (EFNARC, 2005). Este aspecto, junto a la baja relación agua/finos y el uso muchas veces de adiciones activas influye en la mejora de la resistencia mecánica de los HAC (Skarendahl y Petersson, 1999; Klug y Holschemacher, 2003; Georgiadis et al., 2007; Bermejo et al., 2008).

Por el contrario, el mayor volumen de pasta en los HAC puede provocar una disminución de la resistencia como consecuencia de la menor presencia de árido grueso. De hecho, dado que la relación arena/grava influye sobre la resistencia a compresión, los HAC fabricados con mayor cantidad de arena tienen menos resistencia a compresión, obteniendo las mayores resistencias para relaciones filler/árido total del orden de 0,40 (Vilanova et al., 2011). No obstante, investigaciones realizadas por Spengler y Schiessl (2001) y por Köning et al. (2001) muestran que a pesar del elevado contenido en arena de los HAC la respuesta mecánica en estado endurecido no parece empeorar significativamente.

Por lo que respecta a los finos, también es habitual emplear grandes cantidades para la fabricación de HAC, lo que permite acelerar determinadas reacciones de hidratación, en especial la del silicato tricálcico, dando lugar a una mejora de la resistencia temprana. Además, los finos actúan como centros de nucleación de los hidratos formados durante las reacciones de hidratación, disminuyendo el tamaño de los cristales de portlandita y densificando la zona de transición árido-pasta. No obstante, esta mejora del comportamiento depende no solo del contenido de finos, sino también de su finura y naturaleza. Diversas investigaciones han mostrado que el empleo de finos calizos de gran finura dan lugar a una estructura más compacta.

2.4.2.1 Evolución de la resistencia

La evolución de la resistencia a compresión es similar en los HCV y en los HAC (Agranati, 2008), aunque la presencia de adiciones activas o finos afecta también a esta evolución (Parra, 2005). Sukumar et al. (2008), en estudios realizados a partir de las 12 horas de hormigonado hasta la edad de 28 días, señalan que el incremento de resistencia a compresión en los HAC es ligeramente superior al de los hormigones convencionales, proponiendo las siguientes expresiones para los dos tipos de hormigón:

- Hormigón convencional:

$$f_c(t) = \frac{t \cdot f_{c,28}}{4.7 + 0.833 t} \quad 2.3$$

- - Hormigón autocompactante:

$$f_c(t) = \frac{t \cdot f_{c,28}}{4.2 + 0.85 t} \quad 2.4$$

siendo:

$f_c(t)$ Resistencia a compresión a la edad t , en MPa

$f_{c,28}$ Resistencia a compresión a la edad de 28 días

t Edad en días

Según estos mismos autores, en hormigones de 30 a 70 MPa, la resistencia a las 12 horas alcanza más del 10% de la resistencia a 28 días, y la resistencia a las 24 horas, es del orden del 18-20% de la resistencia a 28 días.

El tipo de adición influye sobre el desarrollo de las resistencias, al influir en la fase hidratada del cemento. pueden acelerar la evolución de la resistencia a compresión a temprana edad en HAC (Persson, 2005; Druta, 2003). Sin embargo, cuando las adiciones son puzolánicas los HAC ven retrasado el desarrollo de la resistencia (Song 2001). Klug y otros (Klug & Holschemacher, 2003) han estudiado (figura 13) la influencia de varios tipos de filler y de adiciones la resistencia a compresión

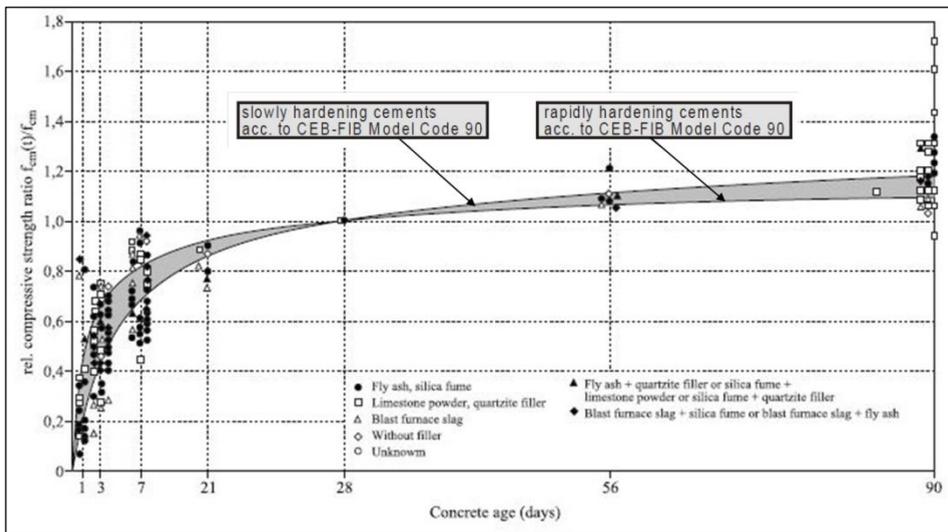


Figura 13 Evolución de la resistencia a compresión relativa (relación $f_{cm}(t)/f_{cm}$) para HAC hechos con diferentes tipos de filler y comparados con las predicciones del CEB Model Code 90² (Klug & Holschemacher, 2003)

El tipo y cantidad de aditivo también puede afectar a la resistencia a compresión y a su evolución. Los superplastificantes de tipo policarboxilato aceleran la hidratación del

² En la actualidad es el fib Model Code 2010 el documento de referencia que aplicado a la figura no supone ninguna variación de ésta

cemento, mejorando la resistencia a compresión (Roncero y Gettu, 2002; ACI, 2007), si bien algunas clases de aditivos pueden retrasar el inicio del endurecimiento de la pasta de cemento (Bosljkov, 2003). De hecho, en investigaciones realizadas por Khayat et al. y por Vieira y Bettencourt (2003) con aditivos a base de polímeros de naftaleno mostraron que la resistencia a compresión de los HAC se desarrolla más lentamente a edades tempranas.

La resistencia a compresión del hormigón se suele determinar mediante la rotura de probetas. Ahora bien, para establecer la resistencia a edades tempranas, cuando la mezcla apenas ha adquirido rigidez, algunos autores plantean la posibilidad de realizar ensayos no destructivos, como por ejemplo la utilización de métodos de ultrasonidos que permiten una monitorización del hormigón durante su fraguado y endurecimiento, aunque no proporcionan un valor real de la resistencia. Este método, al igual que otros basados en la medición de la reflexión de ondas ultrasónicas o la medición de ondas acústicas generadas por impacto, miden esencialmente el módulo dinámico del hormigón y, por lo tanto, es necesario establecer un modelo que permita correlacionar este parámetro con la resistencia a compresión. Así, por ejemplo, Venkateela et al. (2013), en ensayos realizados en hormigones de edades comprendidas entre 12 y 72 horas, proponen para el caso particular del hormigón estudiado una expresión potencial que tiene en cuenta la edad, el volumen de áridos y el tamaño máximo del árido. Voigt et al. (2006a) en morteros ensayados a las pocas horas de su fabricación (entre 9 y 86 horas) obtuvieron buenas correlaciones entre la resistencia a compresión medida en probetas y los valores obtenidos por el método de reflexión de onda ultrasónica (Figura 14). En estos ensayos también se observó que los valores de reflexión empiezan a aumentar casi al inicio del fraguado, cuando todavía no es posible medir la resistencia por los medios convencionales. En definitiva, estos métodos pueden ser un buen complemento para estimar de forma fiable la evolución de la resistencia con la edad en las fases previas a poder realizar ensayos de rotura de probetas. Según Voigt (2005), la relación entre resistencia a compresión y reflexión de onda sigue una relación bilineal, con una pendiente más suave al principio.

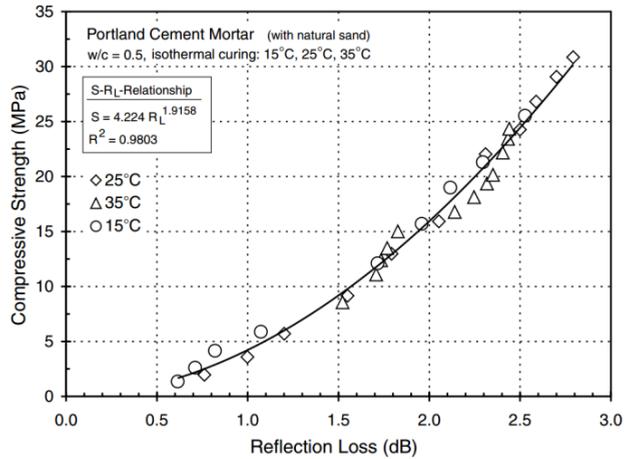


Figura 14. Relación entre resistencia a compresión medida en probeta y los valores medidos mediante el método de reflexión de onda ultrasónica (Voigt et al., 2006a)

Es importante señalar que según algunos autores los resultados que se obtienen cuando se trabaja con ondas longitudinales o primarias (tipo P) no son tan fiables como cuando se trabaja con ondas de corte o secundarias (tipo S). De acuerdo con D'Angelo et al. (1995) o Voigt et al. (2006b) ambos tipos de ondas reflejan los cambios que se producen en la pasta durante el fraguado, si bien las ondas S reflejan mucho mejor el inicio de fraguado y por lo tanto el instante en que la resistencia a compresión empieza a desarrollarse.

Según los resultados obtenidos por Voigt et al. (2006b) mediante rotura de probetas de mortero fabricadas mediante una técnica de extrusión para poder romperlas a edades muy tempranas, inicialmente el incremento de resistencia sigue una ley tipo potencial y posteriormente una ley hiperbólica (Figura 15).

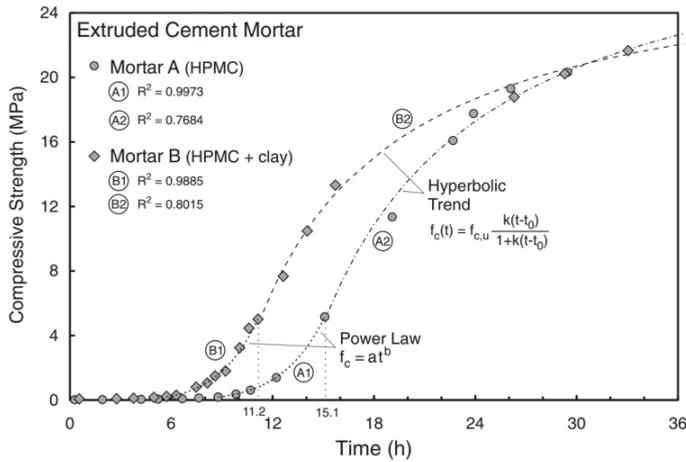


Figura 15. Evolución de la resistencia a compresión con la edad obtenida mediante rotura de probetas fabricadas mediante técnica de extrusión (Voigt et al., 2006b)

De acuerdo con estos ensayos, a edades inferiores a 6 horas la resistencia es prácticamente nula (Figura 16) y de hecho se observa que el agotamiento es por aplastamiento, que es la forma habitual de rotura cuando el material tiene un comportamiento plástico muy deformable. Entre aproximadamente 6 y 8 horas la resistencia aumenta y la forma de rotura cambia, presentando las probetas una fisuración por cortante. Este modo de rotura indica que como consecuencia de la hidratación del cemento ya se ha alcanzado una estructura rígida que permite soportar ciertas fuerzas de compresión. No obstante, esta rigidez inicial, aportada por las fuerzas de cohesión entre partículas, todavía no es lo suficientemente importante para que se desarrollen esfuerzos perpendiculares de tracción y por ello se produce una rotura por cortante al igual que sucede, por ejemplo, en los suelos cohesivos cuando se ensayan a compresión. Según Voigt et al. (2006b) se puede asumir que este tipo de rotura por cortante indica el inicio del fraguado. Además, según estos mismos autores, esta hipótesis queda validada por el hecho de que a partir de las 8-9 horas el incremento de resistencia pasa a seguir una ley de tipo potencial que según Popovics (Popovics, 1998) es característica del proceso de fraguado de los materiales de base cementante. Esta ley puede expresarse de la siguiente forma:

$$f_c = at^b \quad 2.5$$

donde a y b son constantes que dependen del tipo de hormigón y t es la edad del hormigón expresada en horas.

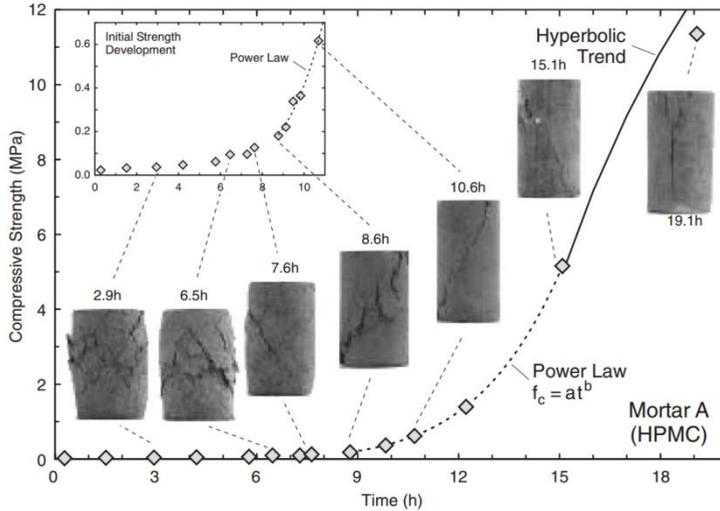


Figura 16. Evolución de la resistencia a compresión con la edad obtenida mediante rotura de probetas fabricadas mediante técnica de extrusión (Voigt et al., 2006b)

A partir de las 10-11 horas ya se puede considerar que hay resistencia a compresión. La rotura por cortante se sigue produciendo en las probetas hasta la edad aproximada de 15 horas, pero en las fisuras ya no se observan signos de aplastamiento. Más allá de las 15 horas la evolución de la resistencia pasa de ser de tipo potencial a tipo hiperbólica. Este cambio de tendencia también lo señaló Voigt en un trabajo anterior (Voigt, 2005), aunque entonces dicho autor hablaba de tendencias lineales. Las probetas ensayadas a las 19 horas de su fabricación ya presentan fisuras verticales, que son un claro signo de la existencia de esfuerzos de tracción perpendiculares al esfuerzo principal de compresión.

La ecuación que rige el incremento de resistencia en esta segunda fase, es decir una vez finalizado aproximadamente el fraguado, puede expresarse de la siguiente forma:

$$f_c(t) = \frac{k(t-t_0)}{1+k(t-t_0)} f_{c,\infty} \quad 2.6$$

siendo:

- $f_c(t)$ Resistencia a compresión a la edad t , en MPa
- $f_{c,\infty}$ Máxima resistencia a compresión (es decir, a tiempo infinito)
- k Velocidad a la que crece la resistencia
- t_0 Edad a la que empieza a aumentar la resistencia (en esta segunda fase)
- t Edad a la que se mide la resistencia

2.4.2.2 Utilización de ultrasonidos

Por lo que respecta a los ultrasonidos, varias investigaciones han mostrado que existe también una correlación entre la velocidad de los impulsos ultrasónicos y el incremento de resistencia con la edad (Blitz y Simpson, 1996), habiéndose establecido igualmente diversas relaciones empíricas tanto para hormigones convencionales (Galan, 1967; Lin et al., 2003; Demirboga et al., 2004) como para hormigones autocompactantes (Ulucan et al., 2007). No obstante, comparando los resultados obtenidos por los distintos investigadores, es fácil observar que estas relaciones no son válidas para todos los hormigones, sino que deben ajustarse para cada dosificación. Muchas de las expresiones utilizadas son de tipo exponencial:

$$f_c = a e^{bv_c} \quad 2.7$$

siendo

- a y b constantes que dependen del tipo de hormigón y
- v_c velocidad de los impulsos ultrasónicos.

Existen algunos equipos, como el Ultrasonic Cement Analyzer, que permiten incluso monitorizar de forma continua la velocidad de paso de las ondas ultrasónicas controlando al mismo tiempo la temperatura de la mezcla (Figura 17). La velocidad de transmisión de la onda da una indicación de la resistencia a compresión durante las primeras horas (Figura 18).



Figura 17. Equipo Ultrasonic Cement Analyzer (Shuker et al., 2014)

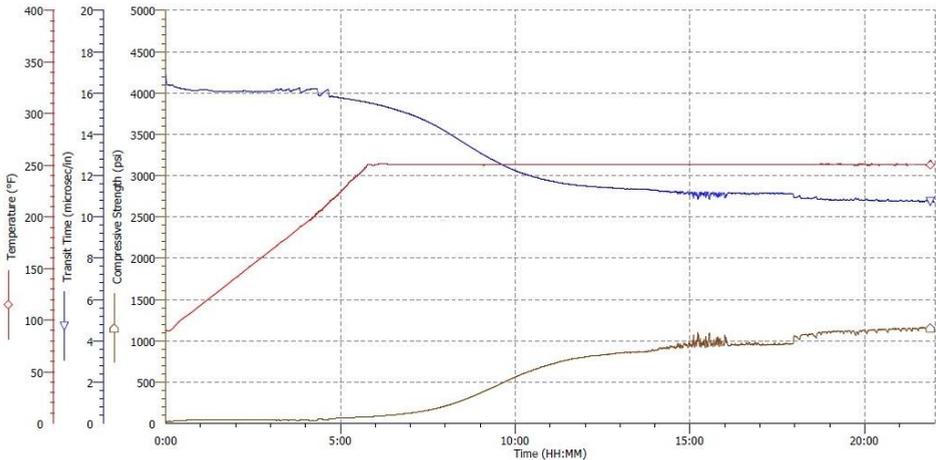


Figura 18. Estimación de la resistencia a compresión mediante el equipo Ultrasonic Cement Analyzer (Shuker et al., 2014)

2.4.2.3 Utilización de la resistividad eléctrica

La resistencia a compresión también se ha intentado estimar a través de la resistividad eléctrica del material (Xiao y Wei, 2011; Hongyu et al., 2015), ya que la medida de este parámetro es bastante sensible a los procesos de hidratación del cemento y a la microestructura del hormigón (Gu et al., 1993; Zhang et al., 2009). De hecho, en los ensayos realizados por Xiao y Wei (2011) en pastas de cemento de edad comprendida entre 24 y 72 horas se obtuvieron excelentes correlaciones (Figura 19). En el hormigón la carga se

conduce a través de los iones disueltos en la disolución de poro, pudiéndose asumir que los áridos son aislantes eléctricos, ya que su resistividad es varios órdenes de magnitud superior a la de la solución acuosa. La variación de la resistividad eléctrica con la edad aporta información sobre los cambios físicos y químicos que se están produciendo en el hormigón (ver apartado 2.2.2: "La hidratación del cemento durante las primeras horas").

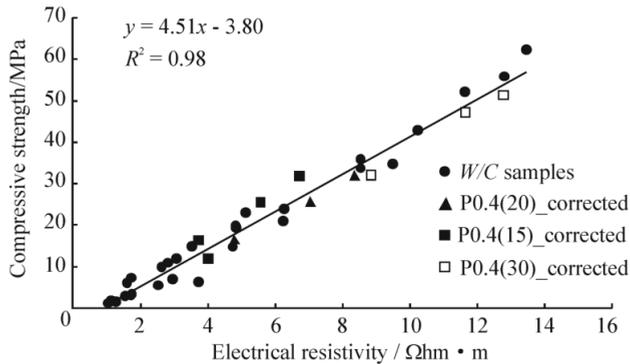


Figura 19. Relación entre la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica en pastas de cemento (Xiao y Wei, 2011)

2.4.3 Resistencia a tracción

Aunque no suele contarse con la resistencia a tracción del hormigón a efectos resistentes, es necesario conocer su valor porque juega un papel importante en los fenómenos relacionados con la fisuración y la respuesta estructural a las deformaciones frente a esfuerzo cortante o en las situaciones en las que falla la adherencia de las armaduras, etc. Por otra parte, en ciertos elementos de hormigón, como en el caso de los pavimentos, puede ser más interesante el conocimiento de la resistencia a tracción que de la resistencia a compresión.

La mayor parte de los artículos publicados muestran que para una determinada resistencia a compresión los HAC tienden a alcanzar una resistencia a tracción ligeramente superior a la de los HCV (Köning et al., 2001; Hauke, 2001; Fava et al., 2003), aunque los resultados son algo contradictorios. Por ejemplo, Köning et al. (2001) y Hauke (2001) registran un incremento de resistencia en HAC fabricados con cenizas volantes del 13,5 % y del 9,1 %, respectivamente. Según Fava et al. (2003), en HAC con escoria granulada de alto horno, este incremento es del 10,5%. Por el contrario, cuando se em-

plea como adicción filler calizo, la tendencia parece invertirse. Fava et al. (2003) y Daoud et al. (2003) registran en el HAC una resistencia a tracción un 11,15% y un 7,9 %, menor que en el HVC, respectivamente. Igualmente, según Parra et al. (2011) en HAC fabricados con filler calizo la resistencia a tracción indirecta es inferior a la de los HCV. Según estos autores la evolución resistente no es la misma en ambos tipos de hormigones. A siete días la diferencia entre ambos es pequeña, tendiendo incluso a desaparecer cuando el contenido de finos utilizado en los HAC es elevado y la cantidad de superplastificante pequeña. Durante los primeros días de hidratación la resistencia se ve afectada por dos efectos contrapuestos: por un lado, los finos calizos aceleran la velocidad de hidratación de algunos de los compuestos del clínker, en especial del C_3S , al actuar los finos como centros de nucleación de los hidratos formados durante las reacciones de hidratación (Bosiljkov, 2003; Ye et al., 2007); por otro lado, los superplastificantes basados en policarboxilatos (presentes en mayor cantidad en los SCC) tienen un efecto retardante (Puertas et al., 2005a; Puertas et al., 2005b). A edades más avanzadas, 28 y 90 días, los dos efectos anteriormente mencionados ya han desaparecido y las diferencias aumentan, siendo por término medio del 15,5%. También hay que tener en cuenta que cuanto mayor es el contenido de finos mayor es la retracción (Chopin et al., 2003; Hans-Ërik y Pentti, 1999; Song et al., 2001; Hammer et al., 2001; Turcry y Loukili, 2003; Heirman y Vandewalle, 2003), dando lugar a la aparición de un mayor número de microfisuras en la interfaz árido-pasta que reducen la resistencia a tracción. Además, al aumentar el volumen de finos la superficie específica de los áridos aumenta, siendo precisamente la zona de transición árido-pasta la fase más débil del hormigón. No obstante, Bosiljkov (2003) considera que el comportamiento de ambos tipos de hormigones es similar a pesar del empleo de filler calizo.

Ahora bien, en casi todas las investigaciones se han utilizado HAC que incorporan, a diferencia de los HVC de referencia, adiciones activas para satisfacer la gran demanda de finos que precisan este tipo de hormigones, mejorando así sus propiedades mecánicas respecto de los HVC. De hecho, en la Figura 20 se observa que la mayor parte de los HAC con una resistencia superior a la estimada mediante el Model Code CEB-FIP 1990 (CEB, 1993) y fib Model Code 2010 (FIB, 2013) se corresponden con amasadas donde se ha empleado humo de sílice y cenizas volantes.

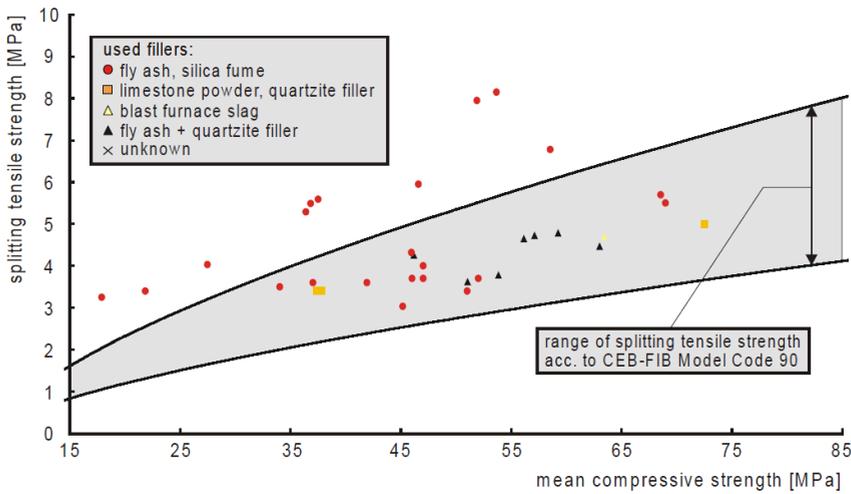


Figura 20. Resistencia a tracción indirecta del hormigón autocompactante en comparación con los valores teóricos proporcionados por el CEB-FIB Model Code 90³ (Klug y Holschemacher, 2003).

Tal y como se ha indicado anteriormente, en algunas investigaciones también se ha observado que con el uso de aditivos superplastificantes a base de policarboxilatos se generan grandes cristales de etringita y portlandita que pueden hacer la zona de transición árido-pasta más frágil y dar lugar a una reducción en la resistencia a la tracción al disminuir la adherencia árido-pasta (Roncero y Gettu, 2002). Es decir, a pesar de que la mayoría de los códigos y normas definen la resistencia a tracción como una función de la resistencia a compresión, ésta evoluciona de manera diferente en ambos hormigones, pues depende de otras variables, tales como la dosificación y las propiedades de los componentes empleados. La mayor parte de los códigos suele establecer su valor mediante expresiones de tipo potencial (Neville 1996, Zain et al., 2002):

$$f_{ct} = k (f_c)^n \quad 2.8$$

donde k y n son constantes obtenidas de un análisis de regresión a partir de resultados experimentales.

Un ejemplo de estas expresiones es la propuesta por Oluokun et al. (1991) que tiene en cuenta la resistencia del hormigón a edades tempranas, entre 6 horas y 28 días:

- Si $f_c \geq 1000$ psi (6,895 MPa):

$$f_{ct} = 0,584 (f_c)^{0,79} \quad 2.9$$

- Si $f_c < 1000$ psi (6,895 MPa) y, por lo tanto para edades tempranas:

$$f_{ct} = 0,928 (f_c)^{0,6} \quad 2.10$$

estando expresadas la resistencia a tracción f_{ct} y la resistencia a compresión f_c en psi.

Por lo que respecta a la evolución de la resistencia a tracción a edades muy tempranas, prácticamente no se han encontrado artículos en la bibliografía y en concreto ninguno que haga referencia a hormigones autocompactantes. Tal y como se comentó en el apartado 2.4.1, en los ensayos realizados por Voigt et al. (2006b) para analizar la evolución de la resistencia a compresión en morteros durante las primeras horas (6-8 horas en las dosificaciones utilizadas) se observa que durante el fraguado, a medida que la mezcla va adquiriendo rigidez empieza también a haber una cierta resistencia a compresión. No obstante, esta rigidez inicial, aportada por las fuerzas de cohesión entre partículas, todavía no es lo suficientemente importante para que se desarrollen esfuerzos perpendiculares de tracción y por ello se produce una rotura por cortante y no por tracción indirecta en las probetas ensayadas a compresión (Figura 16). Este comportamiento se asemeja mucho al que experimentan los suelos cohesivos cuando se ensayan a compresión partir de las 19 horas las probetas ya presentan fisuras verticales, que son un claro signo de la existencia de esfuerzos de tracción perpendiculares al esfuerzo principal de compresión.

El secado y la hidratación provocan deformaciones significativas en el hormigón a edades tempranas, tales como la retracción plástica. En algunos artículos se indica que para deformaciones unitarias superiores a 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ el riesgo de fisuración del material es alto (Holt y Leivo, 2004; Darquennes et al., 2011).

La mayor parte de los ensayos de tracción que se han realizado a edades tempranas (0-24 horas) son ensayos de tracción directa (Kasai et al., 1972; Abel y Jover 1998; Hannant et al., 1999; Nahlawi et al., 2004; Hammer et al., 2007; Dao et al., 2009), dado que el hormigón fresco no es capaz de soportar su propio peso. No obstante,

también existe algún trabajo en que se realizan ensayos a tracción indirecta (Oluokun et al., 1991) o a flexotracción (Khann1995) (Arshad et al., 1996) (Figura 21). En el caso particular de los ensayos a tracción directa, la mayor parte de las probetas tienen forma prismática siendo la zona central más estrecha para forzar la rotura en esa zona.

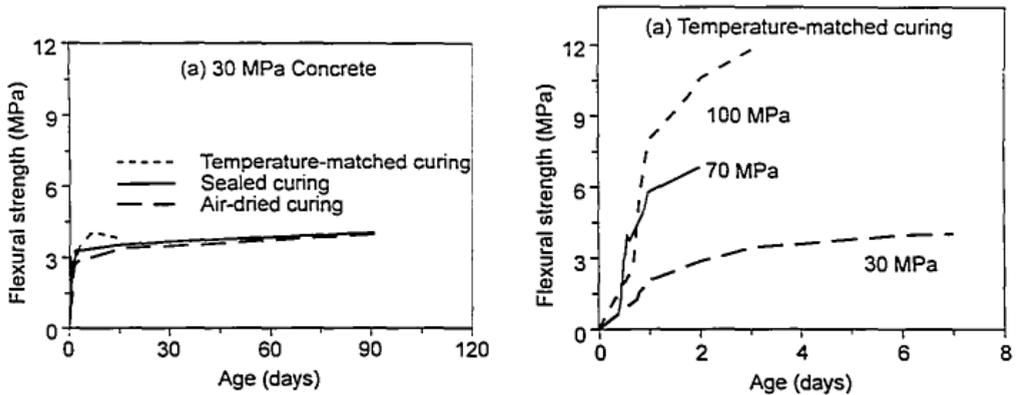


Figura 21. Evolución de la resistencia a tracción a edades tempranas en hormigones de distinta resistencia (Khan, 1995) (Arshad et al., 1996)

Como principales precauciones que hay que tomar para la realización de estos ensayos son: evitar zonas donde se produzca una concentración de tensiones y evitar la aplicación de cargas excéntricas que generen momentos en las probetas. La medida de las deformaciones antes y durante el fraguado del hormigón es muy complicada, por lo que en ocasiones se suele recurrir a medir las deformaciones en el molde (Dao et al., 2009), lo que a su vez plantea errores de lectura ya que no se tiene en cuenta los posibles desplazamientos de la probeta dentro del molde. La velocidad de aplicación de carga es muy distinta según los autores, variando de $0,033 \mu\text{m/s}$ (Hammer et al., 2007) a $20 \mu\text{m/s}$ (Kasai et al., 1972), lo que afecta a los valores de tensión obtenidos y, por lo tanto, hace difícil la comparación de resultados.

Algunos de los resultados obtenidos por distintos investigadores han sido recogidos por Roziere et al. (2015) en la Figura 22. De todos estos trabajos, solo tres se han realizado a edades muy tempranas, de 2 a 7 horas (Kasai et al., 1972; Hannant et al., 1999; Dao et al., 2009), y dos de 2 a 12 horas (Kasai et al., 1972; Hammer et al.,

2007). Según Kasai et al. (1972), Hannant et al. (1999) y Dao et al. (2009) se produce un continuo descenso de la capacidad de deformación bajo tracción hasta una edad de 5-10 horas. Este periodo se corresponde aproximadamente con el fraguado del hormigón y, por lo tanto, afecta considerablemente a las propiedades del material. Posteriormente, la capacidad de deformación aumenta.

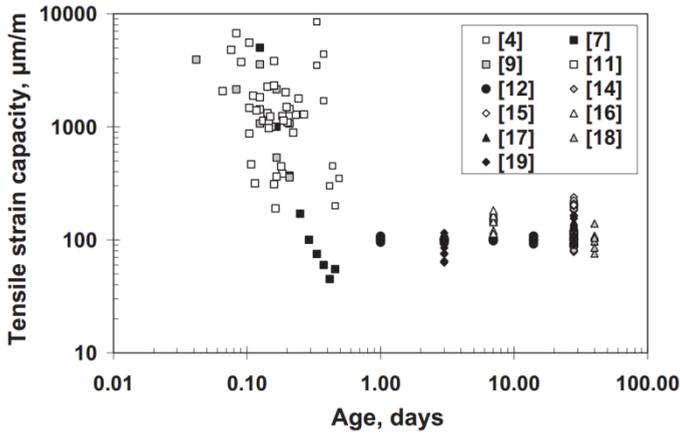


Figura 22. Deformaciones de tracción en el instante de la fisuración recogidas por distintos autores a distintas edades (Roziere et al., 2015)

Según Roziere et al. (2015) la resistencia a tracción lo hace cuando se alcanza un grado de hidratación de aproximadamente el 30% (Figura 23). Este grado de hidratación se corresponde aproximadamente con el final de fraguado y, por lo tanto, el inicio de la resistencia a tracción señalado por Roziere et al. (2015) tiende a coincidir con los resultados obtenidos por Voigt et al. (2006b) y comentados anteriormente. Igualmente, Dao et al. (2009) señalan que tanto la resistencia a tracción como el módulo de deformación prácticamente no aumentan durante las tres primeras horas, pero que posteriormente tienden a hacerlo de forma importante.

Coincidiendo con los resultados obtenidos por Kasai et al. (1972), Hannant et al. (1999) y Dao et al. (2009), la capacidad de deformación transversal para que no se fisure el hormigón disminuye durante el fraguado, alcanzándose un mínimo cuando el grado de hidratación del cemento es del orden del 24-26% (Figura 23).

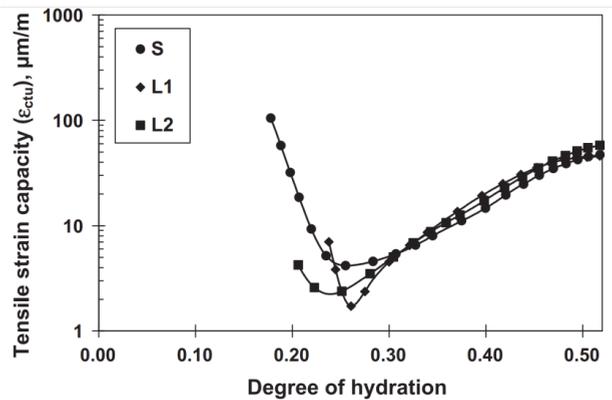


Figura 23. Variación de la capacidad de deformación a tracción en función del grado de hidratación del cemento (Roziere et al., 2015).

2.4.4 Módulo de deformación

El módulo de deformación es la relación entre la tensión y la deformación unitaria, y proporciona una medida de la rigidez del material. Es un parámetro clave en los modelos de diseño, especialmente para estudios en Estados Límite de Servicio que se basan en el comportamiento de los materiales en régimen elástico. Su valor depende de las propiedades de la pasta de cemento y de los áridos. Por ello, gran parte de las normas vinculan el módulo de deformación con el tipo de áridos empleados y con la resistencia a compresión del hormigón, pues este es un dato significativo de la madurez de la pasta.

En general, en las diferentes investigaciones realizadas se observa que el módulo de deformación crece con la edad a un ritmo similar al de los HCV (Köning et al., 2001), si bien los HAC son un poco más deformables (Makishima et al., 2001; Klug y Holschemacher, 2003; Chopin et al., 2003; Felekoğlu et al., 2007). Las pequeñas diferencias de rigidez entre ambos tipos de hormigones son atribuidas al alto contenido en pasta de los HAC, aunque según Su et al. (2001) aumentar la relación árido fino/árido total no influye de manera significativa en el módulo de deformación de los HAC. Nuevamente hay que indicar que la mayor parte de los resultados disponibles en la bibliografía suelen estar referidos a HAC de elevada resistencia, donde se emplean elevados contenidos de cemento (en general mayores de 400 kg/m³) acompañados usualmente por adiciones activas, tales como cenizas volantes o esco-

rias siderúrgicas. Así, por ejemplo, en los ensayos realizados por Köning et al. (2001) y por Makishima et al. (2001) el módulo de deformación presenta escasas diferencias con los HAC. En los trabajos de Holschemayer y Klug (2003) se observa que el módulo de deformación de los HAC está dentro del rango establecido por el Model Code CEB-FIP 1990 (CEB, 1993) y del fib Model Code 2010 (FIB, 2013), aunque se sitúa por debajo del valor medio, lo cual es atribuido al alto contenido en finos de estos hormigones (Figura 24).

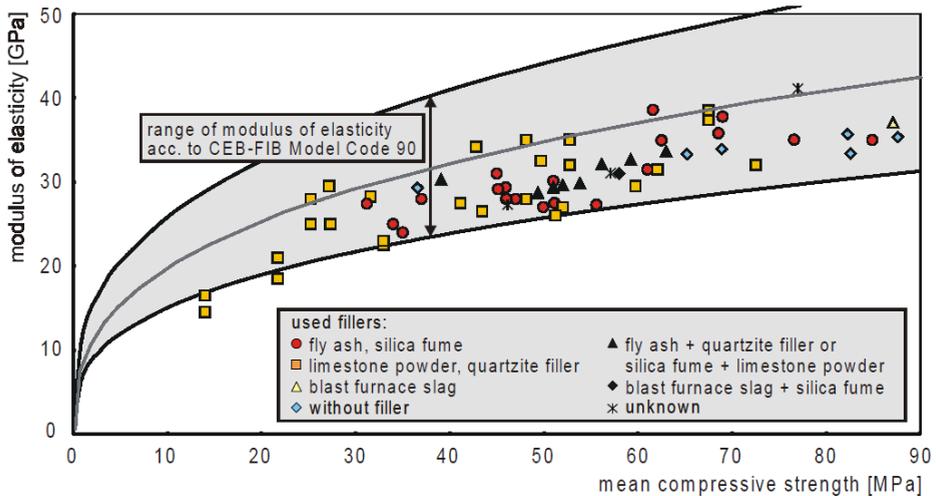


Figura 24. Módulo de deformación del hormigón autocompactante en comparación con los valores teóricos proporcionados por el CEB-FIB Model Code 90³ (Klug y Holschemayer, 2003).

Según Parra et al. (2011) existe una ligera tendencia por parte de los hormigones autocompactante a presentar un módulo de deformación algo menor, del orden de un 2% por término medio. Estos resultados son concordantes con los obtenidos experimentalmente por Chopin et al. (2003) y por Felekoğlu et al. (2007), quienes llegaron a una conclusión similar, encontrando diferencias entre HAC y HCV inferiores al 5%. Igualmente, Domone (2007) destaca que los valores para el hormigón autocompactante son menores que los del hormigón convencional para iguales resistencias a compresión (Figura 25), indicando que pueden llegar a ser hasta un 40% menores para hormigones de baja resistencia a compresión (20 MPa), pero que estas diferencias pueden reducirse hasta solo un 5% para resistencias a compresión altas (90-100 MPa).

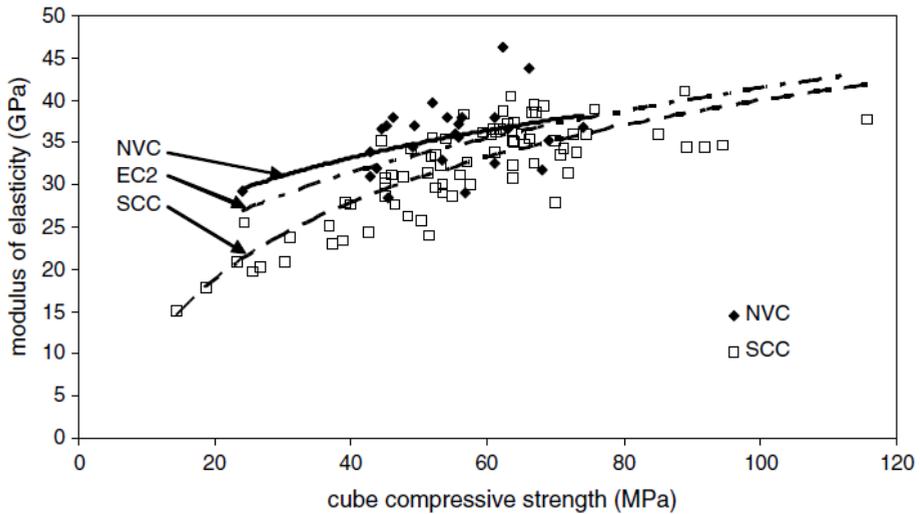


Figura 25. Relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión y su relación con respecto al modelo propuesto por el Eurocódigo 2 (Domone, 2007).

Aunque el módulo de deformación del hormigón tiende a ser algo menor en los HAC, el módulo de deformación de la pasta cementante es mayor, probablemente debido a la influencia que tienen los finos en la densificación de la pasta (Parra et al., 2011). A pesar de ello, debido al mayor contenido de áridos gruesos que hay en los HCV la rigidez de los HCV es mayor, ya que la deformabilidad de los áridos es mucho menor que la de la pasta (Parra et al., 2011). Este efecto tiende a minimizarse para los hormigones más resistentes ya que cuanto más resistente es un hormigón más se aproxima la rigidez de la pasta a la de los áridos (Cetin y Carrasquillo, 1998) y, por lo tanto, la deformabilidad de la pasta ya no es tan determinante. De hecho, Rozière et al. (2007) estudiaron varias series de mezclas de HAC con diferentes volúmenes de pasta con el fin de determinar el impacto de este parámetro. En sus ensayos obtuvieron que su impacto es limitado, ya que el valor del módulo sólo disminuye en un 14% cuando el volumen de pasta aumenta en un 57%.

En ensayos a compresión realizados en un molde recientemente diseñado en IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux) (Figura 26) para monitorizar la rigidez del hormigón durante el proceso de endurecimiento sin desmoldar las probetas (Boulay et al., 2014), se observa que el

módulo de deformación empieza a crecer durante el fraguado del hormigón, que en estos ensayos se correspondió con una edad aproximada de 5,6 horas (Figura 27).

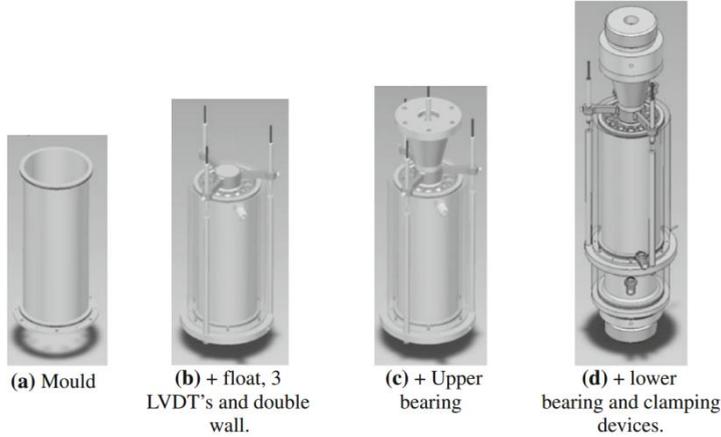


Figura 26. Molde para monitorizar el comportamiento del hormigón durante el proceso de endurecimiento sin necesidad de desmoldar las probetas (Boulay et al., 2014)

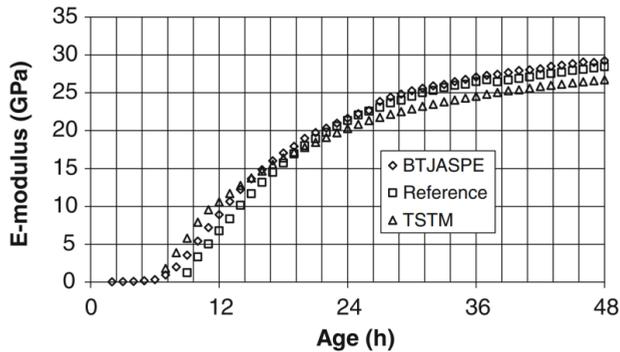


Figura 27. Evolución del módulo de deformación (Boulay et al., 2014)

Según Roziere et al. (2015) en ensayos utilizando métodos ultrasónicos, el módulo de deformación empieza a aumentar cuando el grado de hidratación del cemento es del orden del 20%, lo que se corresponde en sus ensayos con una edad de 4 horas. Este aumento del módulo de deformación se debe a que durante la hidratación se forman nuevos compuestos sólidos que se enlazan entre sí y que tienen propiedades elásticas. A medida que progresa la hidratación los poros capilares se van rellenando con los productos de hidratación, especialmente portlandita y C-S-H, y la rigidez de la mezcla

aumenta. El módulo crece rápidamente entre las 3 y 10 primeras horas, lo que se corresponde con el periodo de fraguado.

No obstante, en la Figura 28 se aprecia además que la resistencia a tracción evoluciona más rápidamente que la rigidez, lo que coincide también con los resultados obtenidos por otros autores (De Schutter y Taerwe, 1996).

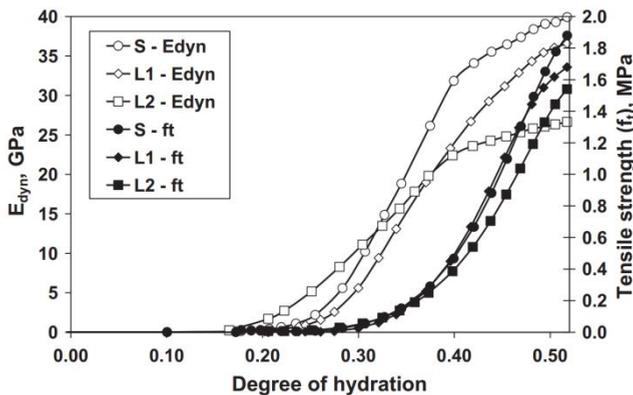


Figura 28. Evolución del módulo de deformación a tracción y de la resistencia a tracción en función del grado de hidratación del cemento (Roziere et al., 2015).

Por lo que respecta a la evolución del módulo con la edad, también se observan pequeñas diferencias con los HCV (Parra et al., 2011). Las pequeñas diferencias de rigidez entre HAC y HCV se manifiestan a las edades de 28 y 90 días, si bien a la edad de 7 días el módulo de deformación es prácticamente el mismo en ambos tipos de hormigón. Ello se puede justificar por el efecto favorable que aportan los finos calizos, al acelerar durante los primeros días los procesos de hidratación del cemento y compensar así la pérdida de rigidez que se produce en los HAC debido a su mayor contenido de pasta. No obstante, existen otros trabajos de investigación en los que se señala que el módulo de deformación de los HAC crece a un ritmo parecido al de los HCV (Persson, 1999; Köning et al., 2003).

Evaluar el módulo de deformación a edades tempranas presenta serias dificultades. Se ha estudiado la posibilidad de predecir el módulo o la resistencia a compresión a través de la resistividad eléctrica del material (Wei y Xiao, 2011; Hongyu et al., 2015), ya que

la medida de este parámetro es bastante sensible a los procesos de hidratación del cemento y a la microestructura del hormigón (Figura 29).

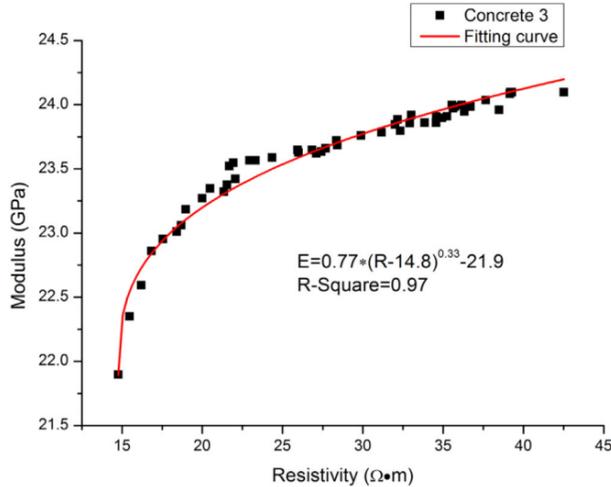


Figura 29. Relación entre el módulo de deformación y la resistividad eléctrica (Hongyu et al., 2015)

Según los resultados obtenidos por Voigt et al. (2006b) mediante rotura de probetas de mortero fabricadas mediante una técnica de extrusión para poder romperlas a edades muy tempranas (entre 2,9 y 10,6 horas de edad), en las curvas tensión-deformación recogidas en la Figura 30 se observa una transición de un comportamiento plástico y deformable del material a un comportamiento rígido. A las 2,9 horas hay unas grandes deformaciones más o menos constantes sin apenas incremento de tensión. A las 6,5 horas el comportamiento es bastante parecido, si bien la tensión que es capaz de absorber el mortero es mayor. Este comportamiento es el que justifica el tipo de agotamiento recogido en la Figura 16 (apartado 2.4.1), en la que se apreciaba una rotura por aplastamiento de las probetas. A partir de las 7,6 horas el comportamiento cambia. Ahora el diagrama adquiere una forma parabólica, alcanzando la tensión un máximo claramente definido y el módulo de deformación aumenta, si bien sigue siendo muy bajo. El mortero ya está desarrollando las propiedades mecánicas típicas de un sólido. A medida que pasan las horas, el módulo de deformación crece rápidamente.

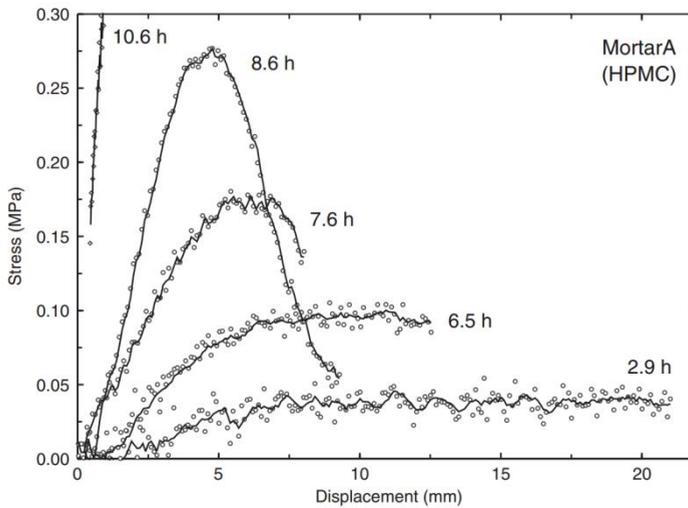


Figura 30. Curvas tensión deformación (Voigt et al., 2006b)

2.4.5 Adherencia acero-hormigón

Como señalan algunos autores la adherencia acero-hormigón es el fenómeno básico sobre el que descansa el funcionamiento del hormigón armado como material estructural. Sin la adherencia no sería posible compatibilizar las deformaciones de los dos materiales, y las armaduras deslizarían libremente sin acompañar al hormigón en su movimiento, provocando con ello una rotura de tipo frágil. Debido a este fenómeno, cuando varían los esfuerzos en las armaduras, se generan unas tensiones tangenciales en la superficie de contacto de ambos materiales. La transferencia de fuerzas entre ellos se debe a dos tipos de acciones, unas de naturaleza físico-química (la adhesión) y otras de naturaleza mecánica (el rozamiento y el acuñaamiento), que se activan para diferentes estados tensionales y cuya contribución relativa depende en gran medida de la textura superficial y de la geometría de las barras.

Ahora bien, además de estos dos aspectos existen otros factores, como los relacionados con la calidad del hormigón, que también van a influir en el comportamiento adherente de las armaduras. Así, por ejemplo, cambios en la dosificación o puesta en obra del material, como los que afectan a los hormigones autocompactantes, pueden conducir a una modificación de las propiedades físicas y mecánicas del material (Parra, 2005; Valcuende et al., 2005; Domone, 2007; Valcuende et al., 2007) y, por lo tanto, a una modi-

ficación de la adherencia acero-hormigón. De hecho, en los hormigones convencionales cuando se aumenta la fluidez o se utilizan mezclas ricas en arena la adherencia disminuye (Martin, 1982). Por otro lado, la ausencia de compactación en los HAC disminuye los riesgos que este proceso conlleva (Aïtcin, 1999; Chan et al., 2003), ya sea por exceso de vibrado (sangrado o segregación) o por falta del mismo (presencia de aire atrapado). Por ello, es importante asegurar que todas las hipótesis y resultados en los que se basan los modelos de cálculo utilizados para HCV también son válidos para los HAC.

La adherencia depende directamente de la calidad de la zona de transición interfacial (ITZ) entre la pasta y las armaduras (Petrov et al., 2001). Esta zona presenta unas características comunes a la ITZ que se forma alrededor de los áridos (Bentur et al., 1985) y, por lo tanto, es más densa, más resistente y más rígida en los HAC que en los HCV fabricados con la misma relación a/c (Petrov et al., 2001; Zhu y Bartos, 2000; Zhu et al., 2004). Los resultados obtenidos por diversos autores también indican que la ITZ de la cara inferior de las armaduras horizontales es más débil que la de la cara superior, si bien estas diferencias son menos acusadas en los HAC que en los HCV (Zhu et al., 2004). La mejora de las propiedades de la ITZ en los HAC se cree que es debida a la acción beneficiosa de los finos calizos que permiten un mejor empaquetamiento de las partículas y una menor exudación del hormigón (Trägardh, 1999).

Al igual que sucede con otras propiedades, los estudios sobre adherencia en HAC no siempre son coincidentes. La mayor parte de la bibliografía indica que la tensión adherente alcanzada por los HAC es superior a la de los HCV (Gibbs y Zhu, 1999; Sonebi y Bartos, 1999; Markovich et al., 2002; Zhu et al., 2004; Grünewald, 2004; Chan et al., 2005; Wang y Chen, 2005; Collepari et al., 2005), si bien los valores que se obtienen son algo dispares. Así, por ejemplo, las diferencias registradas entre ambos hormigones son según Gibbs y Zhu (1999) inferiores al 4%, según Wang y Zheng (2005) del orden del 9%, según Sonebi y Bartos (1999) del 16 al 40%, según Zhu et al. (2004) del 10 al 40% y según Collepari et al. (2005) hasta del orden del 70%. Valcuende y Parra (2009) también señalan que la tensión media de adherencia es mayor en los HAC que en los HCV, si bien el comportamiento tiende a igualarse a medida que mejora la calidad del hormigón. Según estos mismos autores, la tensión última de adherencia también es

mayor en los HAC que en los HCV. Las diferencias entre ambos tipos de hormigones dependen de la calidad del material, pero no son tan importantes como las registradas con la tensión media. Esto puede explicarse por la menor influencia en el agotamiento de los efectos negativos del sangrado. Por el contrario, algunos autores han registrado resultados muy similares (Daoud et al., 2002; Daoud et al., 2003) y, en otros casos, investigadores como Schiessl y Zilch (2001), König et al. (2001; 2003) o De Almeida et al. (2005) detectan un mejor comportamiento por parte de los HCV, pudiendo llegar a ser la tensión última de adherencia hasta un 15% mayor (König et al., 2001). Ahora bien, a pesar de estas discrepancias, en general los investigadores coinciden en señalar un comportamiento algo más rígido de los HAC (Schiessl y Zilch, 2001; König et al., 2001; König et al., 2003; Wang y Zheng, 2005; De Almeida et al., 2005). En este sentido, Valcuende y Parra (2009) señalan que para niveles moderados de carga, los HAC presentan un comportamiento más rígido que los HCV, probablemente debido a su mayor capacidad de relleno y su menor sangrado.

En algunos trabajos también se han estudiado otros aspectos relacionados con la adherencia, como el efecto "top-bar" o el comportamiento en rotura. Algunos autores señalan que en los HAC la adherencia no cambia con la posición en altura de las barras durante el hormigonado, pero estos resultados se han obtenido con piezas de poca altura, solo 300 mm (Schiessl y Zilch, 2001). No obstante, en investigaciones realizadas con piezas de mayor altura sí que se han registrado pérdidas de adherencia con la altura, si bien éstas han sido menores que en los HCV (Khayat et al., 1997; Chan et al., 2003; Castel et al., 2006; Valcuende y Parra, 2009). Khayat et al. señalan además que el uso de aditivos cohesionantes mejoran la estabilidad de los HAC y reducen el efecto "top-bar" (Khayat et al., 1997; Khayat, 1998; Petrov et al., 1999).

Por lo que respecta al comportamiento en rotura, en general el agotamiento de las probetas tiende a producirse por arrancamiento y no tanto por fisuración del recubrimiento (Schiessl y Zilch, 2001; König et al., 2003; Wang y Zheng, 2005). Este hecho es debido probablemente al mayor contenido de finos que presentan los HAC y que proporcionan una superficie de rotura menos rugosa.

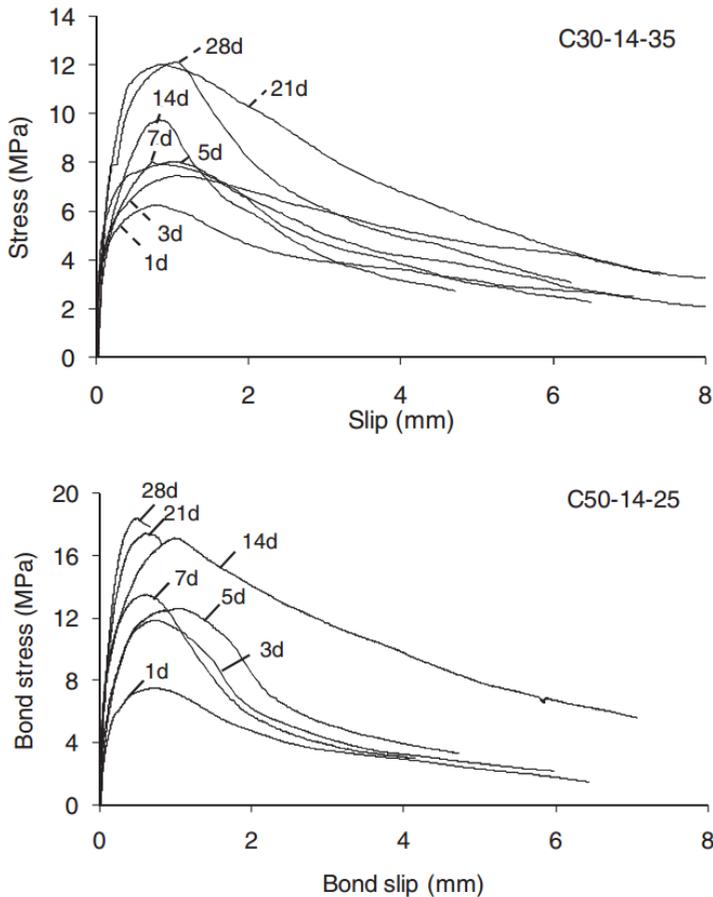


Figura 31. Variación de la adherencia con la edad en dos tipos de hormigones (Song et al., 2015).

Aunque la edad es un parámetro importante a tener en cuenta pues evidentemente influye en la adherencia (Figura 31), según Chapman y Shah, la resistencia a compresión es un parámetro más práctico de manejar ya que tiene en cuenta otros muchos factores además de la edad.

Finalmente, hay que señalar que no se han encontrado artículos en la bibliografía que hagan referencia a la adherencia acero-hormigón a edades muy tempranas en hormigones autocompactantes.

2.4.6 Retracción y fluencia

2.4.6.1 Retracción

La retracción es una disminución volumétrica que se inicia poco después del hormigonado y que se desarrolla a lo largo del tiempo. Junto con la baja resistencia a tracción, es la propiedad que probablemente más negativamente afecta al comportamiento de los elementos de hormigón. En general, debido a las tensiones de tracción que se generan al interior de las piezas, la retracción va a provocar una fisuración del material que va a influir en su durabilidad, aún cuando la seguridad estructural no se vea afectada. La retracción total es la suma de diversos tipos de retracción: química, autógena, por carbonatación y de secado. Aunque los cambios de temperatura o las reacciones de carbonatación son dos factores que afectan a la retracción, este fenómeno se debe fundamentalmente a la pérdida de agua y a la reducción de volumen que experimenta el cemento hidratado respecto de la suma de los volúmenes del cemento anhidro y del agua (retracción química o también denominada contracción de Le Chatelier).

Cuando el hormigón está todavía en estado plástico, la primera forma de retracción, normalmente denominada retracción plástica, se produce debido a la retracción química y a la evaporación del agua de sangrado (Tazawa, 1997). Durante la hidratación del cemento y una vez iniciado el fraguado, la retracción química no se produce libremente, pues se ve coaccionada por la propia rigidez de la pasta, por el esqueleto granular y, en su caso, por las armaduras. Como consecuencia de ello se genera un volumen creciente de poros muy pequeños en el interior de la pasta de cemento hidratada que van drenando agua desde los poros capilares más grandes. Si no hay aporte de agua exterior, a medida que aumenta la hidratación del cemento se produce una disminución de agua en los poros que se conoce con el nombre de auto-deseccación y se forman meniscos de agua. Debido a la tensión superficial del agua, al disminuir la humedad en los poros capilares la fuerza de atracción entre las paredes de los poros aumenta, dando lugar a un incremento de la retracción. Esta retracción se denomina retracción autógena y es mayor cuanto menor es la relación a/c , siendo especialmente importante cuando la relación a/c es inferior a 0,4 (Aïtcin, 1999b, D'Ambrosia et al., 2005). En hormigones con una relación a/c por encima de 0,60 la retracción autógena suele ser de 5 a 10 veces menor que la retracción de secado, por lo que sus efectos no suelen considerarse (Aïtcin, 1999b).

En general, una menor relación agua/material cementante y un mayor contenido de cemento dan lugar a una mayor retracción autógena, posiblemente por el mayor volumen de poros de menor diámetro y la disminución de agua disponible (Tazawa, 1999). Según Seddik y Tagnit-Hamou (2009) el radio medio de poro y el refinamiento de la estructura porosa son buenos indicadores de la magnitud de retracción autógena. Antes del inicio del fraguado, cuando el hormigón está en estado líquido, las fuerzas capilares son casi despreciables, siendo la retracción química prácticamente la única responsable de la deformación autógena.

Cuando el curado del hormigón se realiza con aporte de agua, la pérdida de agua de los poros capilares se repone con el agua que penetra desde el exterior, por lo que no se produce autodesecación. No obstante, cuando la relación agua/material cementante es muy baja, aunque haya un aporte exterior de agua los productos resultantes de la hidratación pueden taponar algunos capilares y evitar que el agua acceda a ciertas zonas del hormigón. En esas zonas también se produce entonces retracción autógena. La importancia de este fenómeno sobre la retracción total depende del tamaño de la probeta (Aït-cin, 1999c).

La retracción de secado es un fenómeno lento. La única fuerza motriz que actúa es la pérdida de agua, que se produce si la humedad relativa exterior es menor que la existente en el interior de los poros. La difusión de agua a través del material depende principalmente de su estructura porosa, del tamaño y geometría de la pieza, del período de secado y de las condiciones ambientales (Bissonnette et al., 1999; Al-Saleh y Zaid, 2006), y no, excepto a edad muy temprana, de la velocidad del viento (Neville, 1996).

Para la fabricación de HAC se suelen emplear contenidos elevados de cemento y de finos, siendo el volumen de pasta mayor que en los HCV. Dado que la pasta de cemento es el principal material responsable de los cambios volumétricos, cuanto mayor es el contenido de pasta mayor es la retracción (Bissonnette et al., 1999; Rozière et al., 2005; Hammer, 2007) y, por ello, los HAC son hormigones teóricamente susceptibles de generar retracciones importantes. No obstante, un incremento significativo del volumen de pasta no necesariamente conduce a una mayor retracción pues intervienen otros factores, como por ejemplo la continuidad de la red capilar o la densidad de la matriz, que

influyen en la retracción del material (Chopin et al., 2003). En los HAC se utilizan también superplastificantes muy potentes que, debido a su efecto retardador, pueden generar una mayor retracción (Roncero y Gettu, 2002; Turcry y Loukili, 2003), aunque Hammer (2007) no registra ninguna influencia. Según Chopin et al. (2003) los HAC fabricados con superplastificantes de base melanina registran una retracción autógena más de dos veces superior a los fabricados con superplastificantes basados en la tecnología de los éter policarboxílicos.

Los estudios sobre retracción en HAC son limitados y no siempre coincidentes. Muchos autores señalan que la retracción en los HAC es mayor que en los HCV (Kim et al., 1998; Rols et al., 1999; Chopin et al., 2003; Turcry y Loukili, 2003; Loser y Leemann, 2007), habiéndose observado diferencias entre ambos hasta del 100% (Heirman y Vandewalle, 2003). No obstante, existen también diversos trabajos en los que no se registran diferencias significativas entre ambos tipos de hormigones (Persson, 2001; Vieira et al., 2003; Pons et al., 2003; Seng y Shima, 2005; Collepari et al., 2005), o en los que incluso se obtiene menor retracción autógena en los HAC (Heirman et al., 2007; Valcuende et al., 2012). Piérard et al. (2005) también registran retracciones totales similares, aunque señalan que la cinética del proceso y la proporción entre retracción autógena y de secado son diferentes. Ahora bien, tal y como ya se ha comentado en diversas ocasiones, en muchas de estas investigaciones se han utilizado HAC que incorporan, a diferencia de los HCV de referencia, adiciones activas para satisfacer la gran demanda de finos que precisan este tipo de hormigones. Estas adiciones pueden modificar las propiedades en estado fresco y endurecido del material y, por lo tanto, pueden afectar a la retracción. La retracción puede crecer cuando se incrementa el contenido de humo de sílice (Jensen y Hansen, 1996; Brooks et al., 1999) o de escoria granulada de alto horno molida (Chan et al., 1999; Persson, 1999; Valcuende et al., 2015). De hecho, la retracción autógena observada en HAC es mayor que en HCV si se reemplaza en el primero parte del cemento por escoria granulada muy fina; la retracción es tanto mayor cuanto más fina es la escoria, si bien para las escorias menos finas la retracción autógena es igual o incluso algo menor a la de los HAC (Song et al., 2001). Rao (2001) también detecta un incremento de la retracción de secado a edades tempranas cuando se utiliza humo de sílice, aunque su influencia a largo plazo no es significativa. Por el contrario,

el empleo de cenizas volantes o de filler calizo puede reducir la retracción autógena y la de secado (Chan et al., 1999; Lim y Wee, 2000; Hammer et al., 2001; Rozière et al., 2005; Hammer, 2007). Según Tangtermsirikul (1999) la mayor o menor influencia de las cenizas depende sobre todo de su composición química y del tamaño de las partículas. Algunos autores consideran que el contenido de finos calizos no influye sobre la retracción autógena (Chopin et al., 2003; Vieira y Bettencourt, 2003; Piérard et al., 2005), ni sobre la retracción total si se mantiene la misma relación agua/finos (Seng y Shima, 2005). Según Valcuende et al. (2012) en HAC fabricados con finos calizos, la retracción autógena en los HAC es menor que en los HCV y tanto menor cuanto mayor es el contenido de finos. Ello es debido probablemente a la acción conjunta de diversos factores: utilización de una adición inerte como filler, estructura porosa más fina que ralentiza la difusión de agua al interior de la probeta y mayor aporte de agua de absorción de los áridos que compensa la auto-deseccación del hormigón. Por término medio, las diferencias entre ambos tipos de hormigones han sido del 14,3% para hormigones fabricados con 300 kg de cemento, y del 19,8%, para hormigones fabricados con 350 kg de cemento. Por el contrario, la retracción de secado y la retracción total en los HAC es un poco mayor que en los HCV.

Para aumentar la viscosidad de los HAC también se pueden utilizar aditivos modificadores de la viscosidad (AMV), que son polímeros formados por largas cadenas capaces de absorber y fijar parte del agua libre. En diversos trabajos de investigación se ha observado que con el uso de AMV se consiguen hormigones más estables frente a las pequeñas variaciones del contenido de agua de las mezclas que cuando se usan finos (Petrov et al., 2001; Lowke et al., 2003). Este incremento de la estabilidad puede ser debido a la calidad de la interfaz árido-pasta, siendo la zona de transición interfacial más densa (Trägardh, 1999; Petrov et al., 2001; Zhu y Bartos, 2005). Las principales industrias químicas del sector de la construcción están desarrollando nuevas familias de AMV que permiten la fabricación de HAC sin finos adicionales. Con estos nuevos aditivos se pretende conseguir hormigones más robustos, si bien se pueden perder los beneficios que los finos aportan, tales como un mejor empaquetamiento de los áridos que dan lugar a una matriz cementante más densa. Según Valcuende et al. (2012) la utilización de un AMV como sustitutivo del filler calizo permite obtener HAC con menor

retracción de secado, siendo la retracción un 33% menor que la registrada en HAC fabricados con filler calizo. Estas diferencias se justifican por la mayor finura de la estructura porosa en los HAC con filler calizo, ya que cuanto más finos son los capilares y mayor es la superficie específica total de los poros mayor es la presión capilar. Además, los HAC fabricados sólo con AMV presentan del orden de un 8% menos de retracción que el HCV, debido a una menor retracción autógena y a una menor retracción de secado.

2.4.6.2 Fluencia

La fluencia es el conjunto de deformaciones diferidas que experimenta el hormigón al ser sometido a un estado de cargas constante a lo largo del tiempo. Estas deformaciones pueden ser del orden de 2 hasta 4 veces la deformación instantánea (o deformación elástica instantánea), y por ello afectan de modo muy importante a los mecanismos de respuesta estructural.

En los hormigones convencionales es la pasta de cemento la que realmente experimenta fluencia, actuando, por lo tanto, los áridos como elementos de coacción de estas deformaciones. Por ello:

- Para un mismo tipo de árido, a medida que aumenta su concentración volumétrica la deformación de fluencia disminuye (Figura 32).
- Dado un determinado contenido de árido, a medida que aumenta el módulo de deformación de este, la deformación de fluencia disminuye.
- La granulometría, el tamaño de árido y la forma, sólo parecen influir en función de los distintos grados de compactación a que puedan dar lugar.

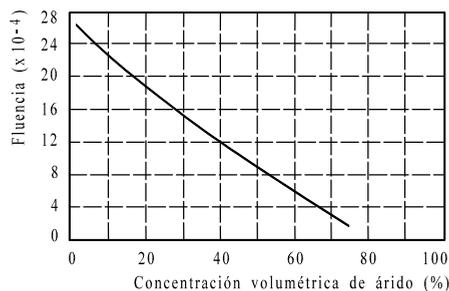


Figura 32. Concentración de árido.

Por otro lado, es lógico que aumente la fluencia a medida que crece la porosidad del material y que, a igualdad de la relación a/c, los hormigones ligeros, al ser menos resistentes que los hormigones ordinarios, experimenten mayor fluencia (Figura 33). No obstante, a igualdad de resistencia las deformaciones de fluencia de ambos hormigones son similares (Figura 34).

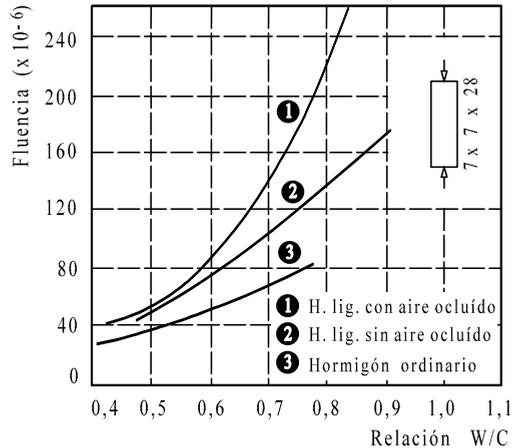
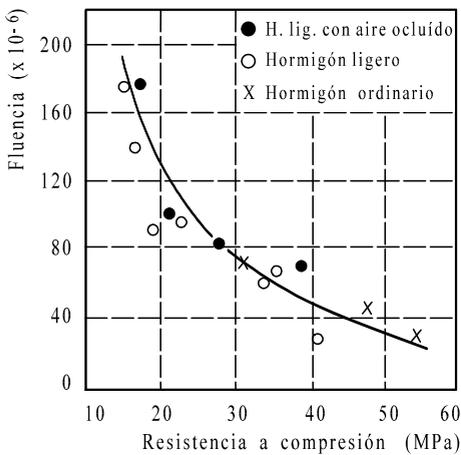
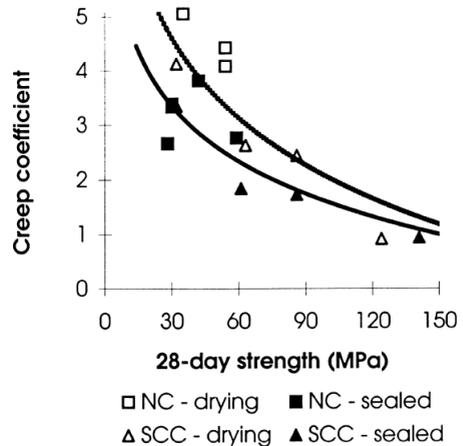


Figura 33. Influencia de la relación a/c (Neville, 1996).



(a)



(b)

Figura 34. Influencia de la resistencia a compresión (a) Hormigón convencional y hormigón ligero (Neville, 1996). (b) Hormigón autocompactante y Hormigón convencional (Perssons, 2001)

Además de estos factores, el valor final de la fluencia también depende de las condiciones de secado, la resistencia de la pasta, la temperatura, la relación entre la tensión aplicada y la resistencia a compresión del material, el tipo de carga, la humedad relativa y el uso o no de ciertos aditivos.

Existen pocos investigadores que hayan estudiado la fluencia en los HAC y los resultados obtenidos no son concluyentes. En algunos trabajos se señala una mayor fluencia en este tipo de hormigones debido probablemente al mayor contenido de pasta (Chopin et al., 2003; Assié et al. 2003). Por el contrario, otros autores indican que ambos tipos de hormigón presentan una fluencia similar si la resistencia a compresión también es similar (Persson, 2001; Pons et al., 2003). En este sentido, no hay que olvidar que una vez alcanzado cierto grado de endurecimiento de la pasta (alrededor de 3 días), se ha observado que, para niveles de carga no muy elevados, existe proporcionalidad entre la tensión aplicada y la fluencia, proporcionalidad que, dependiendo del grado de heterogeneidad del material, se mantiene hasta alcanzar relaciones entre la tensión aplicada y la resistencia de la pasta del orden de 0,75 en hormigones y de 0,85 en las pastas de cemento (Figura 35).

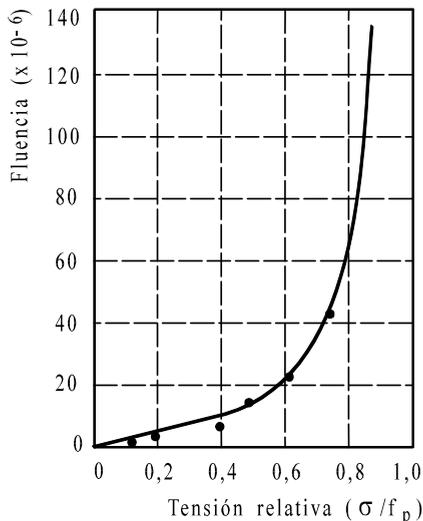


Figura 35. Influencia de la relación entre la tensión aplicada y la fluencia (Neville, 1996).

2.4.7 Durabilidad

La principal causa de deterioro de las estructuras de hormigón armado hay que buscarla en la despreocupación que hasta la fecha ha existido en relación con los daños que el medio ambiente podía causar, o al menos en un análisis mucho menos riguroso que el aplicado a la interacción estructura-cargas. Los procesos de degradación del hormigón y de las armaduras modifican la resistencia, rigidez y aspecto de los materiales, o lo que es lo mismo, condicionan su seguridad, funcionalidad y aspecto.

El hormigón es un material poroso a través de cuya red de poros penetran hacia el interior el agua, cargada de sustancias agresivas disueltas, y los gases. En consecuencia, la durabilidad de las estructuras de hormigón armado depende, fundamentalmente, de la estructura porosa y fisuración del material y del contenido de humedad del hormigón. Cambios en la dosificación o puesta en obra del material, como los que afectan a los hormigones autocompactantes, pueden conducir a una modificación de la estructura porosa. De hecho, tal y como ya se ha comentado previamente en otros apartados, en los HAC el contenido de finos es más elevado que en los hormigones convencionales vibrados y la ausencia de compactación disminuye los riesgos que este proceso conlleva (Aïtcin, 1999; Chan et al., 2003), ya sea por exceso de vibrado (sangrado o segregación) o por falta del mismo (presencia de aire atrapado). Según algunos autores los HAC presentan una distribución de poros similar a la de los HCV pero con algo menos de porosidad capilar, lo que les confiere mejores prestaciones frente a la penetración de agua (Valcuende et al., 2005). Trägårdh (1999) o Zhu y Bartos (2005) ponen de manifiesto que las zonas de transición árido-pasta y acero-pasta son más densas, más resistentes y más rígidas en los SCC que en los NVC fabricados con la misma relación a/c; además, Leemann et al. (2006) señalan que dicha zona es algo más ancha. La zona de transición constituye el punto más débil de los sistemas cementicios y según Trägårdh (1999) o Tam et al. (2005) el CO₂ migra preferentemente a través de dicha zona. Coherentemente con estos resultados, algunos investigadores señalan que en los HAC la permeabilidad al oxígeno es menor, si bien los valores que se obtienen son algo dispares (Zhu et al., 2001; De Schutter et al., 2003; Assié et al., 2003; Zhu y Bartos, 2003; Assié, 2004; Boel et al., 2007). Las diferencias registradas entre ambos hormigones son según Trägårdh (1999) del 40-50%, según De Schutter et al. (2003) hasta del 100% dependen-

do del grado de saturación de los poros y de la presión del gas, según Zhu et al. (2001) de más del 100%, según Assié et al. (2003) del orden del 150 % y según Boel et al. (2005; 2007) hasta del 500%. En cualquier caso, según De Schutter y Audenaert (2004) o Rozière et al. (2009) ni la permeabilidad al oxígeno ni la porosidad son indicadores totalmente fiables de la velocidad de carbonatación de un hormigón.

Por lo que respecta a la penetración de agua, los resultados son contradictorios, pues dependen bastante del tipo de finos empleado (De Schutter et al., 2003; Boel et al., 2003). Algunos investigadores, como De Schutter et al. (2003) o Jooss y Reinhardt (2002) obtienen mejoras del coeficiente de permeabilidad que oscilan entre un 13 % y un 38 % en hormigones con relaciones a/c iguales a 0,45. Sonebi e Ibrahim (2007) también registran valores similares cuando los HAC se fabrican con cenizas volantes, pero señalan un peor comportamiento que los HCV cuando se utiliza filler calizo o un aditivo cohesionante para garantizar la viscosidad de la mezcla. Por el contrario, Valcuende et al. (2005) en HAC fabricados con filler calizo indican mejores prestaciones frente a la penetración de agua. En otros trabajos (Boel et al., 2007), las diferencias entre HAC y HCV no son significativas.

En la literatura científica es frecuente encontrar que los HAC presentan una resistencia a la penetración de cloruros igual o superior a la de los HCV. Mientras que Morstsell y Rodum (2003) no encontraron diferencias significativas entre ambos hormigones, Audenaert y De Schutter (2003), Träghard et al. (2003) y Zhu y Bartos (2003) señalan que la resistencia a la penetración de cloruros es igual o mayor en los HAC, si bien esta depende mucho del contenido de cemento y de la relación a/c. La difusión de cloruros también depende del tipo de adiciones empleadas, observándose que el uso de adiciones siderúrgicas reduce de manera importante la penetración de cloruros en los HAC (Zhu y Bartos, 2003; Nehdi et al., 2004).

Los estudios sobre carbonatación en HAC son limitados y no siempre coincidentes. Algunos autores indican que la profundidad de carbonatación es mayor en los HCV (Anagnostopoulos et al., 2007; Ichimiya et al., 2007) y, además tanto mayor cuanto menor es la resistencia del hormigón (Anagnostopoulos et al., 2007). Según Valcuende y Parra (2009) la velocidad de carbonatación es menor en los HAC que en los HCV,

debido a la menor porosidad y a la mayor finura de su estructura porosa. Las diferencias entre ambos hormigones tienden a igualarse a medida que se iguala su contenido en finos. Otros autores señalan que dicha profundidad es mayor en los HAC (Boel et al., 2005); Rougeau et al. (1999) también concluyen que existe un peor comportamiento por parte de los HAC, si bien la resistencia del HCV utilizado como hormigón de referencia es muy superior a la de los HAC analizados. Assié et al. (2005; 2007) obtienen resultados muy similares en ambos hormigones, pero la relación a/c utilizada en sus trabajos es mayor en los HAC que en los HCV.

2.5 MODELOS DE LOS CÓDIGOS DE EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES CON LA EDAD

2.5.1 Propiedades mecánicas

La estimación de la resistencia a edades diferentes de la edad convencional (28 días) es un factor importante para el desarrollo y control en la ejecución de las obras.

Existen numerosos estudios que dan diferentes expresiones para realizar esta determinación, Gutsch (Gutsch, 2001), Kanstad et al. (Kanstad, et al., 1999), Byfors (Byfors, 1980), de Schutter et al. (De Schutter & Taerwe, 1996) (De Schutter & Taerwe, 1997).

Según Atrushi (Atrushi, 2003) el tipo de ecuación no es un punto importante en la modelización de las propiedades mecánicas, sin embargo, a nivel de códigos y normas parece existir un consenso en que el modelo responda a la siguiente ecuación básica:

$$f(t) = \beta(t)^\alpha f(28) \quad 2.11$$

donde:

$f(t)$ = valor de la propiedad estudiada a la edad t

$\beta(t)^\alpha$ = coeficiente función del tipo de cemento, curado

α = coeficiente específico para cada propiedad y

$f(28)$ = valor de la propiedad a la edad de 28

Esta ecuación es una generalización de la propuesta por Freiesleben Hansen (Freiesleben Hansen & Pedersen, 1985) y que fue adoptada por el CEB en el MC-90 y el FIB en el MC-10

Tabla 4 Modelos de los códigos (EHE-08, EC-2, MC-10, ACI 209.2R 08) para las propiedades mecánicas en función al tiempo.

NORMAS	ECUACIÓN PARA OBTENER		
	RESISTENCIA A COMPRESIÓN	MÓDULO DE DEFORMACIÓN	RESISTENCIA A TRACCIÓN
EHE-08	$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm}$	$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}}\right)^{0.3} E_{cm}$	$f_{ct,m}(t) = \beta_{cc}(t)^\alpha f_{ct,m}$
EC-2		$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}}\right)^{0.5} E_{cm}$	
MC-10		$E_{cm}(t) = \beta_E(t) E_{cm}$	
ACI 209.2R 08	$f_{cmt} = \left[\frac{t}{a + b(t)}\right] f_{cm28}$	$E_{mcto} = 0,043 \cdot \gamma_c^{1,5} \sqrt{f_{cmt0}}$	-

En los modelos EHE-08, EC-2, MC-10, (EHE-08, EC-2, MC-10) los coeficientes tienen los siguientes significados:

- $\beta_{cc}(t)$ y $\beta_E(t)$ Coeficiente de edad de acuerdo con la ecuación 2.1 y 2.14
- f_{cm} y $f_{cm}(t)$ Resistencia media a 28 días y a la edad t , en MPa
- E_{cm} y $E_{cm}(t)$ Módulo de deformación medio a 28 días y a la edad t , en MPa
- $f_{ct,m}$ y $f_{ct,m}(t)$ Resistencias medias tracción a 28 días y a la edad t , en MPa

En los modelos ACI 209.2Rs (ACI 209.2R) los coeficientes tienen los siguientes significados:

- a, b constantes usadas para describir el desarrollo de la resistencia
- f_{cmt} Resistencia media a la edad t , en MPa
- f_{cmt0} Resistencia media cuando la carga comienza a la edad t_0 , en MPa
- E_{cmt} Módulo de elasticidad medio a la edad t , en MPa
- E_{cmt0} Módulo de elasticidad medio cuando la carga comienza a la edad t_0 , en MPa
- γ_c Densidad del hormigón, kg/m^3

Las constantes a y b son funciones del tipo de cemento y del tipo de curado empleado, siendo el intervalo de valores utilizables: $a=0,05$ a $9,25$ y $b = 0.67$ a 0.98 . Los valores recomendados se dan en la tabla

Tabla 5 Valores típicos recomendado de a y b según ACI 209.2R

TIPO DE CEMENTO	CURADO HÚMEDO		CURADO AL VAPOR	
	a	b	a	b
I	4.0	0.85	1.0	0.95
III	2.3	0.92	0.70	0.98

De la tabla anterior se deduce que el planteamiento de los modelos ACI 209.2Rs es diferente del de los modelos EHE-08, EC-2, MC-10., aunque hay que tener en cuenta que el coeficiente de edad también depende del tipo de cemento y de su hidratación.

Para los modelos EHE-08, EC-2, MC-10, se puede afirmar que en el caso del módulo de deformación (módulo de elasticidad en EC-2 y MC-10) las tres ecuaciones responden a la estructura de la ecuación básica. Así, si en la ecuación del módulo del modelo EHE-08 y del de la EC-2 se sustituye la variable $f_{cm}(t)$ por la ecuación correspondiente se concluye que:

- EHE-08:

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}}\right)^{0.3} E_{cm} = \left(\frac{\beta_{cc}(t) f_{cm}}{f_{cm}}\right)^{0.3} E_{cm} = (\beta_{cc}(t))^{0.3} E_{cm} \quad 2.12$$

- EC-2:

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}}\right)^{0.5} E_{cm} = \left(\frac{\beta_{cc}(t) f_{cm}}{f_{cm}}\right)^{0.5} E_{cm} = (\beta_{cc}(t))^{0.5} E_{cm} \quad 2.13$$

- MC-10:

$$\beta_E(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0.5} \quad 2.14$$

$$E_{cm}(t) = \beta_E(t) E_{cm} = [\beta_{cc}(t)]^{0.5} E_{cm} \quad 2.15$$

Por tanto, se puede para las tres propiedades considerar que el coeficiente de edad $\beta_{cc}(t)$ de acuerdo con las normas sería:

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0,5} \right] \right\} \quad 2.16$$

donde:

- s Coeficiente función de la clase del cemento, ver tabla 3
- t Edad del hormigón que en condiciones de obra es igual a la madurez y en condiciones de laboratorio coincide con la edad temporal.

En el caso del módulo de deformación existe una diferencia entre las ecuaciones, que radica en que la EHE-08 considera un exponente de 0,3, en lugar del 0,5 que aparece en los otros dos códigos. Esta variación es significativa especialmente a las edades tempranas objeto de esta tesis, tal y como se puede apreciar en la figura 35.

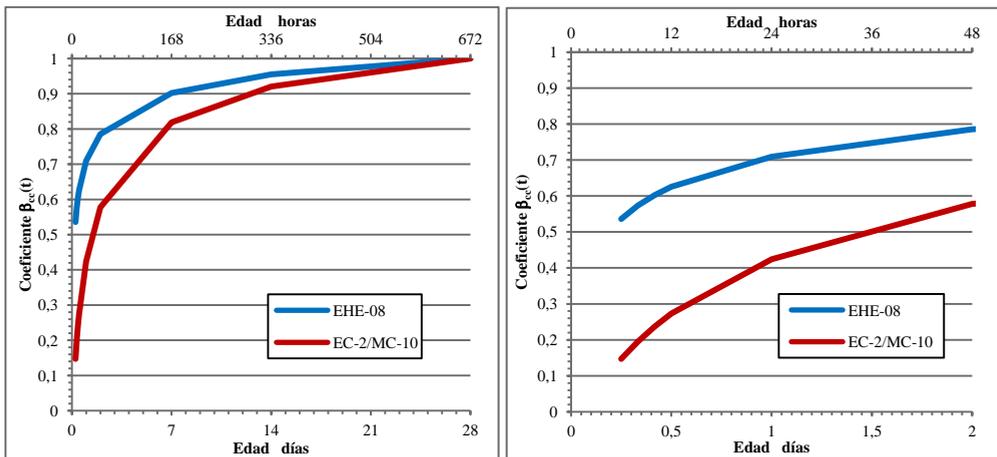


Figura 36 Evolución del coeficiente $\beta_{cc}(t)$ con la edad para los modelos EHE-08, EC-2 y MC-10

Varios autores como Kanstad et al. (1999) y Lura et al. (2000) han discutido la introducción del parámetro t_0 , que de forma simplificada se puede definir como el momento en el que la resistencia y la rigidez se determinan como cero. Debido a que este parámetro es común para todas las expresiones de las propiedades mecánicas, es posible hacer los programas experimentales más eficientes. Cuando se utiliza el grado de hidratación (α) para describir el progreso de la hidratación, el parámetro equivalente a α_0 es t_0 . El

"concepto t_0 " expresa que debe tener lugar cierta hidratación antes de que el hormigón empiece a alcanzar propiedades mecánicas "medibles". Bjøntegaard y otros (Bjøntegaard, et al., 1999) lo definen como "el momento en que el hormigón es suficientemente rígido para AD para generar tensiones significativas". Las pruebas en HPC con relaciones a/c de alrededor de 0,4 y con diferentes tipos de cemento y el contenido de sílice variables han demostrado que t_0 varía normalmente entre 9 a 12 horas a 20 °C [Kanstad et al. (1999), Krauss et al. (2001)]. Esto corresponde a un grado de hidratación del 15 - 20% (es decir, $\alpha = 0,15 - 0,20$).

- Resistencia a compresión

$$f_c(t_e) = f_{c28} \cdot \left\{ \exp \left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_e - t_0}} \right) \right] \right\} \quad 2.17$$

- Resistencia a tracción

$$f_t(t_e) = f_{t28} \cdot \left\{ \exp \left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_e - t_0}} \right) \right] \right\}^{nt} \quad 2.18$$

- Módulo de deformación

$$E_c(t_e) = E_{c28} \cdot \left\{ \exp \left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_e - t_0}} \right) \right] \right\}^{nE} \quad 2.19$$

Siendo:

f_{c28} , f_{t28} y E_{c28} = resistencia a compresión, resistencia a tracción y módulo de deformación a 28 días

s = coeficiente función de la clase del cemento, ver tabla 3

t_e = edad equivalente del hormigón (t_e = edad real cuando $T = 20^\circ\text{C}$ y $\text{HR} = 95\text{-}100\%$)

t_0 = tiempo cero

nt y nE = parámetros específicos

La aplicabilidad de estas ecuaciones para la predicción de las propiedades mecánicas a edades tempranas se discute en esta tesis.

2.5.2 Retracción

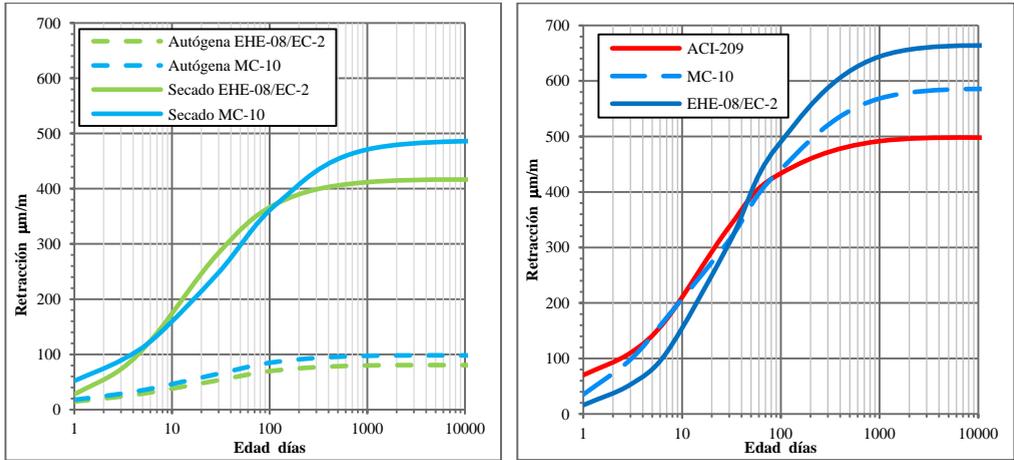
Los modelos de cálculo recogidos en los diferentes códigos y normativas varían en complejidad y en precisión, aunque también se podrían agrupar en modelos EHE-08, EC-2, MC-10, y modelo ACI 209.2R. En la Tabla 6 se recoge las diferentes ecuaciones que permiten determinar la retracción a diferentes edades.

Tabla 6 Modelos de los códigos (EHE-08, EC-2, MC-10, ACI 209.2R) para la retracción en función al tiempo.

NORMAS	ECUACIÓN PARA OBTENER:		
	RETRACCIÓN AUTÓGENA	RETRACCIÓN POR SECADO	RETRACCIÓN TOTAL
EHE-08	$\epsilon_{ca}(t) = \epsilon_{ca0} \cdot \beta_{as}(t)$	$\epsilon_{cd}(t, t_s) = \epsilon_{cd,0} \cdot \beta_{ds}(t-t_s) \cdot K_h$	$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cas} + \epsilon_{cds}$
EC-2			
MC-10	$\epsilon_{as}(t) = \epsilon_{cas0}(f_{cm}) \cdot \beta_{as}(t)$	$\epsilon_{cds}(t, t_s) = \epsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{HR}(HR) \cdot \beta_{ds}(t-t_s)$	$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cas}(t) + \epsilon_{cds}(t-t_s)$
ACI 209.2R 08			$\epsilon_{sh}(t, t_s) = \frac{(t-t_s)^\alpha}{f + (t-t_s)^\alpha} \epsilon_{shu}$

Los modelos de la EHE-08, el EC-2 y el MC-10 utilizan un planteamiento muy diferente del modelo ACI 292.2R. El dato principal a utilizar en estos modelos es la f_{cm} del hormigón analizado mientras que en el modelo ACI 209.2R se utiliza una retracción básica última ϵ_{shu} igual a 780×10^{-6} mm/mm que debe corregirse por un coeficiente γ_{sh} cuando las condiciones no son iguales a las condiciones standard de la norma ACI.

A pesar de estas diferencias, se puede considerar que indirectamente los modelos son compatibles ya que en los modelos EHE-08, EC-2, MC-10, el contenido de cemento, aire ocluido y árido condicionan las resistencias a compresión y en el ACI 209.2R son parámetros correctores de la retracción básica.



Los modelos EHE-08, EC-2, MC-10, para la retracción autógena dan valores similares a cualquier edad no ocurre así con la retracción por secado ya que a edades menores 4 días y mayores 100 días el MC-10 da valores mayores. Por lo que respecta a la retracción total, el modelo EHE-08/EC-2 da valores menores que los otros dos a edades menores de 14 días y mayores a edades mayores de 14 días.

CAPÍTULO 3.
PLAN EXPERIMENTAL Y
METODOLOGIA

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se define el programa experimental abordado para alcanzar los objetivos planteados. A continuación se detalla la planificación del trabajo, los materiales empleados y la metodología seguida en la fase experimental.

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.2.1 Planteamiento del programa de trabajo experimental

El objetivo de esta tesis es el estudio de la evolución de las propiedades mecánicas y reológicas del HAC a edades muy tempranas y tempranas y compararlas con las de un HCV equivalente.

Es evidente que en las normas, en general, se considera como propiedad de referencia tanto en la especificación como en el cálculo estructural la resistencia a compresión. También es cierto que en las obras, especialmente en la de edificación, los tiempos de ejecución y los plazos de desencofrado, son factores importantes en el desarrollo de la obra. Estos plazos de desencofrado están muy influenciados por otras propiedades mecánicas y reológicas del hormigón endureciendo³, fundamentalmente, la resistencia a tracción, el módulo de deformación y la retracción.

3.2.1.1 Hormigones analizados

Si bien el problema puede plantearse a un nivel muy amplio, en esta tesis se decidió centrar el estudio en hormigones de bajo contenido en cemento y relación agua cemento en el límite superior de entre los aceptados como hormigones estructurales. De este modo se cubre el campo en el que el hormigón autocompactante presenta la máxima dificultad, y que coincide con los hormigones de mayor nivel de uso en construcción en obra.

³ En esta tesis se ha considerado como hormigón endureciendo al hormigón que no ha alcanzado la edad de referencia normalizada, es decir, la edad de 28 días.

Con esta idea se ha planteado seleccionar dos tipos estructuras de hormigón definidas por el tamaño máximo de árido y por el tipo y contenido de cemento. Así se trabajará con:

- Hormigón de tamaño máximo de árido 20 mm y 300 kg/m³ de Cemento tipo CEM II 42,5, como representativo de un hormigón tipo obra
- Hormigón de tamaño máximo de árido 12,5 mm y 325 kg/m³ de Cemento tipo CEM I 52,5, con una estructura granular y tipo de cemento adaptado a obras fuertemente armadas y secciones pequeñas.

Con cada uno de estos conceptos se ha planteado fabricar y analizar 4 hormigones diferenciados entre sí por el tipo de aditivo empleado, por el objetivo en trabajabilidad (Hormigón convencional vibrado - HCV y Hormigón autocompactante - HAC). Evidentemente, en función del objetivo en trabajabilidad la estructura granular del hormigón se modificó para conseguir un comportamiento adecuado a las exigencias reológicas, pero considerando también como variable el contenido en finos.

Las condiciones de trabajabilidad se han fijado para cada uno de los hormigones, adoptando como criterio de selección de esta las que correspondan a los hormigones más utilizados en el campo de la edificación, por lo que, se ha adoptado para los hormigones HCV un asiento en el Cono de Abrams de 8-10 cm, que corresponde a una consistencia blanda-fluida según le EHE-08 y a una consistencia S2-S3 según la EN 206-13. Para el caso de los HAC se han adoptado escurrimientos de 600 mm y 700 mm que corresponden a las clases AE-1 y AE-2 de la EHE-08, y la clase SF1y SF2 de la EN206-13, respectivamente, por lo que se han obtenido 3 dosificaciones básicas de partida. Establecidas las consistencias a utilizar y el tipo de estructura a aplicar, se decide aplicar combinaciones de áridos variables. Teniendo en cuenta que las secciones más armadas presentan una mayor dificultad de paso e interesa mejorar la fluidez del HAC, se analizará para los hormigones autocompactantes de tamaño máximo de 12,5 mm sólo la dosificación con escurrimiento de 700 mm.

En todas las dosificaciones se utilizó un aditivo superfluidificante de alto rango. En principio se plantea el uso de uno de los más potentes actualmente en el mercado de uso orientado a prefabricados: el Viscocrete 20HE. Al ser este aditivo muy activo podía

presentar problemas de pérdida de consistencia a muy corto plazo y algún efecto en los tiempos de fraguado y resistencias iniciales, por lo que se procedió a incorporar como variable el tipo de aditivo en algunas dosificaciones.

La tabla 7 muestra la denominación y características del los hormigones analizados. La nomenclatura sigue la tipificación que empieza fijando el tipo de hormigón: "AC" para autocompactante y "CV" para el convencional vibrado, seguido de un número que representa el tamaño máximo de árido empleado (20 mm ó 12 mm) y una letra indicando el tipo de aditivo empleado "A" para el viscocrete 20 HE y "B" para el Viscocrete 3425. En el caso de los hormigones AC se incorpora el valor del escurrimiento objetivo en centímetros.

En el apartado 3.3.1 se justifica la dosificación de cada uno de los hormigones analizados.

Tabla 7 Especificaciones y Designación de los hormigones estudiados

HORMIGÓN	ESCURRIMIENTO (mm)	ASIENTO (mm)	CEMENTO	ÁRIDO TAMAÑO MÁXIMO mm	ADITIVO
AC20A60	600		300 kg/m ³ CEM II-B (M/L) 42,5	20	Viscocrete 20HE
CV20A		8-10			
AC20A70	700				
AC12A70	700		325 kg/m ³ CEM I 52,5	12,5	Viscocrete 20HE
CV12A		8-10			
AC12B70	700				
CV12B		8-10			Viscocrete 3425

3.2.1.2 Consideración de edad muy temprana y temprana e intervalos temporales analizados

Para cada uno de los hormigones diseñados se pretende conocer la evolución de sus propiedades a edades muy tempranas y tempranas.

Como se ha podido ver en el capítulo anterior, al no existir una definición unificada del concepto de edad temprana, en esta tesis se ha adoptado la definición de la prNE 83160 (AENOR, 2014). Así se marca el inicio temporal para definir la edad del hormigón en el momento en el que se incorpora el agua a la amasadora, y por tanto empieza el contacto con el cemento. Por otra parte se considera que para empezar a valorar propiedades

mecánicas el hormigón debe haber pasado a estado sólido y por tanto se marca un límite inferior para este trabajo en el tiempo correspondiente al final del fraguado. Por tanto, es pertinente determinar los tiempos de fraguado de los hormigones utilizados para poder realizar los ensayos de las propiedades.

A partir de este momento se ha fijado una serie de periodos lo más corto posibles para poder determinar las propiedades con procedimientos adecuados a los medios de ensayo estándar y lo más representativos posible del comportamiento estructural del material. Dado que los tiempos de fraguado se localizaban normalmente sobre las 6-8 horas en los hormigones que no incorporan aditivos que modifiquen el fraguado y la necesidad de que el hormigón tenga la suficiente rigidez para que la manipulación de las muestras no suponga una alteración que influyera en los resultados se decidió que los ensayos se realizarían a partir de la edad de 8 horas. Algunos intentos a edades inferiores plantearon serias dificultades procedimentales para poder garantizar rigor experimental, y/o resultados prácticamente nulos en las propiedades determinadas. A partir de este momento se controló las propiedades mecánicas cada 2 horas hasta la edad 12 h que constituirá el periodo fundamental de este estudio. Evidentemente se continuó con la determinación de las mismas propiedades a las edades tradicionalmente analizadas en otros estudios, y por ello se fijó los intervalos temporales indicados en la Tabla 8.

Con objeto de que las condiciones ambientales de las probetas no influyeran en los resultados y que éstos fueran comparables entre sí, se controló rigurosamente tanto las condiciones en que se conservaron los materiales previamente a la fabricación del hormigón, como aquellas en las que se realizaron los ensayos desde el primer momento los medios de conservación fueron:

Recinto de Fabricación. Condiciones de laboratorio: Sala a 20 ± 5 °C y < 70 %HR. En estas condiciones se conservaron los materiales durante las 24 h previas a la fabricación del hormigón, se realizó el amasado y se conservaron las probetas hasta las 24 horas.

Las probetas recién fabricadas se conservaron en sus moldes y cubiertas con arpillera húmeda y plástico. Los ensayos de caracterización del hormigón en estado fresco se realizaron también en estas condiciones.

Cámara de curado normalizado: curado con una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 95-100%. Esta cámara se utilizó para la realización del ensayo de fraguado desde el final del amasado hasta el final del ensayo.

Las probetas de retracción se mantuvieron en la cámara de curado normalizado hasta el momento de realización del ensayo. Durante la realización de los ensayos se mantuvieron en cámara con 20°C de temperatura y 50% de humedad relativa

Tabla 8 *Edades de ensayo y sistema de conservación*

PROPIEDAD	EDAD	CONSERVACION
Conservación de materiales y fabricación del hormigón	De -24 h hasta 0h	Condiciones de laboratorio a 20±5 °C
Propiedades físicas y reológicas Fabricación de probetas para ensayos mecánicos	De 0 a 1h	Condiciones de laboratorio a 20±5 °C
Ensayo de fraguado	De 0h a 6-8 h	Cámara de curado 20°C y HR 95-100%.
Mecánicas	8, 10, 12 y 24 h	Condiciones de laboratorio 20±5 °C Moldeadas hasta el momento de ensayo
	Desde 24 h hasta rotura a 48 h, 7 y 28 días	Normalizado
Retracción autógena	8h – 48 h	Conservación moldeadas en cámara de curado. Desmoldeo a las 8 horas Cámara a 20°C y 50 % de humedad
Retracción total y autógena Retracción por peso	48 h – 28 días	Moldeadas durante 48 horas en cámara de curado Cámara climática a 20°C y 50 %

3.2.1.3 *Propiedades estudiadas*

Los HAC se diferencian de los HCV, además de por la no necesidad de vibración, por su capacidad de paso y su capacidad de fluir. Estas dos propiedades son, entre otras las que le confieren su carácter, pero para comprender las leyes que regulan estas propiedades es necesario conocer sus parámetros reológicos que nos permitirán justificar los valores determinados.

En Tabla 9 se indican las propiedades determinadas tanto en estado fresco como en estado endurecido.

Tabla 9. Propiedades determinadas

ESTADO DEL HORMIGÓN	PROPIEDAD	TIPO DE HORMIGÓN	
		HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE	HORMIGÓN CONVENCIONAL VIBRADO
Hormigón fresco	Reológicas	Fluidez	Trabajabilidad
		Capacidad de paso	
		Tensión de corte	
		Viscosidad plástica	
	Físicas	Principio y Final Fraguado	
		Aire Ocluido	
Hormigón endurecido	Mecánicas	Compresión	
		Tracción	
	Reológicas	Módulo de deformación	
		Retracción Autógena	
		Retracción por secado	
		Retracción Total	

En la tabla 10 se indica el detalle del hormigón utilizado para los ensayos.

Tabla 10. Detalle de ensayos y m^3 utilizados.

ENSAYOS	PROBETAS	HORMIGONES	Nº Total de probetas	VOLUMEN PROBETA (l)	VOLUMEN TOTAL (l)
Compresión	24	7	168	5.3	890.4
Módulo de deformación	24		168		890.4
Tracción indirecta	24		168		890.4
Retracción	8		56	4	256
Estado fresco , Fraguado, Aire Ocluido.		7			420
TOTAL / AMASADA		56		TOTAL	3347,2

3.3 Diseño de la dosificación y Amasadas de prueba

Con los datos de partida y aplicando el método de dosificación de Bolomey, se parte de una relación a/c fija y contenido de cemento preestablecido para cada tipos de hormigón, se procede a calcular las cantidades de cada uno de los componentes para a continuación realizar amasadas de prueba para determinar la dosificación definitiva.

De las amasadas que no cumplían con el criterio de asiento en el caso del HCV o el de escurrimiento para el HAC, no se fabrican probetas. En cada caso, se analiza el resulta-

do y se procede a realizar las oportunas correcciones hasta que se cumplan las exigencias de asiento y escurrimiento, respectivamente.

3.3.1 Dosificaciones estudiadas.

El diseño de todos los hormigones se realizó tomando como referencia la utilización de la curva de referencia de Bolomey:

$$y = a + (100 - a) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad 3.1$$

donde y = % árido que pasa por el tamiz

a = coeficiente que depende la consistencia y tipo de árido

d = abertura del tamiz en mm

D = Tamaño máximo del árido total

El coeficiente “a” de Bolomey es variable en función de los materiales empleados y la exigencias del hormigón deseado. Para un HCV varía entre 11 y 13. En el caso de los HAC Rigueira et al (Rigueira., 2009) y García-Ballester et al (García Ballester, et al., 2013) recomiendan que este valor esté en el intervalo 20-24. Esto permite utilizar el filler como un componente granular más.

3.3.1.1 Dosificaciones

Se planteó como punto de partida trabajar con hormigones de resistencia media 35 MPa, tamaño máximo del árido 20 mm, cantidad de cemento 300 kg/m³, relación a/c = 0,65 y consistencia 80-100 mm para los HCV y escurrimiento de 600 y 700 mm para los HAC. En ambos hormigones se utilizaron los dos tipos de aditivos superfluidificantes.

Para los hormigones de tamaño máximo 12,5 mm, el contenido de cemento será de 325 kg/m³ y se trabajará con un escurrimiento de 700 mm en los HAC.

Con los materiales que muestran en el apartado 3.6, se planteó el mejor ajuste a la curva teórica propuesta. Las tablas 11 y 12 muestran las dosificaciones propuestas.

Tabla 11 *Dosificaciones de los hormigones de tamaño máximo 20 mm.*

TIPO DE HORMIGÓN		AC20A60	AC20A70	CV20A
Relación a/c		0,65	0,65	0,65
Coeficiente de Bolomey (a)		22	22	12
Cemento	kg	300	300	300
Agua efectiva	l	195	195	195
Árido grueso 8/20	kg	396,43	396,43	362,58
Árido grueso 4/12,5	kg	495,91	495,91	602,04
Árido fino 0/4	kg	656,46	656,46	534,00
Árido fino 0/2	kg	220,04	220,04	178,99
Filler calizo	kg	100	100	0
Aditivo superfluidificante	(% spc)	0,90	1,20	0,5
	kg	2,7	3,60	1,5

Tabla 12 *Dosificaciones de los hormigones de tamaño máximo 12,5 mm*

TIPO DE HORMIGÓN		AC12A70	CV12A	AC12B70	CV12B
Relación a/c		0,65	0,65	0,65	0,65
Coeficiente de Bolomey (a)		22	12	22	12
Cemento	kg	325	325	325	325
Agua efectiva	l	211,25	211,25	211,25	211,25
Árido grueso 8/20	kg	—	—	—	—
Árido grueso 4/12,5	kg	682,65	748,67	681,35	768,09
Árido fino 0/4	kg	571,93	978,43	517,38	883,2
Árido fino 0/2	kg	478,83	109,51	531,38	185,31
Filler calizo	kg	100	0	100	0
Aditivo superfluidificante	(% spc)	0,80	0,30	1,30	0,30
	kg	2,6	0,975	4,23	0,975

La granulometría del conjunto de sólidos para cada uno de los hormigones, resultado de las composiciones propuestas se reflejan en las figuras 37 y 38.

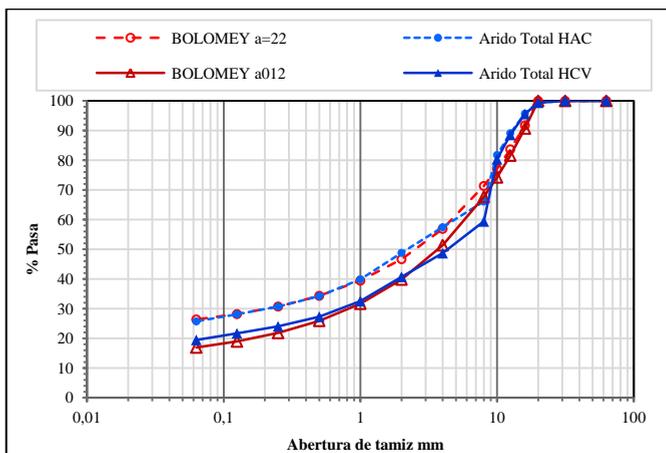


Figura 37 Gráfica de la granulometría del árido total tamaño máximo 20

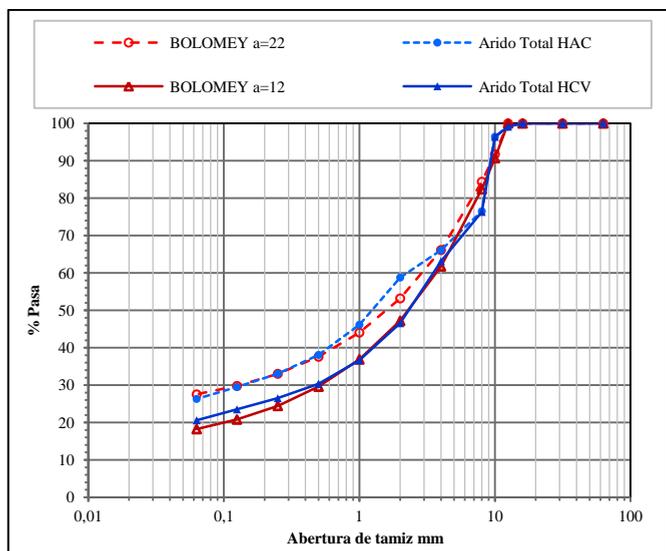


Figura 38 Gráfica de la granulometría del árido total tamaño máximo 12,5

3.4 Procedimiento de trabajo.

Para tener un mejor control del trabajo realizado se realizó un cronograma de actividades de trabajo que se repitió en cada uno de los hormigones y en cada una de las amasadas y que se refleja en las tablas 13 a 15.

Tabla 13 Cronograma para los ensayos previos

DÍA	PROCESO	PROCEDIMIENTO
Día 1	Pre amasado	<ul style="list-style-type: none"> - Introducir árido en área de trabajo. - Humedecer los áridos. - Cubrir los áridos con un film de polietileno, para el día siguiente.
Día 2	Fabricación y Ensayo en estado fresco	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar la humedad de los áridos y corregir el agua. - Realizar amasada para ensayos previos en estado fresco. - Realización de ensayo de escurrimiento, reómetro, y embudo en V. - Segunda amasada para realizar el ensayo de tiempo de fraguado del hormigón. - Separación del árido grueso por tamizado del hormigón obteniendo el mortero y realizando el ensayo según la ASTM C403.

Tabla 14 Cronograma para los ensayos de características mecánicas

DÍA	PROCESO	PROCEDIMIENTO
Día 1	Pre-amasado	<ul style="list-style-type: none"> - Introducir árido en el área de fabricación del laboratorio. - Humedecer los áridos. - Cubrir los áridos con un film de polietileno, para el día siguiente. - Colocar desencofrante a moldes (150 mm × 300mm).
Día 2	Amasado y fabricación	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar la humedad de los áridos y corregir el agua. - Fabricar hormigón. - Realización de prueba de consistencia. (Cono de Abrams HCV y escurrimiento HAC). - Vertido y colocación de hormigón en molde. - Compactación manual con varilla para HCV - Almacenamiento de probetas en cámara de curado con 20 – 25°C de temperatura.
	Ensayo a edad temprana	<ul style="list-style-type: none"> - Desencofrado de probetas para ensayos a cada una de las edades de ensayo 8 horas, 10 y 12 h desde el vertido del agua. - Refrentado de las probetas, para compresión y módulo de deformación. - Iniciación de ensayos a compresión, módulo de deformación y tracción indirecta a 8, 10 y 12 horas.
Día 3	Ensayo a 24 horas	<ul style="list-style-type: none"> - Desencofrado de probetas 1 h antes del ensayo. - Colocar todas las probetas que no se van a ensayar en cámara de curado. - Pulido de probetas a ensayar solo las que se ensayaran a compresión y módulo de deformación. - Realización de ensayo a compresión y módulo de deformación, tracción indirecta.
Día 4 Día 7 Día 28	Ensayo a 48 horas Ensayo a 7 días Ensayo a 28 días	<ul style="list-style-type: none"> - Pulido de probetas 1 hora antes de realización de ensayo, solo las que se ensayaran a compresión y módulo de deformación. - Realización de ensayos a compresión, módulo de deformación y tracción indirecta.

Tabla 15 Cronograma para los ensayos de retracción

DÍA	PROCESO	PROCEDIMIENTO
Día 1	Pre-amasado	<ul style="list-style-type: none"> - Introducir árido en el área de trabajo. - Humedecer los áridos. - Cubrir los áridos con un film de polietileno, para el día siguiente. - Colocar desencofrante a moldes (40mm×100mm×100mm).
Día 2	Amasado y preparación ensayo retracción autógena	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar la humedad de los áridos y corregir el agua - Fabricar hormigón. - Realización de prueba de consistencia. (Cono de Abrams HCV y escurrimiento HAC). - Preparación de moldes con lámina de poliestireno en la parte inferior del molde y film de polietileno en las paredes del molde. - Vertido y colocación de hormigón en molde. - Compactación manual con varilla para HCV. - Almacenamiento de probetas en cámara de curado 100 % H.R. y 20°C. - Desencofrado de 2 de 8 probetas prismáticas entre 6 - 8 h - Preparación de esas 2 probetas para medir la retracción autógena a edad temprana.
Día 3	Preparación ensayo retracción por secado	<ul style="list-style-type: none"> - Desencofrado de las demás probetas prismáticas. - Parar el ensayo de retracción autógena, guardar datos. - Tomar probetas de retracción autógena y 4 probetas más para introducir en cámara de retracción por secado. - Desprender el film de polietileno de una de las 2 probetas de retracción autógena y envolver con él una de las probetas restantes. - Montar comparadores en cada probeta, he introducir a cámara de retracción. - Introducir las 2 probetas restantes a otra cámara climática.
Día 4 a día 28	Ensayo de retracción	<ul style="list-style-type: none"> - Peso de las 2 probetas cámara climática - Lectura de las 6 probetas de la cámara de retracción

3.5 Metodología

Para la realización de la parte experimental de la tesis se aplicó la siguiente metodología:

1. Caracterización de los materiales componentes.
2. Diseño de la dosificación y amasadas de prueba
3. Fabricación del hormigón.
4. Caracterización del hormigón.
5. Ensayos propiedades mecánicas y módulo de deformación
6. Ensayos de retracción.

En este apartado se definen los detalles procedimentales seguidos para cada caso.

3.6 Caracterización de los componentes

Los materiales utilizados en esta tesis se muestran en la tabla 16, son de uso habitual para la fabricación de hormigones y son los que se han utilizado para la fabricación de todos los HAC y HCV planteados en el plan experimental.

De los productos de origen industrial se obtuvo la información técnica del producto. En el caso de los áridos y filler se procedió a determinar la granulometría, el contenido de finos y las densidades.

Tabla 16 *Materiales Utilizados*

Materiales	Designación	Procedencia
Cemento	CEM I 52,5R	Cementval S.L.
	II B-M (S-L) 42,5 R	
Áridos**	AF 0/2 T-C	Carasoles
	AF 0/4 T-C	
	AG 4/12,5 T-C	
	AG 8/20 T-C	Caplansa
Filler	PM 0/1* T-C	Caplansa
Aditivo	Sika ViscoCrete-3425	Sika
	Sika ViscoCrete-20HE	

* De acuerdo con lo establecido en UNE EN 12620

** Designación según UNE 146901

3.6.1 Cemento

Los cementos utilizados se indican en la Tabla 16. El primero se suministró a granel en bigbags de una tonelada y el segundo ensacado en sacos de 25 kg. Las características, proporcionadas por el fabricante, se reflejan en el Anexo A

3.6.2 Áridos

Todos los áridos utilizados en esta tesis han sido calizos y de machaqueo procedentes de dos canteras que se reseñan en la tabla 16. Se han empleado para este proyecto dos áridos gruesos de tamaños máximos 20 mm y 12,5 mm, y dos áridos finos calizo de tamaños 4 mm y 2mm

3.6.2.1 Propiedades

Las propiedades de los áridos suministradas por las canteras se reflejan en el Anexo A. En la tabla 17 se reflejan las determinadas experimentalmente para la realización de los hormigones

Tabla 17 Propiedades de los áridos

PROPIEDAD	ÁRIDOS			
	GRAVA 4/12,5	GRAVA 8/20	ARENA 0/4	ARENA 0/2
Densidad (g/cm ³) UNE EN 1097-6	2,72	2,62	2,64	2,58
Absorción (%) EN 1097-6	1,00	0,4	0,7	0,85
% CO ₃ Ca			97.61%	95.51%

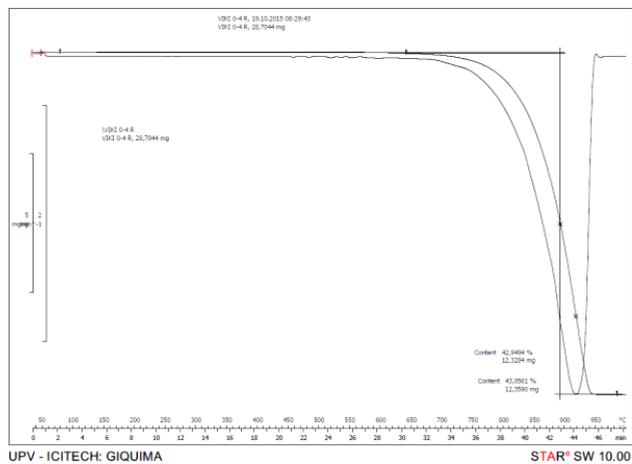


Figura 39 TG del árido 0/4

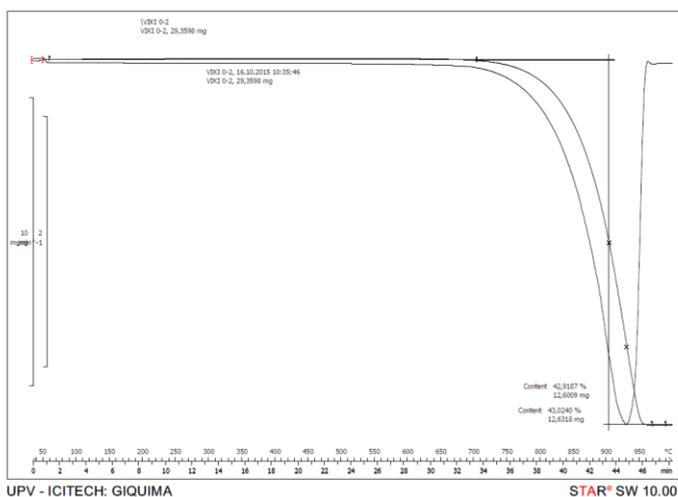


Figura 40 TG del árido 0/2

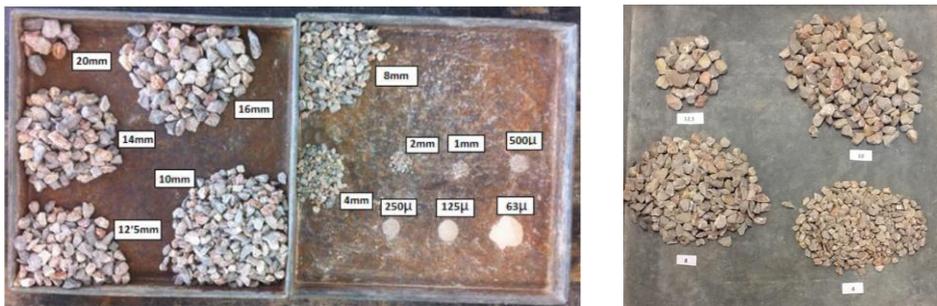
El resultado del TG de los áridos finos (figuras 37 y 38) muestra en ambos una única pérdida entre 800-900 °C indicativa de que solo tienen carbonato cálcico. Los datos de pérdida transformados a % de carbonato cálcico se indican en la Tabla 17

3.6.2.2 Granulometría de los áridos

Para determinar la granulometría de los áridos se utilizaron los tamices tipificados en la norma UNE EN 933-2. La serie granulométrica de tamices que se ha adoptado es la serie básica+serie 2 que se indica en la norma UNE EN 12620 y en la EHE-08 (MFOM, 2012).

a) Áridos gruesos

La granulometría de los dos áridos gruesos se muestra en las figuras 39 y 40, en las que se aprecia que el contenido de finos es muy bajo 0,9% y 0,5%.



(a)

(b)

Figura 41 Granulometría del los áridos gruesos (a) árido 8/20 y (b) árido 4/12,5

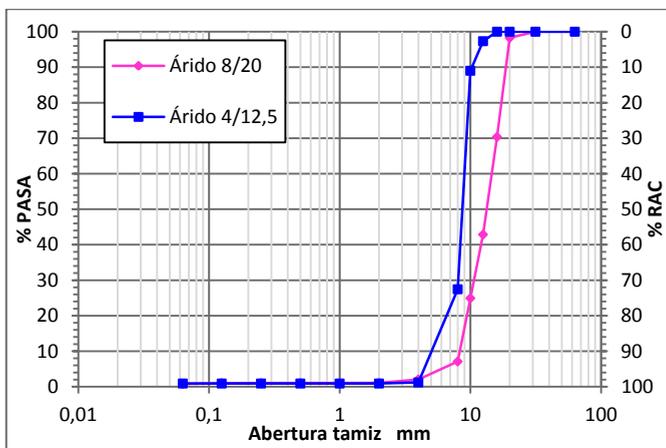


Figura 42 Gráfica de la granulometría de los árido 8/20 y 4/12,5

b) Áridos finos

La granulometría de los dos áridos finos se muestra en las figuras 41 y 42. La tabla de los resultados para cada tamiz y cada árido se muestra en el Anejo A.



(a)

(b)

Figura 43 Granulometría de los áridos finos (a) árido 0/4 y (b) árido 0/2

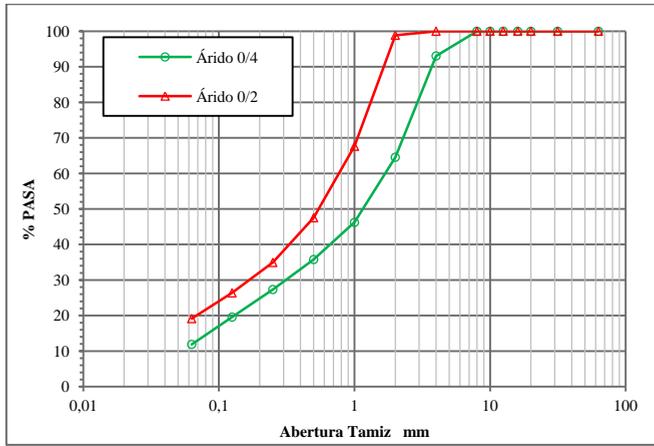


Figura 44 Gráfica de la granulometría de los árido 0/4 y 0/2

Debido al alto porcentaje de finos que contenían los áridos finos, 11,9% la arena 0/4 y 19,1% la arena 0/2, se procedió a realizar la granulometría con el equipo de laser del laboratorio de química del ICITECH (figura 43)

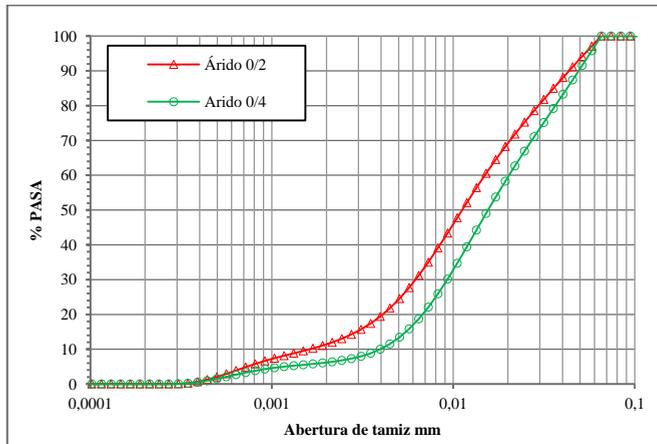


Figura 45 Granulometría laser de la fracción < 63 μm de los áridos finos

c) Filler

El filler utilizado es un filler tipo A de acuerdo con la norma francesa NF 18508 (AFNOR, 2012) siendo sus características las indicadas en la tabla 18.

Tabla 18 *Propiedades del filler*

PROPIEDAD		FILLER
Densidad	g/cm ³	2,70
Sup. específica relativa	cm ² /g	9129
CO ₃ Ca	%	98.63%

El resultado del TG del filler muestra una única pérdida entre 800-900 °C (figura 46) indicativa de que solo está compuesto por carbonato cálcico. Los datos de pérdida transformados a % de carbonato cálcico se indican en la Tabla 18

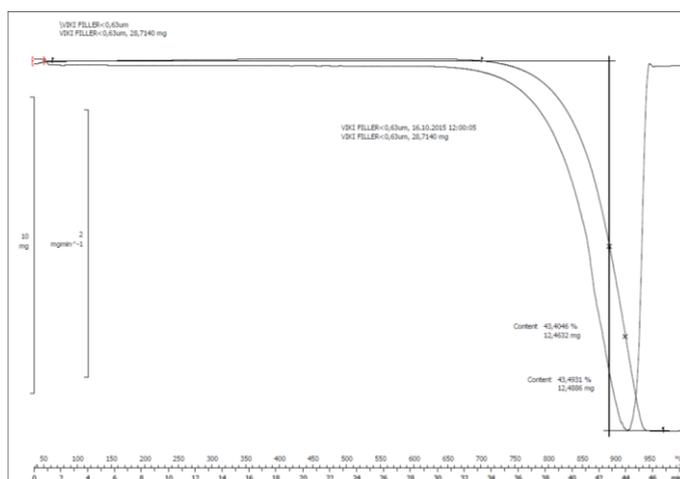


Figura 46 *TG del filler calizo*

3.6.2.3 Granulometría del filler

Para conocer la granulometría del filler, (Figura 47) se procedió a realizar el análisis mediante la técnica de laser con el equipo del laboratorio de química del ICITECH.

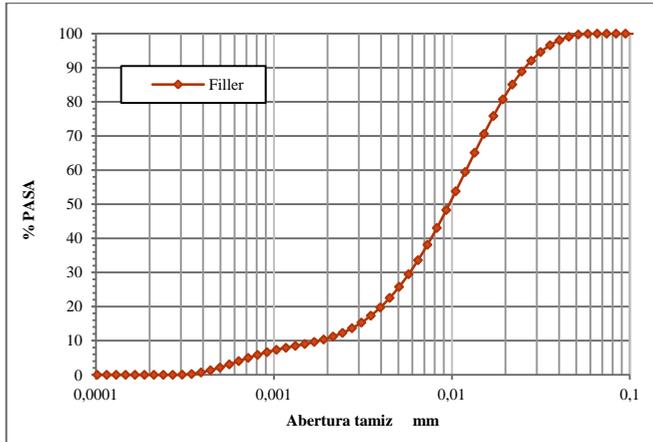


Figura 47 Gráfica de la granulometría del filler

3.6.3 Aditivos

En esta tesis se han utilizado dos tipos de aditivo superplastificante: uno específico para planta de hormigón prefabricado (Aditivo A) y otro de carácter general diseñado para hormigón preparado (Aditivo B). Las características de estos aditivos proporcionadas por el fabricante se reflejan en el Anexo A.

3.7 Fabricación del Hormigón.

El proceso de fabricación del hormigón autocompactante permitió entender mejor su comportamiento. Se partió de las recomendaciones de la literatura respecto a dosificaciones de hormigón, tanto tradicional como autocompactante para plantear y desarrollar un método de trabajo.

Para llegar a obtener las dosificaciones definitivas, se realizaron amasadas previas para hacer las correcciones necesarias de forma que se pudieran obtener las especificaciones de partida.

La mayor dificultad está en obtener el escurrimiento y las características de autocompactabilidad establecidas para el hormigón. El punto esencial en el que se ha trabajado para conseguirlo, ha sido primero garantizar la no segregación y luego escurrimiento mínimo. El hormigón puede segregar bien por una cantidad excesiva de agua para la

mezcla o bien por una proporción de aditivo mayor a la necesaria. Como un dato de partida es la relación a/c la cantidad de agua no se puede cambiar, y se ha trabajado disminuyendo la cantidad de aditivo y/o corrigiendo el contenido de filler dependiendo de cada caso. El método que se expone a continuación para fabricar el hormigón permite obtener buenos resultados optimizando el tiempo y los materiales añadidos.

Es importante señalar la necesidad de tener en cuenta el tipo y lugar de abastecimiento de los materiales, así como los equipos utilizados, el periodo del año en el que se trabaja, los tiempos necesarios para cada tarea y la compatibilidad de las tareas con las del resto de usuarios del laboratorio. Por ello para la fabricación del hormigón se ha seguido el proceso indicado en las tablas 13 a 15 del apartado 3.4.

Para fabricar el Hormigón, se buscó garantizar partiendo de una a/c fija, las características propias de un hormigón autocompactante escurrimiento entorno a los 600 y 700 mm, según el tipo de hormigón, evitar la segregación, garantizar la trabajabilidad del Hormigón y la reproducibilidad para su fabricación.

La amasadora empleada es una amasadora de eje vertical central que permite el giro de las palas y dos palas laterales fijas, con una capacidad máxima de 70 litros (figura 48). Esta amasadora es lo suficientemente energética para los componentes sin producir segregación y exudación.



Figura 48 Amasadora planetaria de 70 litros

Una vez se ha fabricado el hormigón se procede a la realización de los ensayos de caracterización del hormigón fresco y a la fabricación de las probetas para los ensayos de propiedades mecánicas y retracción.

El proceso y equipos para cada tipo de hormigón se indican las Figuras 14 y 15. Para cada uno de los ensayos relacionados en las figuras se ha definido su metodología en el apartado 3.9.



Figura 49 Equipos ensayos HCV fresco

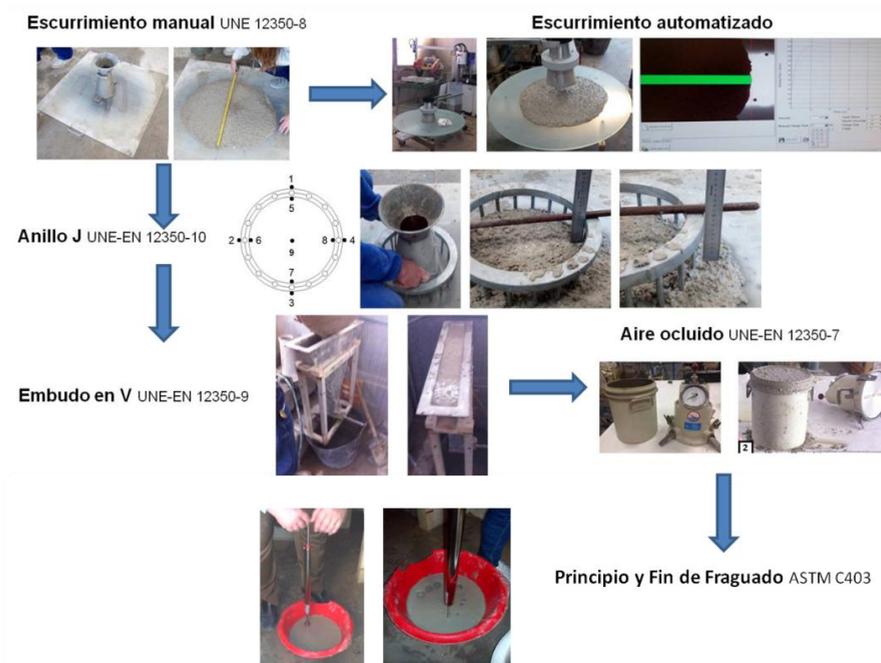


Figura 50 Proceso de ensayos HAC fresco

3.8 PROCEDIMIENTO DE AMASADO

El procedimiento de amasado de los hormigones autocompactantes es el mismo que se utiliza para los hormigones convencionales vibrados, siendo la única diferencia que el tiempo de homogeneización de los áridos fue mayor en los HAC debido a que en éste se añade filler calizo

3.8.1 Operaciones Previas

Independientemente del tipo de hormigón que fabrique, siempre se deben realizar las siguientes operaciones:

1. Determinación de la humedad
2. Corrección de las cantidades a verter en la hormigonera
3. Pesaje de los componentes con las tolerancias de la tabla 19

Tabla 19 Tolerancias peso componentes

MATERIAL	TOLERANCIA
Áridos, por separado	$\pm 0,5 \%$.
Filler	$\pm 0,2 \%$
Cemento	$\pm 0,2 \%$.
Aditivo	$\pm 0,1 \%$.
Agua	$\pm 0,5 \%$.

3.8.2 Amasado hormigón

El tiempo de amasado se inicia cuando se vierte por primera vez el agua de amasado

- Minuto 0: Homogenización de los áridos:
Adición grava, arena.
Adición filler calizo (Sólo para el HAC)
Amasado en seco: Adición del cemento.
- Minuto 1: Vertido 50% del agua (Vertido lento).
- Minuto 4: Vertido de aditivo (20HE, 3425), disuelto en un 10% de agua.
(Vertido lento).
- Minuto 5: adición del resto del agua.
- Minuto 8-12: Fin del amasado.

- 8 minutos para el caso de utilización de aditivo 20HE y 12 minutos para el caso de utilización de aditivo 3425.
- Inspección de la mezcla
- Se realiza el ensayo de consistencia (para el HCV) o el de escurrimiento (para el HAC).

Una vez amasado el hormigón correspondiente se procede a realizar los ensayos de hormigón fresco y a fabricar las probetas sobre las que se harán los ensayos de Resistencia a Compresión, Resistencia a Tracción Indirecta, Módulo de Deformación Estático y Retracción.

3.9 Ensayos sobre el Hormigón Fresco

3.9.1 Ensayo de escurrimiento

3.9.1.1 Objeto

Determinar el diámetro de escurrimiento y el tiempo T500 en hormigones autocompactantes para verificar la idoneidad de la dosificación utilizada

3.9.1.2 Procedimiento

Se aplica el establecido en la norma UNE EN 12350-8

3.9.1.3 Resultados

Para finalizar, hay que calcular el escurrimiento SF a partir de la media de los dos valores obtenidos, mediante la siguiente fórmula:

$$SF = \frac{d_1 - d_2}{2} \quad 3.2$$

donde:

- SF: el escurrimiento, en milímetros;
 - d_1 : diámetro mayor de escurrimiento, en mm;
 - d_2 : diámetro a 90° de d_1 , en mm.
-
- El tiempo t500 se expresa redondeado a los 0,5 segundos más próximos.



Figura 51 *Medición diámetros*

3.9.2 Ensayo de escurrimiento automatizado

3.9.2.1 Objeto

Mediante este ensayo se determina el escurrimiento, el tiempo T500 y los parámetros reológicos del hormigón fresco.

3.9.2.2 Material

Se utiliza el equipo Rheometer 4HC (ver figura 52) que permite mediante la adquisición de datos (escurrimiento y T500) aplicar un algoritmo que indica la tensión de corte μ y el coeficiente de viscosidad γ del HAC



Figura 52 *Equipo Rheometer 4C*

3.9.2.3 Procedimiento

El procedimiento a seguir para este ensayo es el siguiente:

1. Posicionar el cono hasta hacer tope con la base para evitar la pérdida de hormigón antes de empezar el ensayo
2. Verter el hormigón dentro del cono hasta llenarlo completamente de una sola vez (Figura 53a)
3. Antes de que transcurran 30 segundos, se aprieta el botón del programa para que comience el ensayo
4. En ese momento el cono empieza a elevarse a una velocidad establecida por la norma, el hormigón empieza a fluir por la base mientras que la cámara graba el movimiento, velocidad y distancia del flujo. (Figuras 53b y 54)



Figura 53 (a) *Vertido del hormigón* (b) *Ensayo*

5. Antes de que transcurran 30 segundos, se aprieta el botón del programa para que comience el ensayo
6. En ese momento el cono empieza a elevarse a una velocidad establecida por la norma, el hormigón empieza a fluir por la base mientras que la cámara graba el movimiento, velocidad y distancia del flujo. (Figuras 53b y 54)

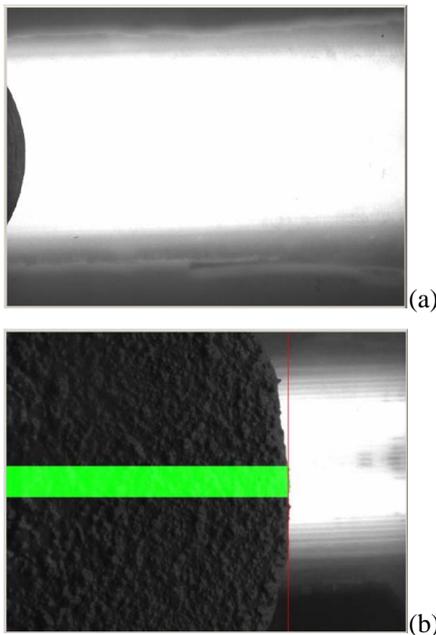


Figura 54 Pantalla evolución escurrimiento (a) Inicio (b) Final

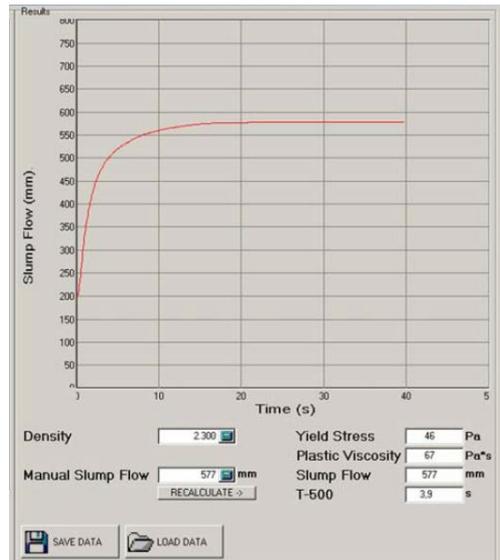


Figura 55 Gráfica de evolución del escurrimiento y Resultados

7. Una vez se ha estabilizado el flujo, se para la grabación y aparece en pantalla la evolución del escurrimiento en el tiempo (Figura 55)
8. También el programa del equipo a partir de los datos que obtiene, calcula los parámetros reológicos del hormigón fresco (Figura 55)

3.9.3 Determinación de inicio y final de fraguado

3.9.3.1 Objeto

Para determinar el inicio y final de fraguado del hormigón se utilizó el procedimiento marcado por la norma ASTM C 403-10, que es el mismo de la norma UNE 83311-86, pero desarrolla el método numérico y gráfico que permite determinar los tiempos de fraguado.

3.9.3.2 Equipo

El equipo utilizado es el siguiente:

- Recipiente de film de polietileno rígido

- Agujas de penetración (penetrómetro) con distintas áreas de contacto Tabla 20
- Aparato de aplicación de carga calibrado para la medición de fuerza (Figura 56).
- Pipeta para la extracción de agua de exudación.

Tabla 20 Dimensiones agujas

Diámetro (mm)	28,65	20,28	14,32	9,20	6,39	4,51
Área (mm²)	645	323	161	65	32	16



Figura 56 Penetrómetro y agujas para tiempos de fraguado

3.9.3.3 Procedimiento

El procedimiento seguido ha sido el siguiente:

- Preparación de la muestra y almacenamiento
 1. Tomar una muestra representativa de hormigón de volumen suficiente para proporcionar suficiente mortero para llenar el contenedor de prueba
 2. Tamizar el hormigón a través del tamiz de 5mm
 3. Mezclar la mortero a fondo y colocarlo en el recipiente en capas.
 4. Transportar a la cámara húmeda (20°C y 95% HR)
 5. Conservar las muestras en la cámara durante todo el ensayo
- Procedimiento de prueba
 1. Una vez se tiene la muestra de mortero, se remueve el agua de exudación de la superficie de mortero
 2. La penetración inicial se realiza después de 1-2 horas de la adición de agua a la mezcla.

3. Se inserta en el aparato de aplicación de carga una aguja de penetración de tamaño apropiado según el grado de endurecimiento del mortero (figura 56). Las agujas son de diámetro mayor al principio cuando la pasta todavía está fresca y se va reduciendo el diámetro de la aguja conforme la pasta comienza a endurecer.
6. En las siguientes penetraciones de agujas deben evitarse áreas donde el mortero haya sido alterado por ensayos previos
7. Se apoya la aguja sobre la superficie del mortero y se aplica una fuerza gradual y uniforme hacia abajo hasta que la aguja penetra en el mortero 25 mm (Figura 57)
8. Se registra la fuerza requerida para producir la penetración
9. Repetir este ciclo, como mínimo seis veces, hasta que la aguja de menor diámetro no penetre más de 25 mm.

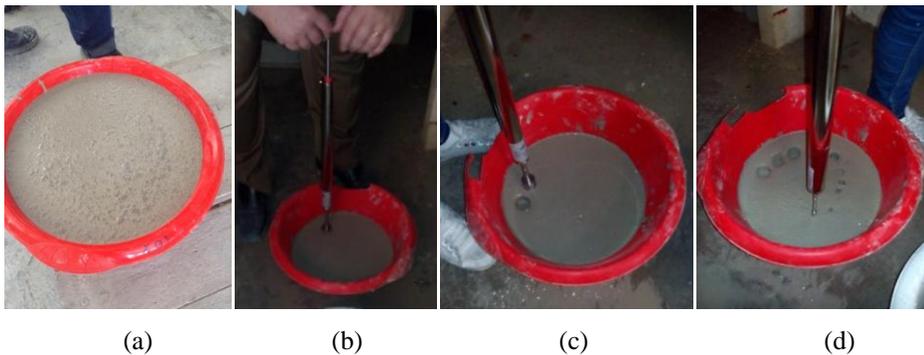


Figura 57 Ensayo de fraguado: (a) Mortero a ensayar (b) Inicio (c) Resultado primera penetración (d) Resultado última penetración

3.9.3.4 Resultados

1. Se calcula la resistencia a la penetración dividiendo la fuerza aplicada por el área de apoyo de la aguja:

$$RP = \frac{F}{A_{\text{aguja}}} \quad \text{MPa} \quad 3.3$$

2. Con el registro de datos se hace un análisis de regresión y se determina la ecuación de ajuste correspondiente.

3. Se calculan tiempos que corresponden a resistencias a la penetración de 3,5 MPa y 27,6 MPa
4. Se realiza una gráfica tiempo-resistencia y se determinan gráficamente los tiempos de PF y FF.

3.9.4 Ensayo aire ocluido.

3.9.4.1 Objeto

Determinar el porcentaje de aire ocluido en cada tipo de hormigón y para cada dosificación utilizada

3.9.4.2 Material

Se utiliza el equipo de la figura 58a

3.9.4.3 Procedimiento

Se sigue el procedimiento indicado en la norma UNE EN 12350-7.

1. Se vierte el hormigón en el recipiente de tal forma que se reduzca tanto como sea posible el aire atrapado.
2. Llenar en una o más capas para HCV y en una para HAC
3. Compactación manual o mecánica en HCV, mecánica en HAC,
4. Se enrasa y se limpia el borde
5. Se coloca la cubierta y se cierra herméticamente el conjunto.
6. se inyecta agua a través de la válvula A hasta que el agua salga por la válvula B.
7. Se cierra la válvula de purgador de aire de la cámara y se bombea aire en la misma hasta que la aguja del manómetro se sitúe en la línea de presión inicial.

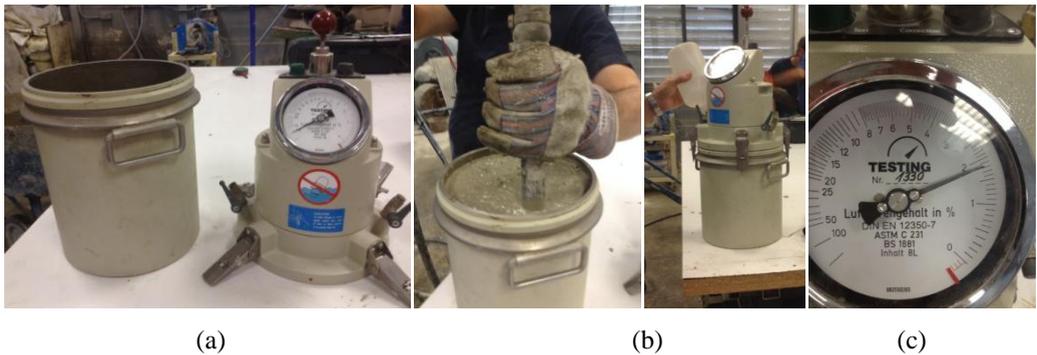


Figura 58 (a) *Equipo de ensayo* (b) *Proceso* (c) *Resultado*

3.9.4.4 Resultados

1. El porcentaje de aire ocluido aparece reflejado en la escala del aparato.
2. Se calcula el contenido de aire del hormigón en el recipiente, A_c , mediante la fórmula:

$$A_c = A_1 - G \quad 3.4$$

donde

A_1 = contenido de aire aparente de la muestra ensayada;

G = factor de corrección del árido. $G = 0$ para áridos de densidad normal.

3.10 ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO

3.10.1 Preparación probetas

Antes de la realización de los ensayos de compresión y de módulo de deformación es necesario asegurar la planeidad de las caras. Para ello se aplica la norma UNE EN 12390-3:2009

En esta tesis se han utilizado dos procedimientos de refrentado:

- Probetas de edad menor a 24 h: Refrentado con azufre (Figura 59b)
- Probetas de edad igual o mayor de 24 h: Refrentado por pulido (Figura 59c)

Aunque el método de refrentado de referencia es el de pulido de las probetas, para edades inferiores a 24 horas, la matriz cementante no ha adquirido suficiente resistencia para ser pulida, produciéndose pérdida de ésta o de árido grueso. Por ello y puesto que la norma UNE también permite el refrentado con azufre, se adoptó el criterio enunciado anteriormente.

Además, en el caso del ensayo del Módulo de deformación, debido a la influencia que sobre las deformaciones puede tener el no paralelismo de las cargas, se realizará por ambas caras

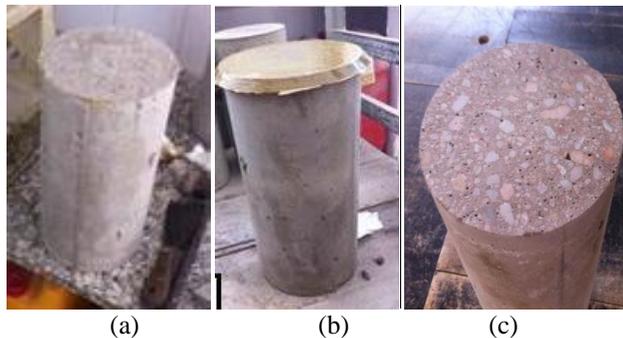


Figura 59 (a) Probeta sin refrentar, (b) Refrentada con azufre, (c) Refrentada pulida.

Antes de ensayar las diferentes probetas se mide la altura y el diámetro medio de todas ellas (medición de dos diámetros ortogonales en la zona media) mediante un pie de rey de precisión 0,02 mm. Además, se pesan las probetas para calcular la densidad del hormigón endurecido.

3.10.2 Ensayo de resistencia a compresión en probeta cilíndrica

El ensayo de resistencia a compresión se rige por la norma UNE-EN 12390-3. Para la realización del mismo se emplearon probetas cilíndricas de 150 x 300 mm.

3.10.2.1 Procedimiento

1. Desmoldado de las probetas de edad inferior a 24 horas en el momento de hacer el ensayo
2. Restantes probetas desmoldadas a las 24 horas
3. Curado de las probetas en cámara húmeda $20 \pm 1^\circ\text{C}$ hasta la edad de ensayo

4. Extracción de la cámara de curado
5. Refrentado
6. Colocación en prensa
7. Ensayo

Se introducen en el ordenador las dimensiones medias de la probeta, se coloca centrada en el dispositivo (figura 60) y se inicia el proceso de carga hasta rotura, a una velocidad de carga de 10 ± 2 MPa/s (10 ± 2 kg/cm²/s).

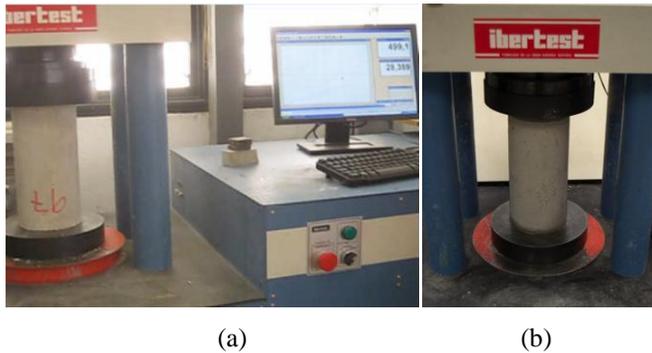


Figura 60 (a) *Equipo de ensayos mecánicos*, (b) *Probeta preparada para rotura*

3.10.2.2 Resultados

La resistencia a compresión viene dada por la ecuación:

$$f_{ci} = \frac{F}{A_c} \quad 3.5$$

dónde:

- f_{ci} Resistencia a compresión, en MPa (N/mm^2).
- F Carga máxima de rotura, en N
- A_c Área transversal de la probeta

Para determinar el valor de la resistencia de la amasada se determina la media de la resistencia de las probetas y además debe de comprobarse la validez del ensayos, aplicando que el recorrido relativo sea inferior al 13 % para ensayos de 3 probetas por amasada y 20% para más de 2.

3.10.3 Ensayo de resistencia a tracción indirecta

El ensayo de resistencia a tracción indirecta se rige por la norma UNE-EN 12390-6. Para la realización del mismo se emplearon probetas cilíndricas de 150 x 300 mm.

3.10.3.1 Procedimiento

1. Desmoldado de las probetas de edad inferior a 24 horas en el momento de hacer el ensayo
2. Restantes probetas desmoldadas a las 24 horas
3. Curado de las probetas en cámara húmeda $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ hasta la edad de ensayo
4. Extracción de la cámara de curado
5. Medición de la longitud de dos generatrices opuestas y dos diámetros ortogonales a media altura con un pie de rey de precisión 0,02 mm y se pesa la probeta en balanza de precisión de 0,1 g. Sobre la probeta se marcan los diámetros medidos, colocando la probeta en la prensa de tal forma que la tensión se ejerza en esta dirección.
6. Entre los platos de la prensa y la probeta se coloca el dispositivo de la figura 61. En el cual se han colocado bandas de tablero de fibras de densidad alta 900kg/m^3 , de 15 mm de anchura, 4 ± 1 mm de espesor y 320 mm de longitud. La fuerza se transmite de la prensa a la probeta a través de un dispositivo metálico que sirve para el perfecto centrado y alineamiento de la probeta.



Figura 61 *Dispositivo de ensayo a tracción indirecta*

3.10.3.2 Resultados

$$f_{cti} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad 3.6$$

donde:

- f_{cti} Resistencia indirecta, en MPa.
- F Carga máxima, en N.
- L Longitud de la línea de contacto de la probeta, en mm.
- d Dimensión de la sección transversal, en mm.

La determinación de la resistencia a tracción a partir de la obtenida en el ensayo se puede realizar con la fórmula, según EHE-08:

$$f_{ct} = 0,90 f_{cti} \quad 3.7$$

Sin embargo, el MC10 (FIB, 2013) indica que la resistencia a tracción indirecta por es igual a la resistencia a tracción.

3.10.4 Módulo de deformación

El ensayo de resistencia a tracción indirecta, sobre probeta cilíndrica, se rige por la norma ASTM C469/C469M. Para la realización del mismo se emplearon probetas cilíndricas de 150 x 300 mm y el equipo de medida de deformaciones (Figura 62a).

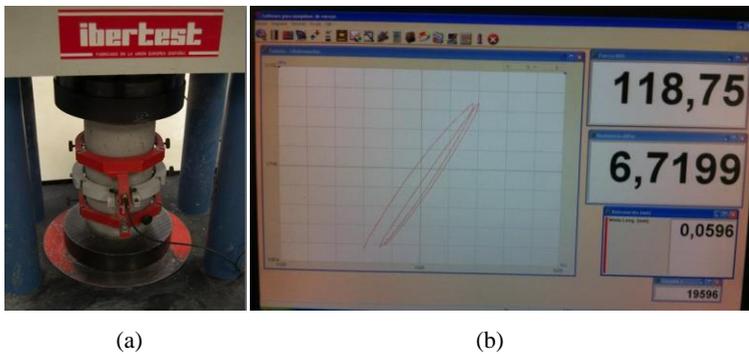


Figura 62 (a) Probeta con equipo adquisición de datos (b) Ejemplo de resultado del ensayo

3.10.4.1 Procedimiento

1. Se determina la resistencia media del hormigón en compresión
2. Se coloca la probeta dentro del equipo, formados por anillos que se acoplan a la probeta, en nuestro ensayo se utilizan los dos extremos que tienen una separación entre ellos de 15 cm, con dispositivos de medición de deformaciones

LVDT incorporados en los anillos, asegurándose de situarlos centrados a lo largo del alto de la probeta y fijándolos correctamente.

3. Se sitúa la probeta en la máquina de compresión lo más centrada posible entre las prensas.
4. Se calibra el dispositivo LVDT encargado de medir la deformación relativa entre los dos anillos y se pone en funcionamiento la máquina
5. Mediante el programa Wintest se registran las cargas y las deformaciones hasta llegar al 40% de la carga prevista.
6. Durante todo el proceso se registran los movimientos relativos proporcionados por el LVDT en el ordenador, ya que, al conocer la distancia entre los dos anillos y el movimiento relativo entre ellos, es posible describir perfectamente la evolución de la deformación durante el ensayo (Figura 62b).

3.10.4.2 Resultados

Calcular el módulo de elasticidad con una aproximación de 0,3 GPa (345 MPa) con la ecuación:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,5 \times 10^{-4}} \quad 3.8$$

donde:

E = módulo de elasticidad secante, MPa

S₂ = esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última MPa

S₁ = esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal, ε_1 , de 50×10^{-6} , en MPa

ε_2 = deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S₂, en μm

3.11 ENSAYOS DE RETRACCIÓN

Los ensayos de retracción se realizaron sobre ocho probetas prismáticas de 100×100×400 mm. Los parámetros estudiados fueron:

- Retracción autógena a edad temprana
- Retracción autógena y total hasta 28 días
- Pérdida peso hasta 28 días

- Retracción por secado desde 48 horas hasta 28 días

De las ocho probetas, dos se utilizaron para las dos determinaciones primeras, cuatro se utilizaron sólo para la segunda determinación y las dos restantes para la tercera determinación.

3.11.1 Ensayo de retracción autógena a edad temprana

3.11.1.1 Objeto

En la primera parte del ensayo se va a estudiar la retracción del hormigón en las primeras horas de vida utilizando dos probetas selladas con varias capas de película plástica para evitar la pérdida de humedad.

3.11.1.2 Procedimiento de fabricación de las probetas

Para la realización de este ensayo se utilizaron 2 probetas prismáticas de 100x100x400 mm para cada dosificación

1. Se monta el molde colocando una lámina de poliestireno (cartón pluma) de dimensiones iguales al fondo del molde, 100x400 mm, de esta forma se independiza la probeta del fondo del molde.
2. Se coloca una lámina de polietileno que recubre todas las paredes del molde, incluso el fondo con el fin de que las probetas queden aisladas e impermeables. Esta lámina debe permitir recubrir la superficie libre de la muestra. (Figura 63).
3. Se vierte el hormigón cuidadosamente y se tapan con el film de polietileno sobrante de los moldes para evitar la pérdida de humedad durante el fraguado del hormigón (figura 64)
4. Se transportan a la cámara de curado húmedo hasta el momento de desmoldado
5. Una vez transcurridas 8 horas se desmoldan las probetas asegurándose que el film de polietileno sigue cubriéndolas completamente hasta dejarlas impermeables



Figura 63 Preparación de los moldes en el ensayo de retracción



Figura 64 Probetas retracción autógena

3.11.1.3 Procedimiento de ensayo

1. Se utilizan cuatro transductores LVDT, dos en cada probeta y situados en las caras opuestas de la probeta, atestándolo contra la superficie de ésta tal y como se observa en las Figuras 65a y 66. Los transductores han de mantenerse en una posición fija durante todo el ensayo ya que cualquier pequeño movimiento podría causar resultados erróneos.
2. Los transductores están conectados a un equipo de adquisición de datos, LOGGR GL220 de la marca GRAPHTEC (Figuras 65b), que irá haciendo lecturas cada minuto hasta la finalización del ensayo y que posteriormente serán tratadas para obtener la gráfica tiempo-deformación. En esta investigación el período estudiado fue desde las 8 horas posteriores al hormigonado hasta la edad de 2 días.



(a)

(b)

Figura 65 (a) *Transductores LVDT* (b) *Equipo de adquisición de datos*



(a)

(b)

Figura 66 (a) *Disposición de los transductores LVDT* (b) *Disposición final del equipamiento*

3.11.2 Ensayo de retracción autógena y total

3.11.2.1 Objeto

Determinar la evolución de la retracción transcurridas las 48 horas iniciales, sobre seis probetas que se preparan de acuerdo con lo indicado a continuación.

3.11.2.2 Preparación de las probetas para el ensayo

Las probetas utilizadas para este ensayo fueron las siguientes:

- Probetas procedentes de la retracción autógena a edad temprana
 - Probeta 1ª: Se mantiene el sellado inicial
 - Probeta 2ª: Se elimina el sellado inicial

- Probetas procedentes de la cámara de curado húmedo
 1. Se desmoldan y se transportan a la cámara de curado al 50% de humedad
 2. Se numeran las probetas del 1 al 6, siendo las probetas 1 y 3 las utilizadas en la primera parte del ensayo que han sido selladas desde el momento de su fabricación.
 3. La probeta número 1 se envuelve con más film de polietileno para asegurarse de que quede totalmente impermeable
 4. La probeta número 2 se envuelve con film de polietileno para asegurarse de que quede totalmente impermeable
 5. A la probeta número 3 se le quita totalmente el film de polietileno que la envolvía y se deja sin sellar
 6. Las probetas 4,5 y 6 no se sellan por lo que ya están preparadas para el ensayo.

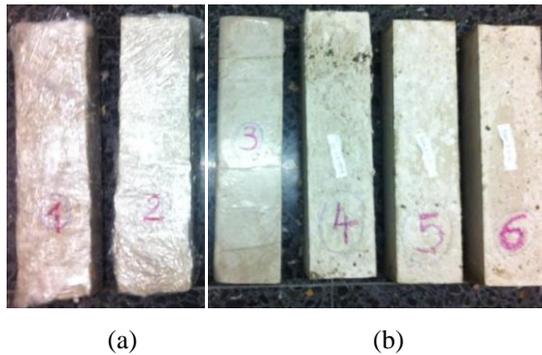


Figura 67 Preparación de probetas para el ensayo de retracción.
(a) Retracción autógena (b) Retracción total

7. Una vez se han dejado listas las probetas, a cada una de ellas se le atesta un comparador colocando la probeta verticalmente y asegurándose que la aguja esté en contacto con la superficie del hormigón y se anota su lectura inicial, tal y como se observa en la Figura 68a.

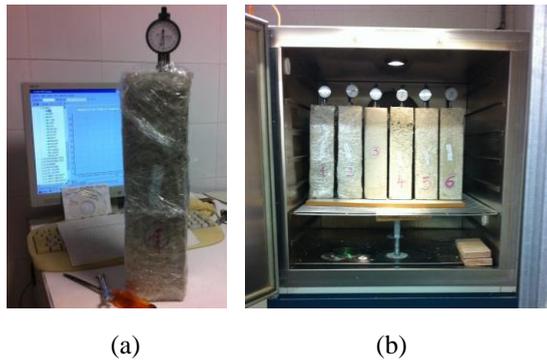


Figura 68 (a) Colocación del comparador (b) Colocación de las probetas en la cámara

8. Se colocan las probetas al interior de la cámara, situándolas una al lado de otra con los comparadores de cara de forma que se puedan leer los resultados una vez se cierre la puerta de la cámara sin necesidad de abrir la puerta (Figura 68b).

3.11.2.3 Procedimiento

1. Se llevan las probetas al interior de la cámara, colocándolas una al lado de la otra con los comparadores de cara de forma que se puedan leer los resultados una vez se cierre la puerta de la cámara sin necesidad de abrirla (Figura 68b y 69a).

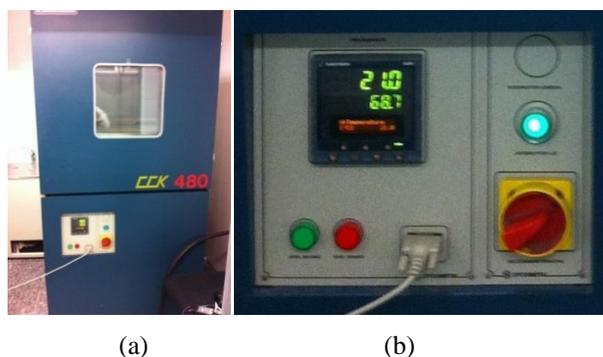


Figura 69 (a) Cámara (b) Control de humedad y temperatura

2. Se fija una humedad y una temperatura para la cámara (Figura 68b) donde permanecerán las probetas 28 días. Se recogerán los resultados de las lectu-

ras de cada comparador diariamente, así como la temperatura y humedad de la cámara que, aunque debe de ser constante, podría haber alguna modificación.

3.11.3 Pérdida de peso

Para la realización de este ensayo se utilizaron 2 probetas prismáticas de 100x100x400 mm. El procedimiento seguido ha sido el siguiente:

1. Se realiza la amasada de hormigón y se rellenan los moldes prismáticos de dimensiones 100x100x400 mm
2. Se tapan los moldes con un film de polietileno y se colocan en la cámara de curado a 20°C y 95-100% HR
3. Transcurridas 24 horas desde la amasada, se desmoldan las probetas y se almacenan en la cámara de curado (figura 70)



Figura 70 Cámara de curado 20°C y 50% Humedad (a) Exterior (b) Interior

4. Antes de introducirlas se pesan las dos probetas (Figura 71) en una balanza con una precisión de $\pm 0,1g$. Es importante que las probetas se pesen siempre en la misma báscula para ser más exactos en el resultado.
5. Una vez se pesan, se transportan de nuevo a la cámara dónde permanecen hasta la siguiente pesada



Figura 71 Pesadas del ensayo de pérdida de peso

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en diferentes ensayos propuestos, para evaluar las propiedades mecánicas a edades tempranas de los hormigones planteados en los capítulos anteriores. De igual manera se analiza los datos de las diferentes propiedades del hormigón en estado fresco, y las propiedades reológicas de cada HAC.

Se muestra los resultados de cinco tipos de ensayos realizados con 7 tipos de hormigones. Los hormigones han sido dosificados según su consistencia, fluida de cono 10 cm para los HCV y diámetro de escurrimiento de 600 y 700 mm para los HAC. La dosificación de los áridos se indica en el capítulo 3.

En las figuras que se presentan en este capítulo se utiliza la codificación de colores de la Tabla 21:

Tabla 21 Codificación de los hormigones utilizados

HORMIGÓN	LINEA	MARCADOR
AC20A60		
AC20A70		
CV20A		
AC12A70		
CV12A		
AC12B70		
CV12B		

4.2 Caracterización del hormigón en estado fresco

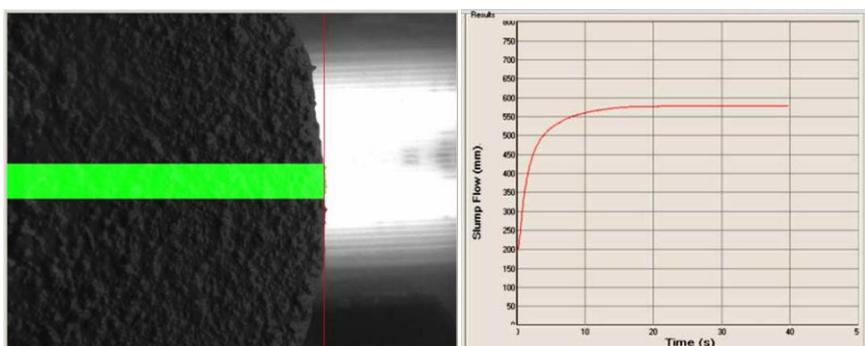
4.2.1 Comportamiento reológico del hormigón en estado fresco

En la Tabla 22 se puede observar la media de los resultados obtenidos en los distintos ensayos para evaluar las propiedades reológicas del hormigón.

Tabla 22. Resultados de los ensayos del hormigón en estado fresco.

ENSAYOS		AC20A60	AC20A70	CV20A	AC12A70	CV12A	AC12B70	CV12B
Escurecimiento								
SF	(mm)	640	730	-	740	-	700	-
SF _{reómetro}	(mm)	610	748	-	769	-	700	-
T500	(s)	2,6	3,3	-	3	-	5,4	-
Embudo en V T _v	(s)	16	16	-	16	-	17	-
Escurecimiento anillo japonés								
SF _J	(mm)	635	730	-	738	-	690	-
T _{J500}	(s)	3,2	3,2	-	3,2	-	4	-
Asiento A	cm		-	9	-	9	-	10
% Aire ocluido	%	1,7	1,7	2,6	1,7	2,6	-	2,8

El dispositivo utilizado en la fase experimental, 4C-Rheometer, controla por ordenador el ensayo de escurecimiento y calcula y representa el avance (mm) del hormigón para cada intervalo de tiempo (segundos) durante el desarrollo del ensayo (Figura 72).

**Figura 72** Interface del 4C-Rheometer

En la tabla 23 se recogen los parámetros reológicos medios obtenidos de las 4 dosificaciones analizadas con el dispositivo 4C-Rheometer.

Tabla 23. Propiedades reológicas con el reómetro

HORMIGÓN	VISCOSIDAD μ (Pa·s)	TENSIÓN DE CORTE τ (Pa)	ESCURRIMIENTO SF (mm)	T500 (s)
AC20A60	20	11,8	610	2,6
AC20A70	18	18,1	748	3,3
AC12A70	9,5	11	769	3
AC12B70	14,7	17	700	5,4

Varios autores (Nielsson & Wallewik, 2003), (Zerbino, et al., 2006), (Thrane, et al., 2010) y (Benito, 2014) han establecido zonas de buena autocompactabilidad, que se han graficado en la figura 73. Las diferencias entre las zonas consideradas son función del reómetro utilizado, que en nuestro caso es el 4C Rheometer que es el utilizado por Thrane et al. y por Benito

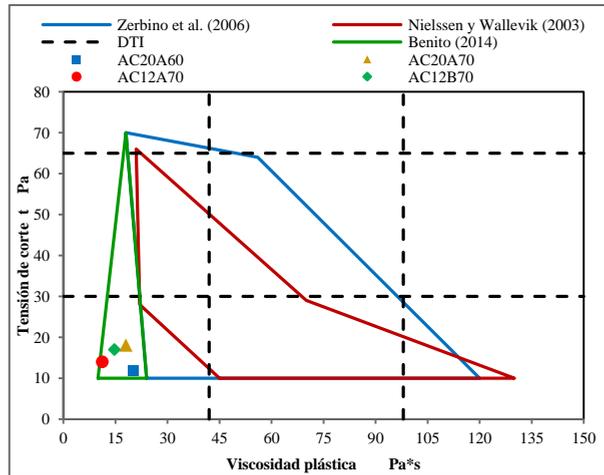


Figura 73. Comportamiento de los HAC ensayados

De los resultados obtenidos (Tabla 23 y Figura 73) se deduce que los HAC ensayados presentan desde el punto de vista reológico una viscosidad y una tensión de corte bajas y aunque podrían presentar riesgo de segregación, ésta no se ha producido (Figura 74). Los valores de tensión de corte son mayores de 10 Pa y su T500 está dentro de los valores admisibles especificados por algunos autores, como Benito (Benito, 2014).



Figura 74 Ecurrimiento hormigones AC20A60 y AC12A70

4.2.2 Tiempo de fraguado del hormigón

Una vez determinado el ensayo de penetración para fijar los valores de resistencia en diferentes periodos de tiempo, se procede a graficar los datos. Posteriormente, se hace un análisis y se obtienen las curvas de regresión para poder determinar los tiempos de principio y final del fraguado del hormigón. Los resultados se muestran en la tabla 24 y en las figuras 75 y 76

Tabla 24. Datos finales del principio y final de fraguado

RESISTENCIA PENETRACIÓN (MPa)	Fraguado	HORMIGÓN						
		AC20A60	AC20A70	CV20A	AC12A70	CV12A	AC12B70	CV12B
3,5	Principio PF min	224	202	262	209	218	264	282
27,6	Final FF min	336	308	346	322	337	353	369

En la figura 75 se puede apreciar que la variación del escurrimiento en los HAC tiene una influencia apreciable en los tiempos de fraguado. Ello se debe a que se utiliza mayor cantidad de aditivo, que ha permitido una mayor dispersión de las partículas de cemento y, en consecuencia, un incremento de la velocidad de reacción. También se aprecia la influencia del filler, ya que los HAC presentan tiempos de fraguado menores que los HCV, lo que confirma la acción de nucleación que tienen los finos, acelerando la hidratación del cemento a edades tempranas.

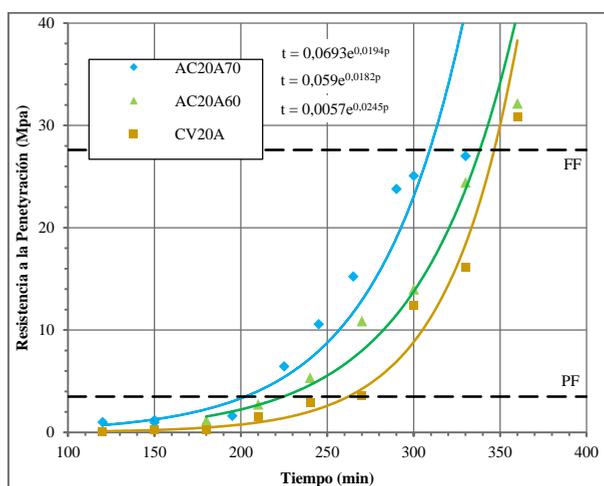


Figura 75 Determinación gráfica del PF y FF de los hormigones de tamaño máximo 20 mm

La utilización de un aditivo diferente para las mismas especificaciones tiene una influencia importante sobre los tiempos de fraguado (figura 76). Con respecto a la acción del filler también se aprecia nuevamente que su ausencia retrasa los tiempos de fraguado, independientemente del tipo de aditivo que se utilice.

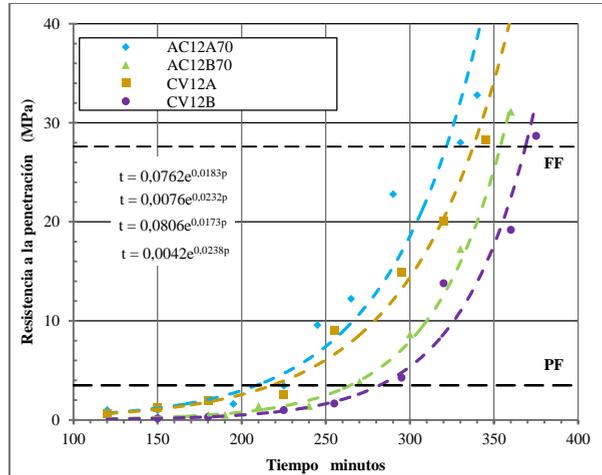


Figura 76. Determinación gráfica del PF y FF de los hormigones de tamaño máximo 12,5.

4.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades se han determinado a las edades de 8, 10, 12, 24 y 48 horas y a las de 7 y 28 días. Los resultados obtenidos se comparan con los modelos de los códigos de evolución de la resistencia indicados en la tabla 4 del apartado 2.5.1 de esta tesis (EHE-08, EC-2, MC-10 y ACI 209.2R).

Los resultados medios a la edad de 28 días están recogidos en la tabla 25 para cada uno de los tipos de hormigón estudiados.

Tabla 25 Resistencias y módulo de deformación de los hormigones estudiados

TIPO DE HORMIGÓN	$f_{cm(28)}$ (MPa)	$E_{cm(28)}$ (GPa)	$f_{cm(28)}$ (MPa)
AC20A60	33,28	29,37	2,90
AC20A70	38,70	29,43	2,56
CV20A	28,94	28,32	3,11
AC12A70	48,95	32,29	3,61
CV12A	39,51	31,38	2,73
AC12B70	41,59	30,21	3,58
CV12B	36,33	29,59	2,36

4.3.1 Resistencia a compresión

4.3.1.1 Relación entre hormigones autocompactantes y hormigón convencional

La evolución de la resistencia a compresión en los hormigones estudiados sigue un patrón muy similar en todos ellos. Este desarrollo presenta tres zonas diferenciadas. Una correspondiente a las primeras 48 horas (edades muy tempranas y tempranas), un período intermedio correspondiente a las edades entre 48 horas y 7 días (168 horas) donde la resistencia aumenta pero a menor velocidad y finalmente el período comprendido entre los 7 días y los 28 días (672 horas) en los que la cinética disminuye considerablemente. Este comportamiento está además acentuado debido a que en la fabricación de los hormigones se han utilizado cementos de alta resistencia inicial.

a) Influencia de la fluidez

Por lo que respecta a la influencia de la fluidez en los hormigones autocompactantes, si se comparan entre sí los hormigones AC20A60 y AC20A70, fabricados con un tamaño máximo de árido de 20 mm, se observa que a edades muy tempranas el efecto de tener un escurrimiento diferente no tiene una influencia significativa sobre la resistencia, siendo además el tiempo final de fraguado similar en ambos hormigones (Tabla 24). No obstante, a partir de las 12 horas (edades tempranas) es cuando se puede apreciar claramente la influencia del escurrimiento. Cuando éste es mayor (70 cm) la resistencia aumenta manteniéndose por encima del hormigón de menos escurrimiento (60 cm). Este hecho puede ser debido al mayor contenido en superfluidificante del hormigón

AC20A70, que permite una mayor dispersión de las partículas de cemento y, en consecuencia, una mejor hidratación de las mismas.

Comparando estos resultados con los del hormigón convencional de similar dosificación (hormigón CV20A), también se aprecia que en todos los casos y a todas las edades se alcanza una mayor resistencia a compresión en los hormigones autocompactantes (Tabla 26 y Figura 77). Estas diferencias son especialmente grandes durante las primeras horas (hasta del orden del 46,3 % a las 10 horas de la fabricación del hormigón), si bien tienden a reducirse con el paso del tiempo. Las razones para estas diferencias de comportamiento se encuentran en:

1. Los HAC tienen en su composición filler calizo que actúa como elemento de nucleación en el proceso de hidratación lo que produce una mejor hidratación del cemento.
2. Aunque el volumen de áridos es el mismo para cada dosificación, la presencia de mayor cantidad de finos (HAC: filler+finos de las arenas; HCV: finos de las arenas) hace que los HAC fluyan con más facilidad y se compacten más que los HCV (estructura más densa y compacta).
3. La cantidad de aditivo también influye en esta diferenciación ya que a menor cantidad de aditivo, la resistencia es menor. Esto se debe a que el efecto estérico del aditivo es más acusado a igual cantidad de cemento, el hormigón fluye y se autocompacta más.

Tabla 26 Diferencia en porcentaje entre las resistencias de los HAC y el CV

Edad	AC20A60 fcm(t)	CV20A fcm(t)	Diferencia %	AC20A70 fcm(t)	CV20A fcm(t)	Diferencia %
8h	4,00	2,62	34,50	3,84	2,62	31,77
10h	6,07	3,29	45,80	6,13	3,29	46,334
12h	7,71	5,17	32,94	7,11	5,17	27,29
24h	13,02	11,82	9,22	17,35	11,82	31,87
48h	18,53	16,52	10,85	22,97	16,52	28,08
7d	27,29	24,75	16,69	31,26	24,75	20,83
28d	33,63	29,46	11,48	37,73	29,46	21,92

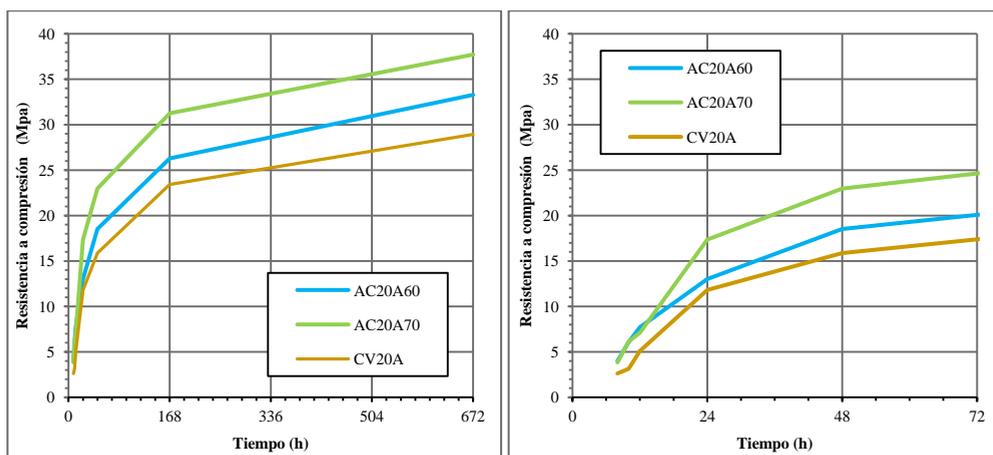


Figura 77 Evolución de los hormigones de tamaño máximo 20 mm con la edad

Estas diferencias entre HAC y HCV también se producen en los hormigones fabricados con un tamaño máximo de árido de 12,5 mm (Tabla 27 y Figura 78). Aunque las diferencias son en este caso algo menores (como máximo del 31,0 % a la edad de 12 horas), el comportamiento es similar al descrito anteriormente para los hormigones fabricados con un tamaño máximo de árido de 20 mm.

Tabla 27 Diferencias existentes entre las resistencias de los hormigones estudiadas

Edad	AC12A70 $f_{cm}(t)$	CV12A $f_{cm}(t)$	DIFERENCIA %	AC12B70 $f_{cm}(t)$	CV12B $f_{cm}(t)$	DIFERENCIA %
8h	8,27	7,53	8,95	3,61	3,69	-2,22
10h	11,7	9,74	16,75	6,36	5,03	20,91
12h	14,75	12,16	17,56	9,44	6,51	31,04
24h	27,98	21,26	24,02	20,96	18,28	12,79
48h	35,28	28,19	20,10	28,08	25,4	9,54
7d	43,52	33,85	22,22	39,49	28,67	27,40
28d	48,95	39,51	19,28	41,59	36,33	12,65

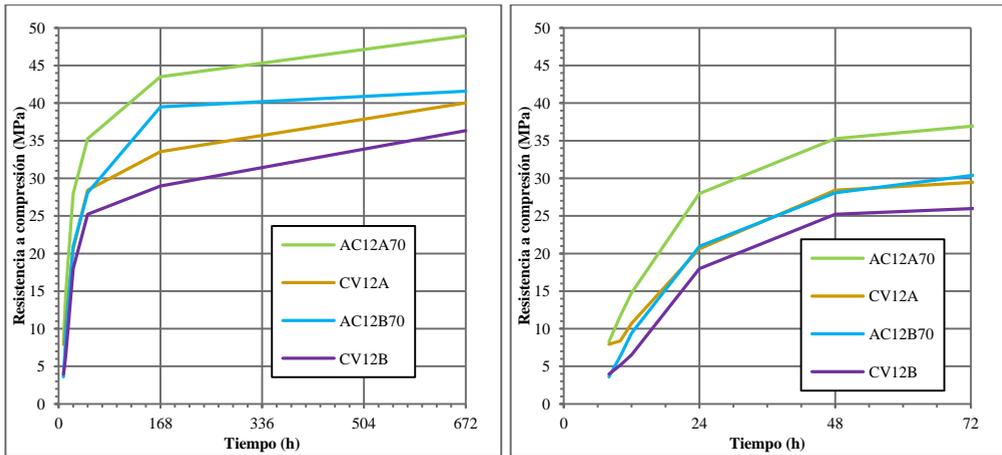


Figura 78 Evolución de los hormigones de tamaño máximo 12,5mm con la edad

b) Influencia de la dosificación

Si se comparan entre si los hormigones autocompactantes de igual escurrimiento e igual relación a/c pero distinta dosificación (AC20A70 versus AC12A70), claramente se comprueba que, como era de esperar, el utilizar un mayor contenido de cemento y de más categoría resistente da lugar a hormigones de mayor resistencia. Este fenómeno se da igualmente en el caso de los hormigones convencionales (CV20A versus CV12A y CV12B).

Además, como también es sabido, si la concentración volumétrica del árido y la relación a/c se mantienen constantes, el incremento del tamaño máximo del árido se puede traducir en una merma de la resistencia a compresión del hormigón, debido a una menor área adherente entre la pasta y el árido (mayores tensiones en la interfaz) y a la discontinuidad ocasionada por las partículas más grandes (mayor heterogeneidad de la mezcla).

En definitiva, la utilización de un mayor contenido de cemento de mayor clase resistente y de un tamaño máximo de árido más pequeño da lugar a hormigones más resistentes, tanto en el caso de los hormigones autocompactantes como en el de los convencionales.

c) Influencia del tipo de aditivo

La influencia del tipo de aditivo sobre el desarrollo de la resistencia es importante puesto que el AC12B70 experimenta una disminución media con respecto al AC12A70 de 5,8 MPa. Esto se debe a la diferente formulación de los aditivos ya que aun siendo am-

bos ésteres policarboxílicos, en el Viscocrete 20HE el tamaño de las cadenas laterales es mayor. Por otra parte el Viscocrete 3425 presenta una mayor resistencia a la hidrólisis por lo que el proceso de endurecimiento es más lento. Además este aditivo tiene un tiempo abierto mayor que el Viscocrete 20HE, lo que permite mantener la trabajabilidad más tiempo y el fraguado se inicia más tarde.

4.3.1.2 Evolución de la resistencia de los hormigones autocompactantes y hormigones convencionales

En la tabla 28 se reflejan los valores que adoptan los coeficientes de los modelos EHE-08, EC-2, MC-10 y ACI 209.2R

Tabla 28 Coeficientes de los modelos EHE-08, EC-2, MC-10, y ACI 209.2R

Modelo	Horas	0	2	4	6	8	10	12	24	48	168	672
	Días	0	0,08	0,17	0,25	0,33	0,42	0,5	1	2	7	28
EHE-08	$\beta_{ec}(t)$	0	0,03	0,09	0,15	0,2	0,24	0,27	0,42	0,58	0,82	1
ACI 209.2R	$t/(a+b \cdot t)$	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,11	0,21	0,35	0,71	1,03

Adoptando: $s = 0,2$ para el modelo EHE-08 y $a=4, b=0,83$ para el modelo ACI 209.2R

a) Evolución de los hormigones de tamaño máximo de árido 20 mm

La evolución de la resistencia relativa, $f_{cm}(t)/f_{cm28}$, de ambos tipos de hormigones se muestra en la Tabla 29 y en la Figura 79.

Tabla 29 Resultados medios de la resistencia a compresión y relación $f_{cm}(t)/f_{cm28}$

Edad	AC20A60		AC20A70		CV20A	
	$f_{cm}(t)$	$f_{cm}(t)/f_{cm28}$	$f_{cm}(t)$	$f_{cm}(t)/f_{cm28}$	$f_{cm}(t)$	$f_{cm}(t)/f_{cm28}$
8h	4,00	0,12	3,84	0,10	2,62	0,07
10h	6,07	0,18	6,13	0,16	3,29	0,11
12h	7,71	0,23	7,11	0,19	5,17	0,18
24h	13,02	0,39	17,35	0,46	11,82	0,41
48h	18,53	0,56	22,97	0,61	16,52	0,55
7d	27,29	0,81	31,26	0,83	24,75	0,81
28d	33,63	1,00	37,73	1,00	29,46	1,00

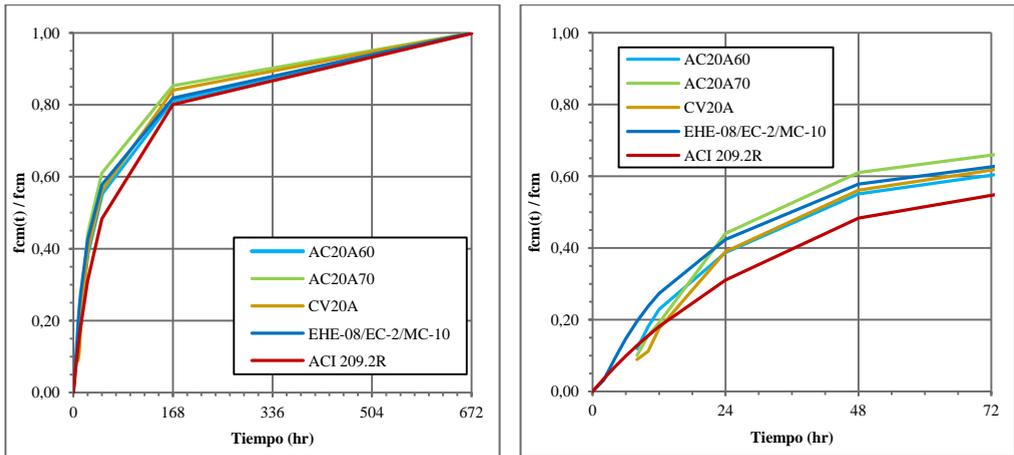


Figura 79. Evolución resistencia relativa a los 28 días y a edades iniciales

En la Figura 79, 80 y 81 se observa la evolución de la resistencia de los tres tipos de hormigón utilizados, comparada con los modelos definidos en el Capítulo 2 (EHE-08, EC-2, MC-10, ACI 209.2R).

Si se comparan los tres hormigones entre sí se puede comprobar que la evolución de la resistencia es sensiblemente igual, no existiendo diferencias importantes entre ellos.

La evolución de la resistencia comparada con los modelos EHE-08, EC-2, MC-10, y ACI 209.2R muestra importantes diferencias entre uno y otro. En el primer caso para todos los hormigones y a edades muy tempranas los valores son inferiores al modelo debido a la no consideración del tiempo de final de fraguado como punto de inicio del modelo. En general, esta circunstancia se mantiene hasta los 7 días. A partir de esa edad los hormigones convencionales presentan un comportamiento similar al previsto por los modelos EHE-08, EC-2, MC-10, si bien, en el caso de los HAC el ajuste es menor debido a la mayor resistencia a compresión que tienden a registrar los HAC.

Con respecto al modelo ACI 209.2R, este es más conservador para cualquier edad, pero es a edades tempranas (> 12 horas) y hasta los 7 días cuando la previsión subestima más la resistencia. A edades muy tempranas (≤ 12 horas), al igual que sucedía con los modelos EHE-08, EC-2, MC-10, los valores están muy condicionados porque el modelo ACI 209.2R tampoco considera el tiempo de final de fraguado como punto de partida. En este caso, es muy importante la elección adecuada de los coeficientes a y b que aparecen

en la ecuación del modelo de resistencia a compresión del ACI 209.2R (Tabla 4 del apartado 2.5.1), ya que el cemento equivalente a los utilizados en esta tesis, sería el cemento Tipo III ASTM y no el tipo I ASTM. En la tabla 5 se recogen los valores recomendados para estas constante.

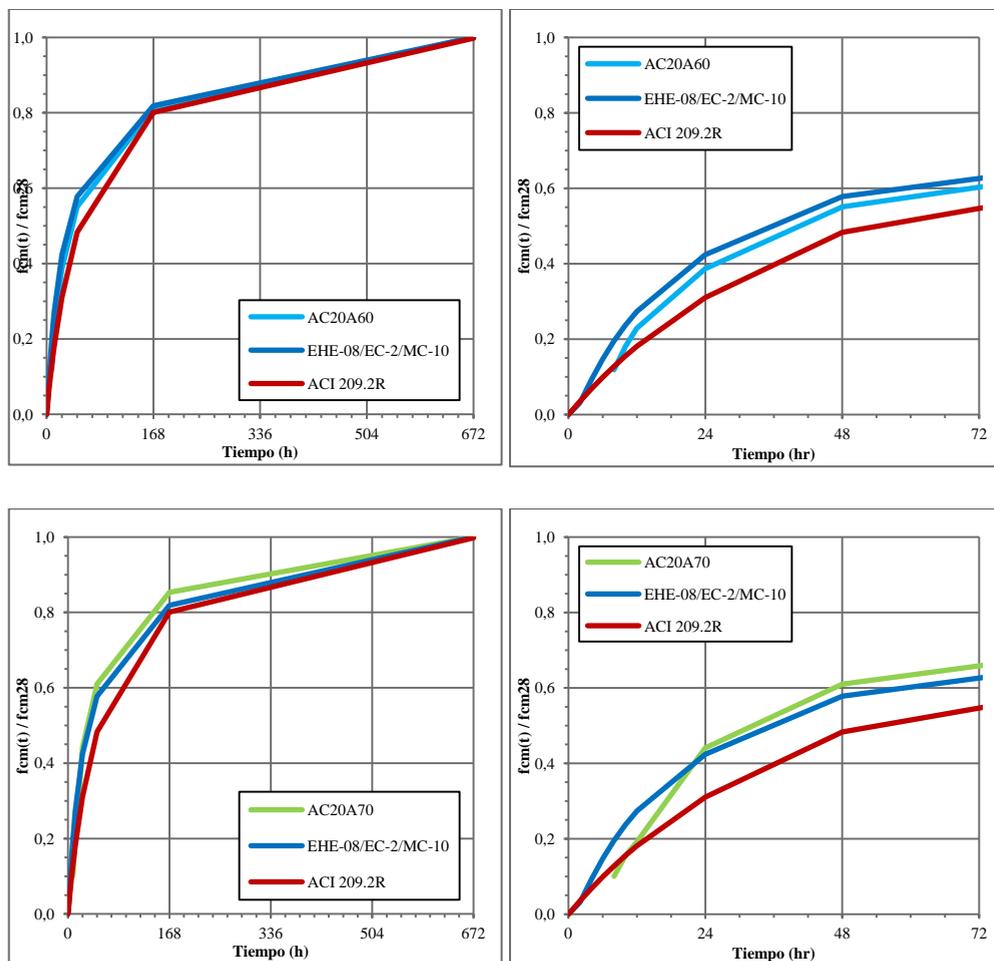


Figura 80 Evolución de la resistencia de los hormigones AC20A60 y AC20A70 comparada con los modelos.

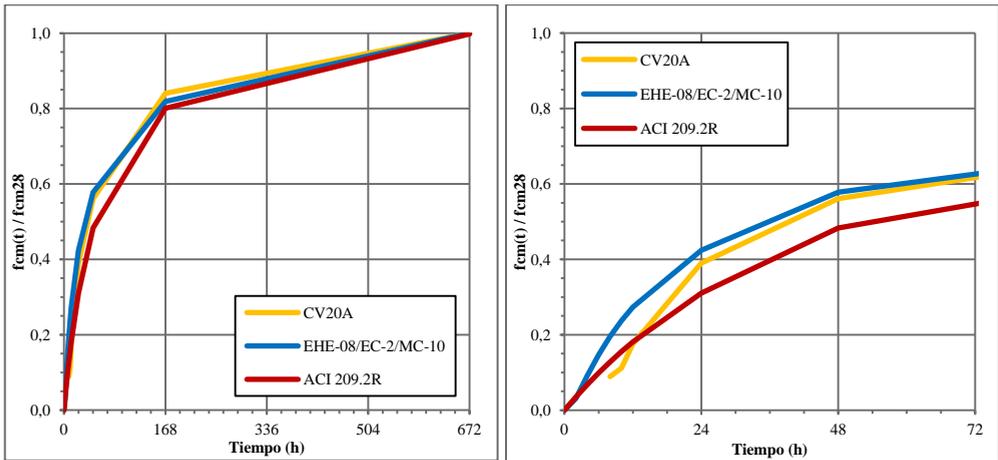


Figura 81. Evolución de la resistencia del hormigón CV20A comparada con los modelos

En las figuras anteriores, se distingue con detalle la evolución del hormigón a edades menores a 72 horas. Se comprueba que los códigos EHE-08, EC-2, MC-10 y ACI-209.2R subestiman las resistencia a estas edades

En la figura 82, se muestra una visión comparada de la Evolución de la resistencia respecto al tiempo.

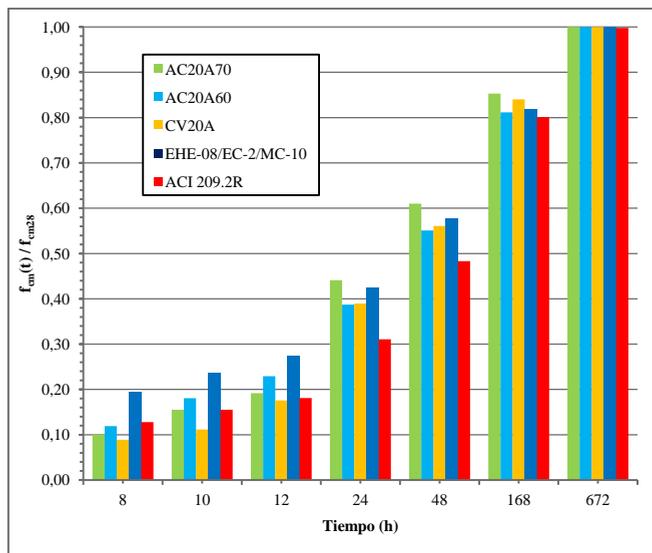


Figura 82. Histograma de la Evolución de la resistencia a compresión

b) Evolución de los hormigones de tamaño máximo 12,5 mm

Para los hormigones de tamaño máximo 12,5 la evolución de la resistencia relativa, $f_{cm}(t)/f_{cm28}$, de los 4 tipos de hormigones se muestra en la tabla 30 y en la figura 83

Tabla 30. Resultados medios de la resistencia compresión $f_{cm}(t)$ y relación $f_{cm}(t)/f_{cm28}$

Edad	AC12A70		CV12A		AC12B70		CV12B	
	$f_{cm}(t)$	$f_{cm}(t)/f_{cm28}$	$f_{cm}(t)$	$f_{cm}(t)/f_{cm28}$	$f_{cm}(t)$	$f_{cm}(t)/f_{cm28}$	$f_{cm}(t)$	$f_{cm}(t)/f_{cm28}$
8h	8,27	0,17	7,53	0,19	3,61	0,09	3,69	0,10
10h	11,70	0,24	9,20	0,23	6,36	0,15	5,03	0,14
12h	14,75	0,30	12,16	0,31	9,44	0,23	6,51	0,18
24h	27,98	0,57	21,26	0,54	20,96	0,50	18,28	0,50
48h	35,28	0,72	28,19	0,71	28,08	0,68	25,40	0,70
7d	43,52	0,89	33,85	0,86	39,49	0,95	28,67	0,79
28d	48,95	1,00	39,51	1,00	41,59	1,00	36,33	1,00

$f_c(t)$: resistencia experimental respecto al tiempo (MPa)

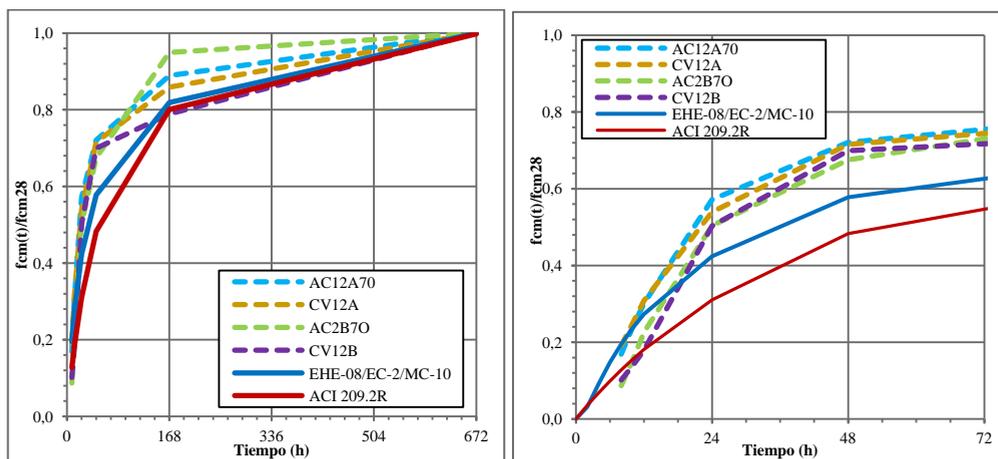


Figura 83. Evolución resistencia relativa a 28 días y a edades tempranas

En este caso la evolución de los hormigones es de características similares a las observadas para los hormigones de tamaño máximo 20 de igual escurrimiento. Sin embargo, para todos los casos se muestra que los modelos subestiman la resistencia, lo que indica que los factores clase del cemento (resistencia), contenido y tamaño máximo de árido tienen una influencia importante en los resultados de los modelos, que en el caso de los modelos EHE-08, EC-2, MC-10, está considerada por el coeficiente s y en el modelo ACI 209.2R por los coeficientes a y b .

En las figuras 84 y 85, se muestra la evolución de la resistencia de los 4 tipos de hormigones en base a su propia resistencia a 28 días. Así mismo se han representado los modelos de los códigos (EHE-08, EC-2, MC-10, ACI 209.2R), logrando así mostrar su crecimiento para poder compararlos con los resultados experimentales.

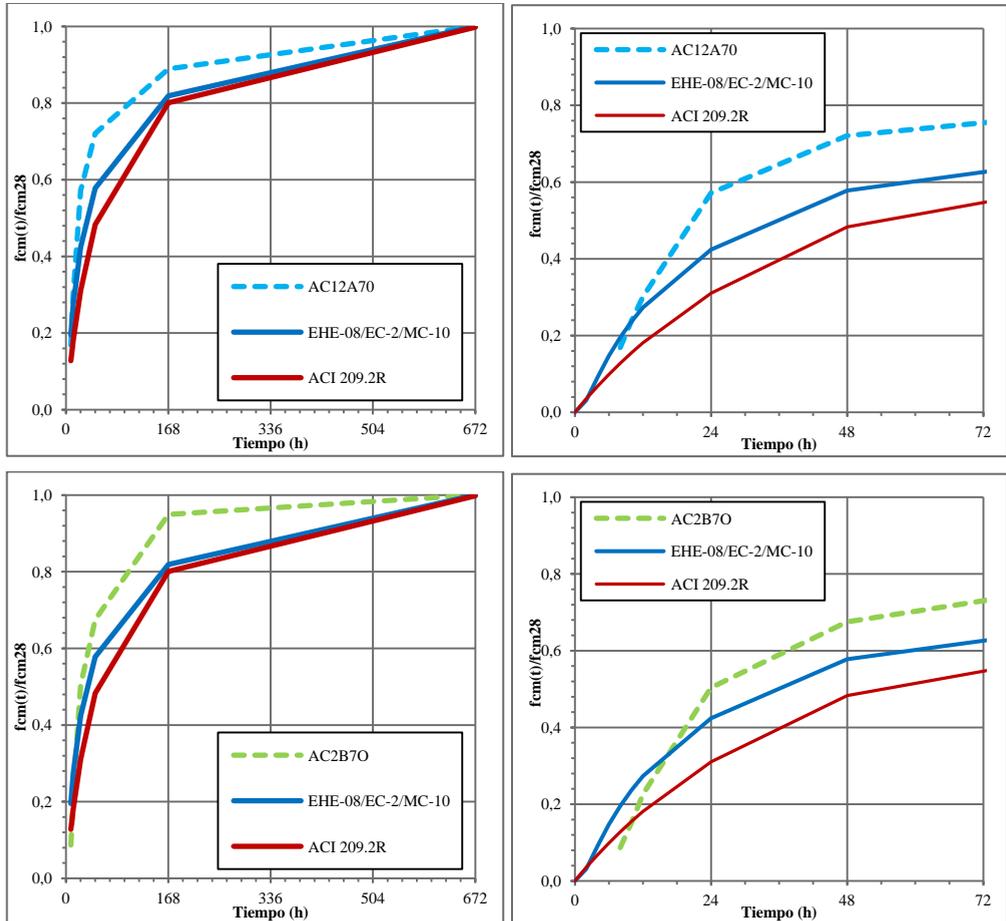


Figura 84. Evolución de la resistencia de los hormigones ACI2A70 y ACI2B70 comparada con los modelos de los códigos.

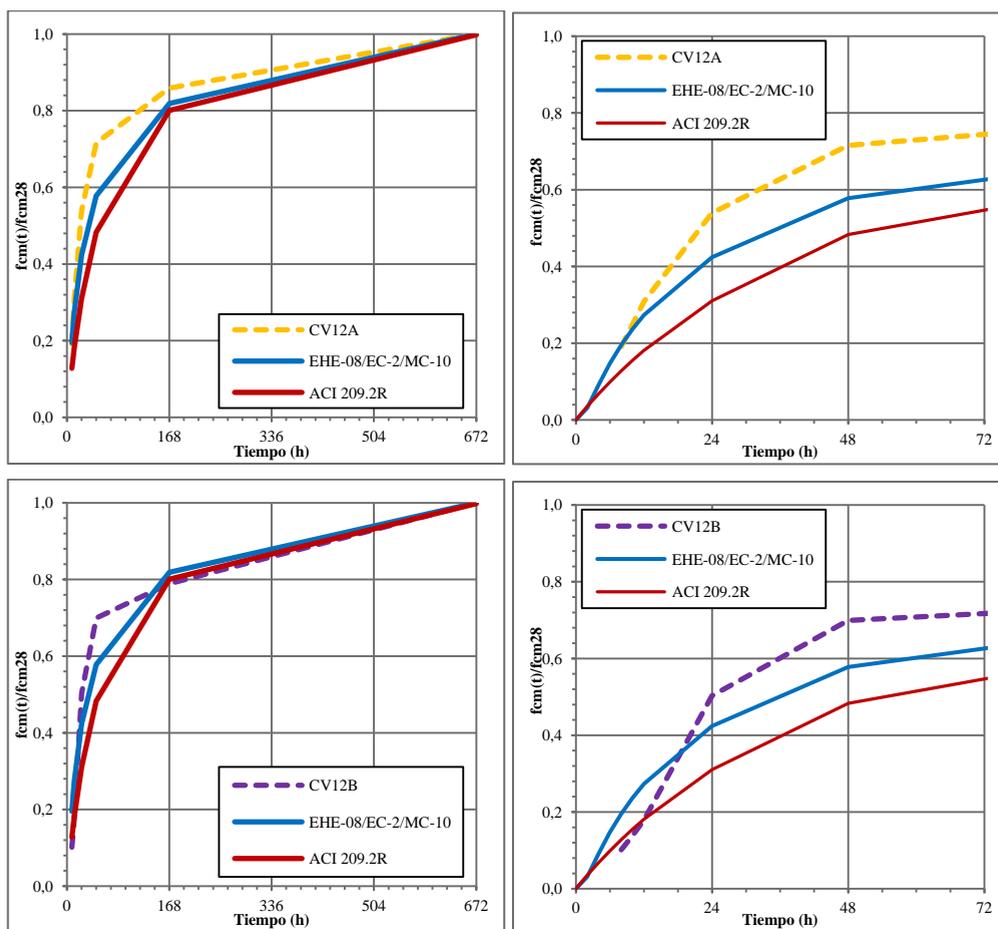


Figura 85. Evolución de la resistencia de los hormigones CV12A y CV12B comparada con los modelos.

En el histograma de la Figura 86, se puede apreciar de forma conjunta la evolución de la resistencia respecto al tiempo y en comparación con los modelos.

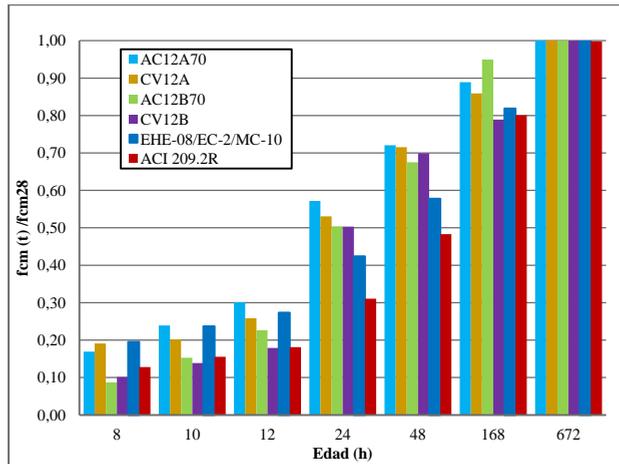


Figura 86. Histograma de la evolución de la resistencia a compresión

4.3.1.3 Análisis paramétrico de la resistencia a compresión por el método de mínimos cuadrados

De acuerdo con los datos de ensayos mecánicos mostrados en los apartados anteriores y la diferencia existente entre el desarrollo de la resistencia a edades tempranas y muy tempranas con el desarrollo previsto por los modelos de los códigos (EHE-08, EC-2, y MC-10) se aprecia que a edades muy tempranas, cuando el hormigón tiene menos del 50% de su resistencia, los resultados del 80% de los hormigones estudiados están por debajo de los valores teóricos (Figura 87), sin embargo a edades mayores de las 12 horas ocurre la situación inversa, solamente el 28% da valores inferiores. Este comportamiento coincide apreciablemente con el proceso de hidratación y endurecimiento del hormigón, tal y como se ha definido en el capítulo 2, a edades en las que el fraguado ya se ha producido es cuando la ecuación de los modelos de los códigos es conservadora, pero cuando el hormigón está prácticamente recién fraguado y su hidratación aunque cada vez menor no se ha completado es cuando se produce este desajuste.

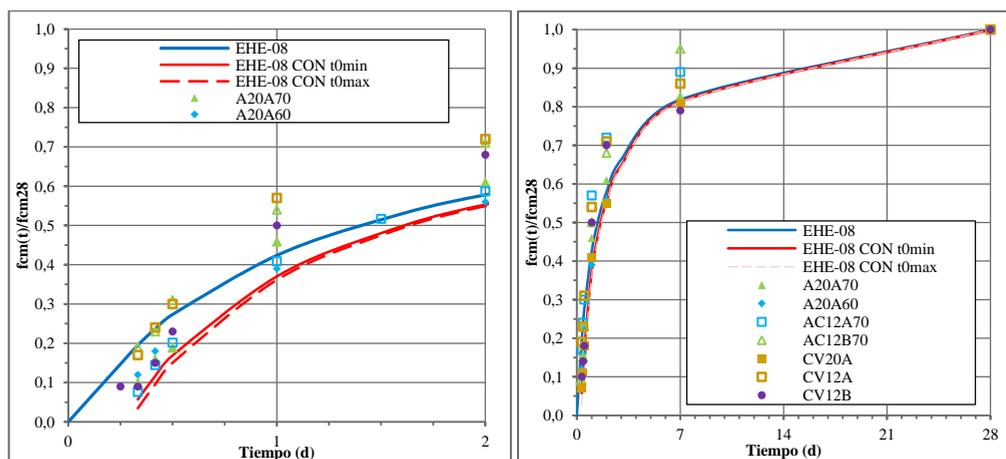


Figura 87 Modelo de la EHE-08 sin ajuste y con ajuste por tiempo de fraguado

Con objeto de mejorar el ajuste entre datos experimentales y el modelo de la EHE-08, se ha hecho una primera aproximación, teniendo en cuenta que el inicio de adquisición de resistencias no se produce hasta que el fraguado a finalizado y de esta forma aplicar la ecuación 2.17 que considera que el tiempo cero debe coincidir con el final del fraguado.

Aplicada esta ecuación a nuestros datos experimentales (Figura 87) se aprecia que a edades muy tempranas, el modelo modificado sitúa la previsión de la evolución de la resistencia a cualquier edad por el lado de la seguridad, siendo mejor el ajuste es mejor a edad temprana muy tempranan consideración, si bien a edades mayores se mantiene el desajuste.

En la figura 87 se puede apreciar el resultado obtenido para las edades muy tempranas y tempranas, cuando para el conjunto de datos se toma el valor de t_0 igual al valor inferior y superior, obtenido experimentalmente, comprobándose que el modelo teórico es sensible a la consideración o no del t_0 , pero no es sensible a variaciones del t_0 dentro del intervalo de valores obtenidos.

En esta misma figura se comprueba que la dispersión de la resistencia, con respecto al modelo teórico modificado, de los hormigones AC20A60, CV20A y AC20A70, realizados con un tamaño de árido de 20 mm y un cemento tipo II-B, es menor que la de los hormigones AC12A70, AC12B70, CV12A y CV12B, realizados con un cemento CEM I y tamaño máximo de árido 12 mm.

Por ello, se propone un nuevo ajuste en la ecuación y es el adoptar un coeficiente corrector de la variable s que tenga en cuenta no sólo la velocidad de endurecimiento sino también el tipo de cemento y el tamaño máximo del árido.

Los resultados obtenidos, aplicando el método de ajuste por mínimos cuadrados, a cada uno de los siete hormigones estudiados, se muestran en la tabla

Tabla 31 Valores del coeficiente s ajustados para hormigón

Hormigón		AC20A60	AC20A70	CV20A	AC12A70	CV12A	AC12B70	CV12B
Final de fraguado	Minutos	336	308	346	322	337	353	369
	Días	2,33E-01	2,14E-01	2,40E-01	2,24E-01	2,34E-01	2,45E-01	2,56E-01
Valores de s		0,1700	0,1676	0,1842	0,1210	0,1204	0,1406	0,1432

Los hormigones de tamaño máximo de árido 20 mm tienen un valor de s comprendido entre 0,1676 y 0,1842, si se adopta el valor de intermedio $s= 0,1740$ y éste se aplica a cada uno de los hormigones con su t_0 específico y con t_0 intermedio, el resultado se muestra en la Figura 88 y se puede comprobar que el ajuste es mejor a las edades de 8 a 12 horas y que es el mismo que el de la EHE-08 para la edad de 24 horas.

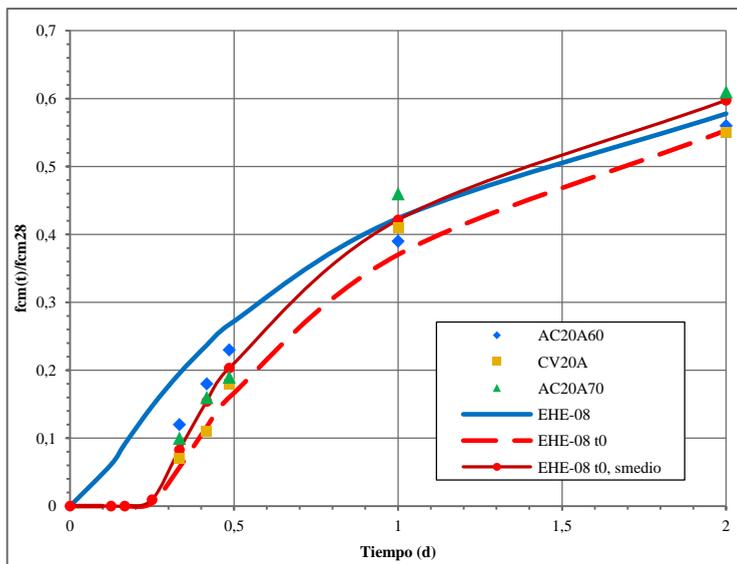


Figura 88 Modelos de la EHE sin ajuste y con ajuste de t_0 y s en los hormigones de tamaño máximo del árido de 20 mm

En el caso de los hormigones de tamaño máximo de árido de 12,5 mm, el valor que se adopta para s es de 0,1313 (Figura 89) y realizando las mismas consideraciones, también se puede ver que el ajuste mejora para cualquier edad.

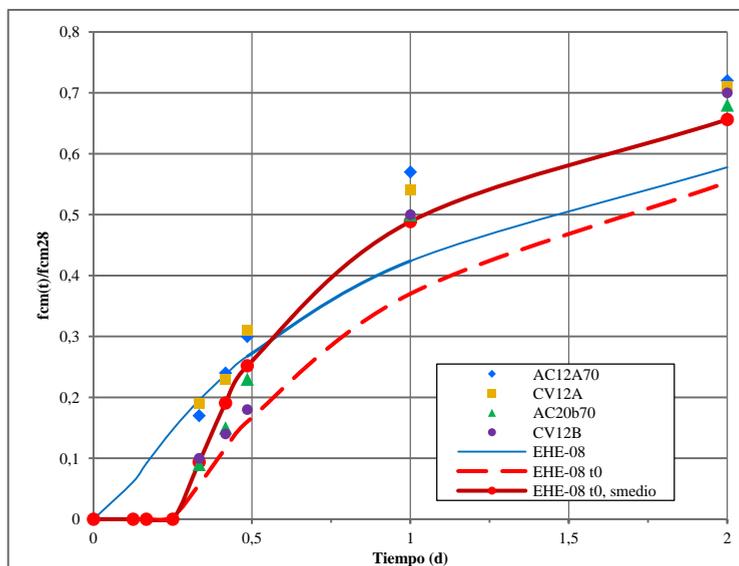


Figura 89 Modelos de la EHE sin ajuste y con ajuste de t_0 y s en los hormigones de tamaño máximo del árido de 12,5 mm

4.3.2 Resistencia a tracción indirecta.

4.3.2.1 Relación entre el hormigón autocompactante y el hormigón convencional

Como sucede con la resistencia a compresión, la evolución de la resistencia a tracción en los hormigones estudiados sigue un patrón muy similar en todos ellos (Figuras 89 y 90), si bien esta evolución es más rápida que en el caso de la resistencia a compresión. Este desarrollo presenta nuevamente tres zonas diferenciadas. Una correspondiente a las primeras 48 horas, un período intermedio correspondiente a las edades entre 48 horas y 7 días donde la resistencia aumenta pero a menor velocidad y finalmente el período comprendido entre los 7 días y los 28 días en los que la cinética disminuye considerablemente.

a) Influencia de la fluidez

Por lo que respecta a la influencia de la fluidez en los hormigones autocompactantes, si se comparan entre sí los hormigones AC20A60 y AC20A70, fabricados con un tamaño

máximo de árido de 20 mm, se observa que a edades muy tempranas el efecto de tener un escurrimiento diferente tiene influencia a edades inferiores a 12 horas sobre la resistencia, hasta esa edad las resistencias que al principio son muy diferentes se van igualando hasta prácticamente ser la misma a las 24 horas. No obstante, a partir de ese momento es cuando se puede apreciar claramente la influencia del escurrimiento. Cuando éste es mayor (70 cm) la resistencia a tracción aumenta manteniéndose por encima de la del hormigón de menos escurrimiento (60 cm) (Figura 89). Como sucede en compresión, esto se puede deber al mayor contenido en superfluidificante del hormigón AC20A70, que permite una mayor dispersión de las partículas de cemento y, en consecuencia, una mejor hidratación de las mismas.

Si se comparan los hormigones autocompactantes AC20A 60 y AC20A70 con el hormigón convencional de similar dosificación CV20A, se puede decir que, en general, hay una diferencia importante a la edad de 8 horas, disminuyendo progresivamente hasta las 12 horas. A partir de las 24 horas las diferencias resistentes vuelven a aumentar, estabilizándose estas diferencias a partir de las 48 horas.

Al igual que sucedía con la resistencia a compresión, los hormigones autocompactantes presentan una mayor resistencia a compresión que el hormigón convencional (Tabla 32 y Figura 90). Tal y como se señaló en el apartado 4.3.1.1, estas diferencias son debidas a la mayor velocidad de hidratación que aportan los finos a edades tempranas, a la existencia de una estructura más densa y compacta de los HAC y al mayor contenido de superfluidificante en los hormigones autocompactantes que facilita también una mejor hidratación del cemento.

Tabla 32 Diferencia en porcentaje entre las resistencias a tracción entre los hormigones AC20A 60 y AC20A70 con el hormigón convencional CV20A

Edad	AC20A70 $f_{cm}(t)$	AC20A60 $f_{cm}(t)$	Diferencia * (%)	AC20A70 $f_{cm}(t)$	CV20A $f_{cm}(t)$	Diferencia ** (%)	AC20A60 $f_{cm}(t)$	CV20A $f_{cm}(t)$	Diferencia *** (%)
8h	0,44	0,29	32,77	0,44	0,25	43,79	0,29	0,25	16,39
10h	0,60	0,47	20,69	0,60	0,44	25,54	0,47	0,44	6,12
12h	0,81	0,77	4,48	0,81	0,73	9,03	0,77	0,73	4,76
24h	1,38	1,39	0,74	1,38	1,29	6,47	1,39	1,29	7,16
48h	2,52	2,22	11,92	2,52	1,60	36,45	2,22	1,60	27,86
7d	2,90	2,65	8,71	2,90	2,30	20,58	2,65	2,30	13,01
28d	3,11	2,99	3,86	3,11	2,56	17,75	2,99	2,56	14,45

* $(AC20A70-AC20A60)/AC20A70 \times 100$ ** $(AC20A70-CV20A)/AC20A70 \times 100$ *** $(AC20A60-CV20A)/AC20A60 \times 100$

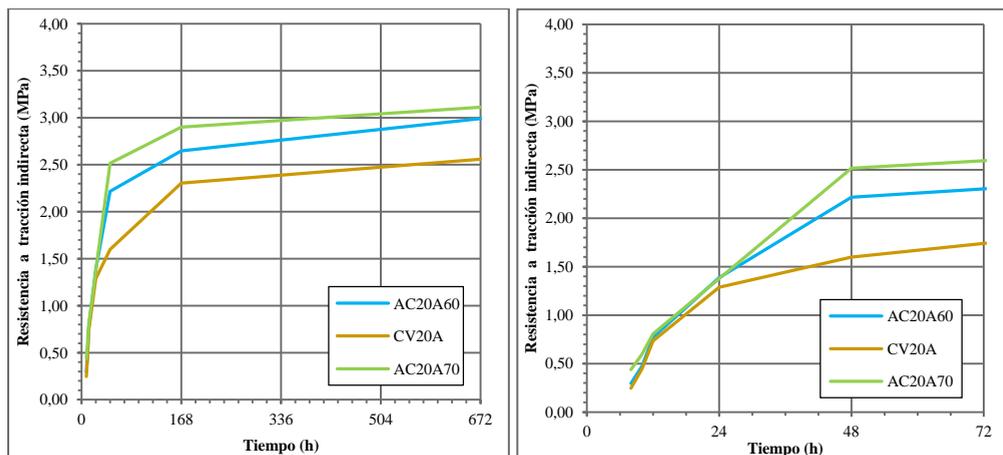


Figura 90 Evolución de la resistencia a tracción de los hormigones de tamaño máximo 20 mm con la edad

Esta diferencia de comportamiento entre HAC y HCV también se produce en los hormigones fabricados con un tamaño máximo de árido de 12,5 mm (Tabla 33 y Figura 91),

Igualmente, si se comparan los HAC con sus equivalentes HCV, se puede observar que a cualquier edad los hormigones autocompactantes desarrollan un poco más resistencia que los convencionales equivalentes, si bien las diferencias no son importantes. Así, por ejemplo, a partir de los 7 días la diferencia entre los hormigones AC12A70 y el CV12A es del orden de 0,2-0,3 MPa y entre los hormigones AC12B70 y el CV12B de 0,1-0,2 MPa.

Tabla 33 Diferencia en porcentaje entre las resistencias a tracción entre los hormigones AC12A 70 y AC12B70 con los hormigones convencionales CV12A y CV12B

Edades	AC12A70 $f_{ctm}(t)$	AC12B70 $f_{ctm}(t)$	Diferencia * (%)	AC12A70 $f_{ctm}(t)$	CV12A $f_{ctm}(t)$	Diferencia ** (%)	AC12B70 $f_{ctm}(t)$	CV12B $f_{ctm}(t)$	Diferencia *** (%)
8h	1,31	0,83	36,53	1,31	0,75	42,59	0,83	0,50	40,11
10h	1,46	1,17	19,51	1,46	1,13	22,24	1,17	0,65	44,54
12h	1,74	1,47	15,73	1,74	1,48	15,37	1,47	0,92	37,10
24h	2,11	1,90	10,14	2,11	2,07	2,11	1,90	1,72	9,46
48h	2,56	2,37	1,76	2,56	2,49	2,85	2,37	2,03	14,38
7d	3,16	2,80	11,21	3,16	2,80	11,18	2,80	2,68	4,37
28d	3,51	3,15	10,21	3,51	3,30	6,16	3,15	2,91	7,64

* $(AC12A70-AC12B70)/AC12A70 \times 100$ ** $(AC12A70-CV12A)/AC12A70 \times 100$ *** $(AC12B70-CV12B)/AC12B70 \times 100$

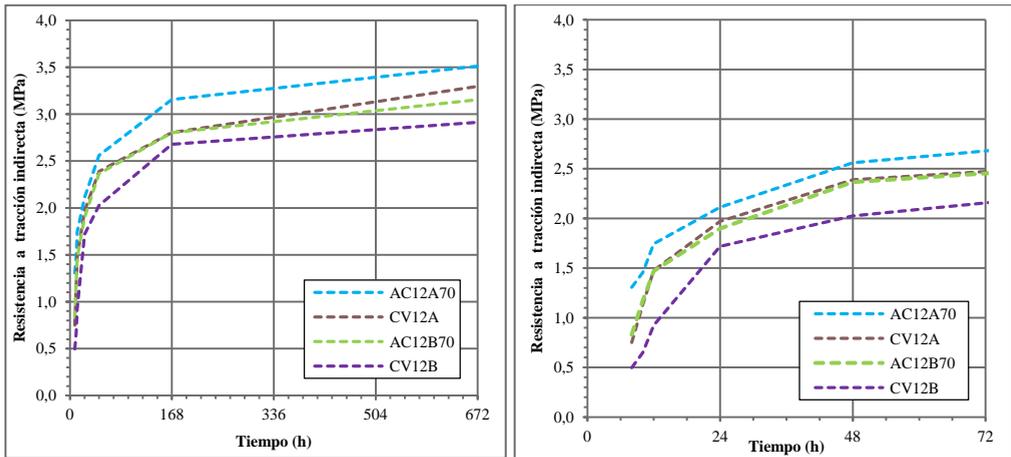


Figura 91 Evolución de la resistencia a tracción de los hormigones de tamaño máximo 12,5mm

b) Influencia de la dosificación

Si se comparan entre sí los hormigones autocompactantes de igual escurrimiento e igual relación a/c pero distinta dosificación (AC20A70 versus AC12A70) (Figura 91) claramente se comprueba que, como era de esperar, al haber utilizado un mayor contenido de cemento y de más categoría resistente en el hormigón AC12A70 se alcanza una mayor resistencia a tracción. Este fenómeno se da igualmente en el caso de los hormigones convencionales (CV20A versus CV12A y CV12B) (figura 91). Estas diferencias se producen desde edades muy tempranas. De hecho a las 8 horas la resistencia a tracción del hormigón CV20A es un 66% y un 50% menor que la de los hormigones CV12A y CV12B, respectivamente, y a 28 días estas diferencias son del 22% y del 12%, respectivamente

Además, como también es sabido, si la concentración volumétrica del árido y la relación a/c se mantienen constantes, el incremento del tamaño máximo del árido se puede traducir en una merma de la resistencia a tracción del hormigón, debido a una menor área adherente entre la pasta y el árido (mayores tensiones en la interfaz) y a la discontinuidad ocasionada por las partículas más grandes (mayor heterogeneidad de la mezcla).

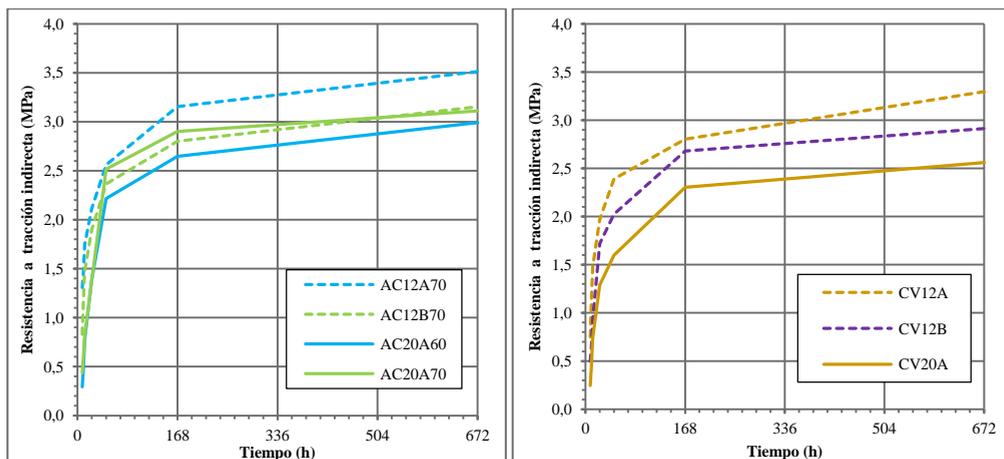


Figura 92 Evolución de la resistencia por tipo de hormigón

En definitiva, la utilización de un mayor contenido de cemento de mayor clase resistente y de un tamaño máximo de árido más pequeño da lugar a hormigones más resistentes, tanto en el caso de los hormigones autocompactantes como en el de los convencionales.

c) Influencia del tipo de aditivo

La influencia del tipo de aditivo sobre el desarrollo de la resistencia es importante puesto que el hormigón AC12B70 experimenta una disminución media de resistencia con respecto al AC12A70 del 11,75%. Esto se debe a la diferente formulación de los aditivos ya que aun siendo ambos ésteres policarboxílicos, en el Viscocrete 20HE el tamaño de las cadenas laterales es mayor. Por otra parte el Viscocrete 3425 presenta una mayor resistencia a la hidrólisis por lo que el proceso de endurecimiento es más lento. Además este aditivo tiene un tiempo abierto mayor que el Viscocrete 20HE, lo que retrasa el inicio del fraguado.

4.3.2.2 Evolución de la resistencia de los hormigones autocompactantes y hormigones convencionales

En la tabla 28 del apartado 4.3.1 se reflejan los valores que adoptan los coeficientes de los modelo EHE-08, EC-2, MC-10.

a) *Evolución de los hormigones de tamaño máximo de árido 20 mm*

La evolución de la resistencia relativa de los tres tipos de hormigones se muestra en la Tabla 33 y en la Figura 92, comparada con el modelo propuesto por los códigos (EHE-08, EC-2, MC-10).

Tabla 34 Resultados medios de la resistencia a tracción y relación $f_{ctm}(t)/f_{ctm28}$

Edad	AC20A60		AC20A70		CV20A	
	$f_{ctm}(t)$	$f_{ctm}(t)/f_{ctm28}$	$f_{ctm}(t)$	$f_{ctm}(t)/f_{ctm28}$	$f_{ctm}(t)$	$f_{ctm}(t)/f_{ctm28}$
8h	0,29	0,10	0,25	0,10	0,44	0,14
10h	0,47	0,16	0,44	0,17	0,60	0,19
12h	0,77	0,26	0,73	0,29	0,81	0,26
24h	1,39	0,46	1,29	0,50	1,38	0,44
48h	2,22	0,74	1,60	0,62	2,52	0,81
7d	2,65	0,89	2,30	0,90	2,90	0,93
28d	2,99	1,00	2,56	1,00	3,11	1,00

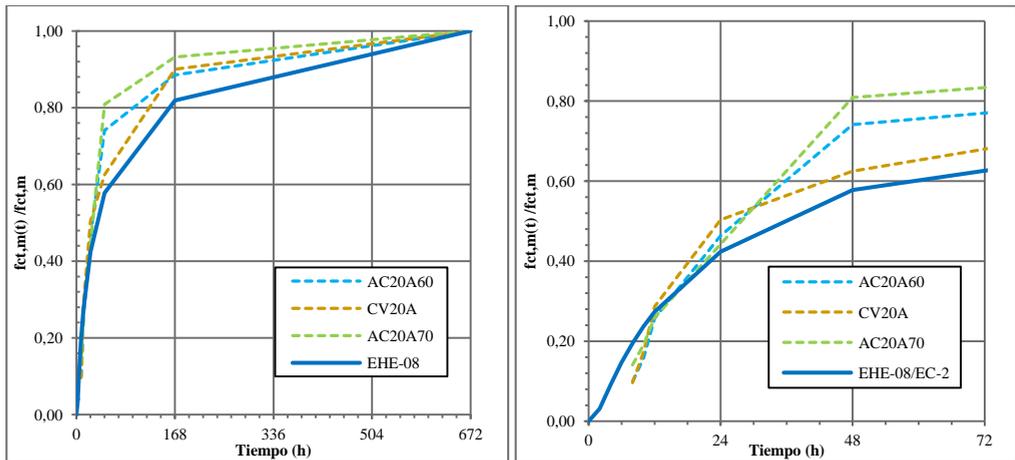


Figura 93 Evolución de la resistencia a tracción de los hormigones de tamaño máximo 20 mm

Si se comparan los tres hormigones autocompactantes entre sí se puede comprobar que la evolución de la resistencia es sensiblemente igual. El hormigón convencional equivalente evoluciona durante las primeras horas (hasta las 24 horas) si bien posteriormente la evolución es algo más lenta.

Si se compara la evolución de la resistencia con los modelos (EHE-08, EC-2) se observan diferencias entre los resultados experimentales y los teóricos. En todos los casos se pueden apreciar dos zonas. Inicialmente, hasta la edad de 12 horas el modelo sobreestima la resistencia debido a que no tienen en cuenta que la resistencia no se inicia en el momento de amasado sino que muy posteriormente, como se puede apreciar en la tabla 24 y en la figura 75, y en consecuencia no considera el tiempo de final de fraguado como punto de inicio del modelo. Para edades superiores a 12 horas la tendencia se invierte y el modelo subestima la resistencia. En el caso de los HAC el ajuste es menor que en los HCV debido a la mayor resistencia a tracción que tienden a registrar los HAC.

En la figura 93, se muestra una visión más detallada de la evolución de resistencia respecto al tiempo, en comparación con la normativa.

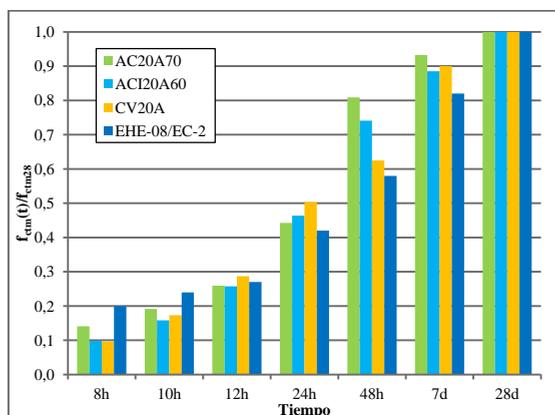


Figura 94. Histograma de la evolución de la resistencia a tracción

b) Evolución de los hormigones de tamaño máximo de árido 12,5 mm

Tabla 35. Resistencia a tracción y evolución de los hormigones

Edad	AC12A70		CV12A		AC12B70		CV12B	
	$f_{ctm}(t)$	$f_{ctm}(t)/f_{ctm28}$	$f_{ctm}(t)$	$f_{ctm}(t)/f_{ctm28}$	$f_{ctm}(t)$	$f_{ctm}(t)/f_{ctm28}$	$f_{ctm}(t)$	$f_{ctm}(t)/f_{ctm28}$
8h	1,31	0,37	0,75	0,23	0,83	0,26	0,50	0,17
10h	1,46	0,41	1,13	0,34	1,17	0,37	0,65	0,22
12 h	1,74	0,50	1,48	0,45	1,47	0,47	0,92	0,32
24h	2,11	0,60	2,07	0,63	1,90	0,60	1,72	0,59
48h	2,56	0,73	2,49	0,75	2,37	0,75	2,03	0,70
7d	3,16	0,90	2,80	0,85	2,80	0,89	2,68	0,92
28d	3,51	1,00	3,30	1,00	3,15	1,00	2,91	1,00

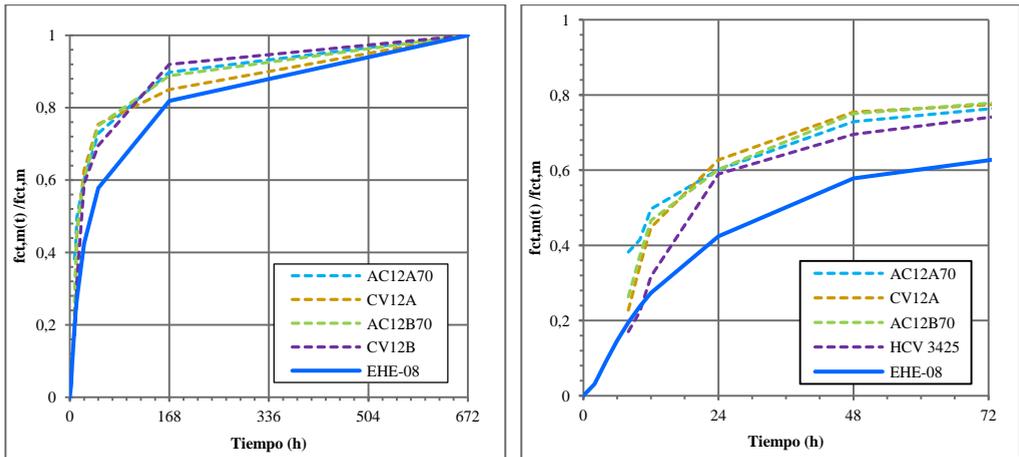


Figura 95. Evolución de resistencias a tracción indirecta

Con respecto a las resistencias relativas podemos afirmar que el comportamiento a edades tempranas e iniciales los valores experimentales entre hormigones HAC y HCV son similares pero son en todos los casos mucho mayores que las previstas con el modelo EHE-08/EC-2.

Con los dos aditivos el desarrollo de resistencias es mayor en los hormigones HAC que en los hormigones HCV como se puede apreciar en la tabla 35

Tabla 36 Diferencias existentes entre las resistencias de los hormigones estudiadas

Edad	AC12A70 f_{ctm}	CV12A f_{ctm}	Diferencia %	AC12B70 f_{ctm}	CV12B f_{ctm}	Diferencia %
8h	1,28	0,75	41,41	0,83	0,5	39,76
10h	1,51	1,13	25,17	1,17	0,65	44,44
12h	1,75	1,48	15,43	1,47	0,98	33,33
24h	2,41	2,07	14,11	1,90	1,81	4,74
48h	2,97	2,59	6,73	2,37	2,03	27,24
7d	3,53	2,77	26,63	2,80	2,11	*
28d	4,08	2,84	33,09	3,15	2,36	34,08

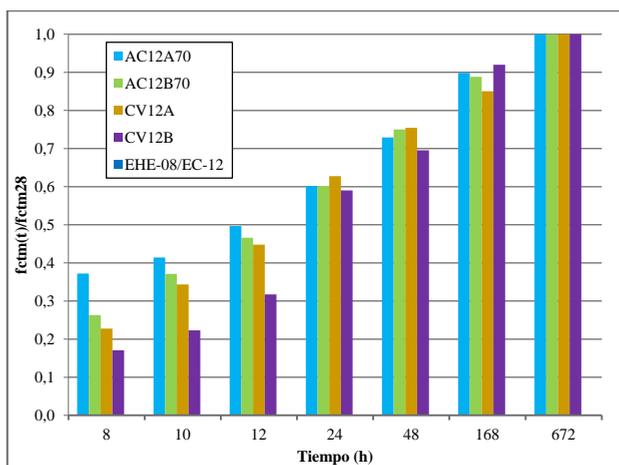


Figura 96. Histograma de la evolución de resistencia a tracción

Si se comparan los hormigones HAC y HCV, no por tipo de hormigón sino por tipo de aditivo, se evidencia que los que utilizan el aditivo 3425 desarrollan menos resistencias que los otros. Esta diferencia se debe a que el inicio y fin de fraguado es posterior y, en consecuencia, el desarrollo de resistencias es más lento.

Los hormigones realizados con el aditivo 20HE desarrollan una evolución más progresiva que los realizados con el 3425 a partir de 7 días. No obstante a edades menores de 48 horas la adquisición de evolución es más rápida en los HCV.

4.3.2.3 Correlación resistencia a tracción-resistencia a compresión

En la Figura 97 se muestra la relación que existen entre la resistencia a tracción con la resistencia a compresión.

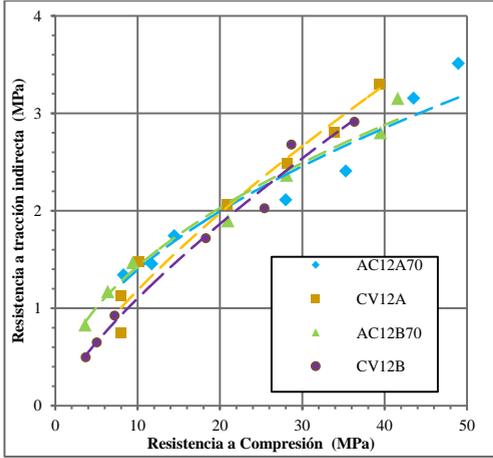


Figura 97. Resistencia a tracción indirecta en función a la resistencia a compresión

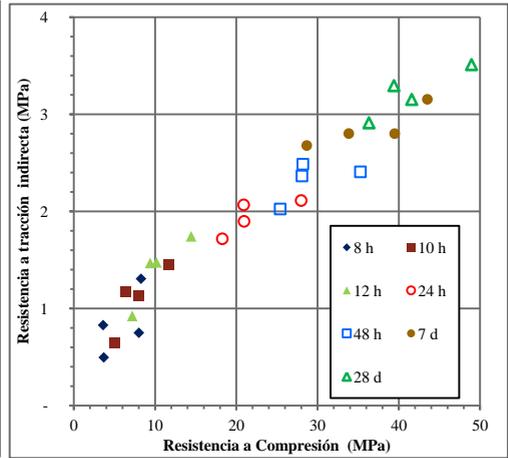


Figura 98. Relación resistencia tracción - compresión respecto a la edad

En la Figura 96, se muestra la relación que existe entre la f_{ctm} y la f_{cm} por tipos de hormigón, donde se distingue que los HAC a edades muy tempranas y tempranas desarrollan más rápidamente la resistencia a tracción que los HCV con respecto a la compresión. No obstante a edades "convencionales" son los que desarrollan más resistencia con respecto a la resistencia a compresión.

En la figura 97, muestra esta misma relación por edades, se puede distinguir que independientemente de la edad, los hormigones CV12A y AC12B70 dan valores intermedios y, en general.

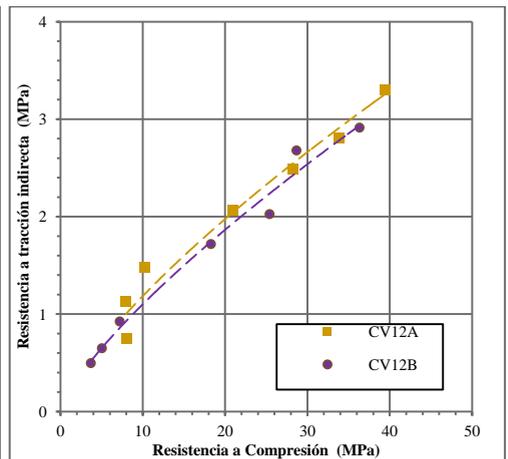
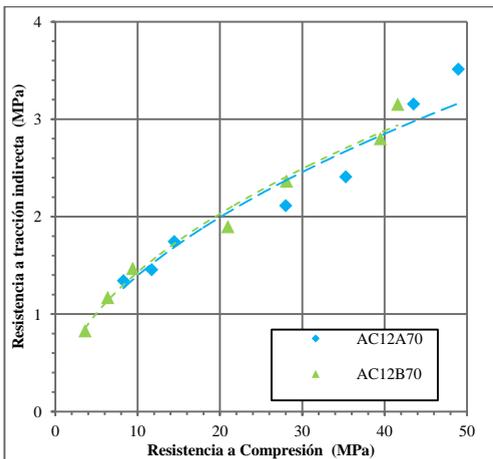


Figura 99. Tendencia por cada tipo de hormigón

Podemos presenciar que los hormigones de HAC, poseen relativamente la misma pendiente que la indicada por la instrucción, algo que no se aprecia en el HCV que tiende a disminuir. Esto nos permite ver nuevamente que el valor teórico determinado por la norma subestima la resistencia a tracción.

Para analizar y comparar el HAC con HCV se dispone a presentar en la figura, la misma imagen anterior pero con cada hormigón y su respectivo aditivo.

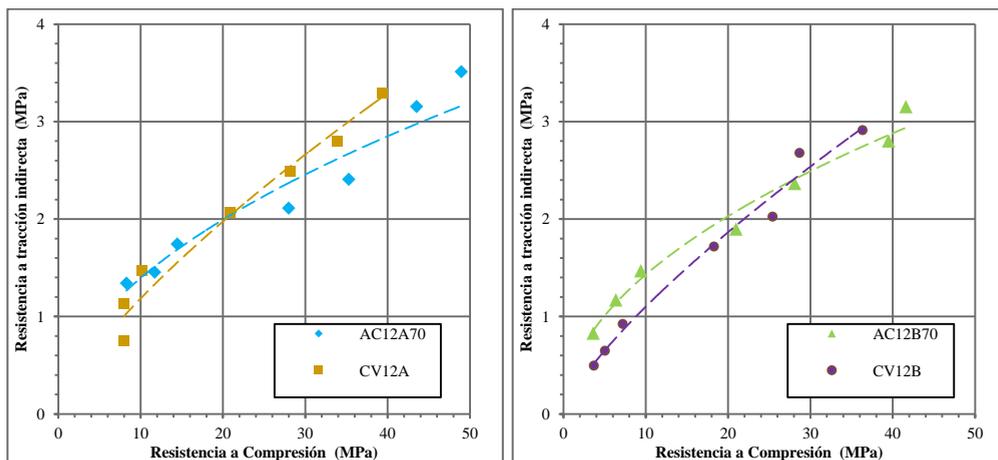


Figura 100. Comparación de cada tipo de aditivo de acuerdo a la relación tracción-compresión

Diseñados estos hormigones con aditivos distintos se puede valorar que entre la relación de la resistencia tracción indirecta en función a la compresión, el hormigón autocompactante difiere del convencional de manera progresiva respecto a aumento de resistencias, logrando tener una proyección superior que el HCV, de igual manera se observa una pendiente semejante entre tendencias, comprobando esto la normalidad de los datos.

4.3.3 Módulo de deformación

La evolución del módulo de deformación en los hormigones estudiados sigue un patrón muy similar en todos ellos. Como sucedía con las propiedades anteriores, este desarrollo presenta tres zonas diferenciadas. Una correspondiente a las edades muy tempranas y tempranas), un período intermedio correspondiente a las edades entre 48 horas y 168 horas, donde el módulo aumenta pero a menor velocidad, y finalmente el período comprendido entre 168 y 672 horas en los que la cinética disminuye considerablemente.

4.3.3.1 Relación entre hormigones autocompactantes y hormigón convencional

a) Influencia de la fluidez

Si se comparan entre sí los hormigones AC20A60 y AC20A70 se observa que a pesar de su distinta fluidez los valores del módulo y su evolución con el tiempo son similares, especialmente a partir de las 12 horas de su fabricación (Tabla 36 y Figura 100). Es decir, la fluidez no parece haber influido en el módulo de deformación de los HAC.

Por otro lado, si se comparan estos valores con los del hormigón convencional, en principio, debido al mayor volumen de pasta presente en los HAC (cemento+agua+finos) el módulo de deformación debería de haber sido algo mayor en los HCV. No obstante, este hecho no se ha producido, probablemente debido a la mayor velocidad de hidratación que se produce en los HAC como consecuencia del efecto de nucleación de los finos calizos. Ahora bien, este efecto, que se produce principalmente durante las primeras horas, se va perdiendo con el paso del tiempo. Por ello, hasta las 24 horas el módulo de deformación de los HAC es claramente superior al de los HCV y a partir de ese momento los valores tienden a igualarse, no habiendo prácticamente diferencias a la edad de 28 días. Así, por ejemplo, a la edad de 12 horas las diferencias entre los hormigones AC20A60 y CV20A o entre los hormigones AC20A70 y el CV20A son del 38 y 43%, respectivamente, y sin embargo a la edad de 28 días estas diferencias tan solo son del 4% en ambos casos (Tabla 36).

Tabla 37 Diferencia en porcentaje entre los módulos de los HAC y el CV

Edad	AC20A60 $E_{cm}(t)$	CV20A $E_{cm}(t)$	Diferencia * %	AC20A70 $E_{cm}(t)$	CV20A $E_{cm}(t)$	Diferencia ** %
8h	12,62	8,12	35,66	9,62	8,12	15,59
10h	16,53	10,93	33,88	12,15	10,93	10,04
12h	17,58	12,76	27,42	18,24	12,76	30,04
24h	19,85	18,04	9,12	20,17	18,04	10,56
48h	23,66	25,69	-8,58	22,93	25,69	-12,04
7d	27,17	26,89	1,03	28,83	26,89	6,73
28d	29,37	28,32	3,58	29,43	28,32	3,77

* $(AC20A60-CV20A)/AC20A60 \times 100$ ** $(AC20A70-CV20A)/AC20A70 \times 100$

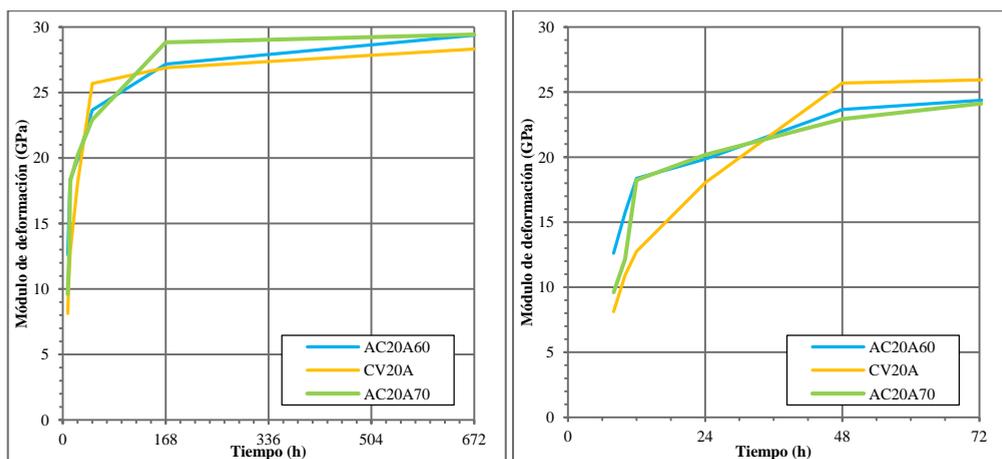


Figura 101 Evolución del módulo secante de los hormigones AC20A60, CV20 y AC20A70

Los hormigones AC12A70, AC12B70, CV12A y CV12B, tienen un comportamiento muy similar entre ellos (Figura 101), de tal forma que en todos los casos con los hormigones autocompactantes se obtienen módulos mayores que con sus hormigones convencionales equivalentes, siendo las diferencias entre el AC12A70 y el CV12A es del 2,8%, y entre el AC12B70 y CV12B es del 2%.

Tabla 38 Diferencia en porcentaje entre las resistencias a tracción entre los hormigones AC12A 70 y AC12B70 con los hormigones convencionales CV12A y CV12B

Edades	AC12A70 $E_{cm}(t)$	AC12B70 $E_{cm}(t)$	Diferencia * (%)	AC12A70 $E_{cm}(t)$	CV12A $E_{cm}(t)$	Diferencia ** (%)	AC12B70 $E_{cm}(t)$	CV12B $E_{cm}(t)$	Diferencia *** (%)
8h	17,42	9,62	44,78	17,42	14,04	19,40	9,62	9,63	-0,104
10h	19,04	12,67	33,46	19,04	16,05	15,70	12,67	11,6	8,445
12h	19,95	15,62	21,70	19,95	17,41	12,73	15,62	13,28	14,981
24h	25,53	21,15	17,16	25,53	23,67	7,29	21,15	21,38	-1,087
48h	28,06	23,86	14,97	28,06	25,82	7,98	23,86	25,39	-6,412
7d	30,57	29,84	2,39	30,57	30,47	0,33	29,84	28,5	4,491
28d	32,29	30,21	6,44	32,29	31,38	2,82	30,21	29,59	2,052

* $(AC12A70-AC12B70)/AC12A70 \times 100$ ** $(AC12A70-CV12A)/AC12A70 \times 100$ *** $(AC12B70-CV12B)/AC12B70 \times 100$

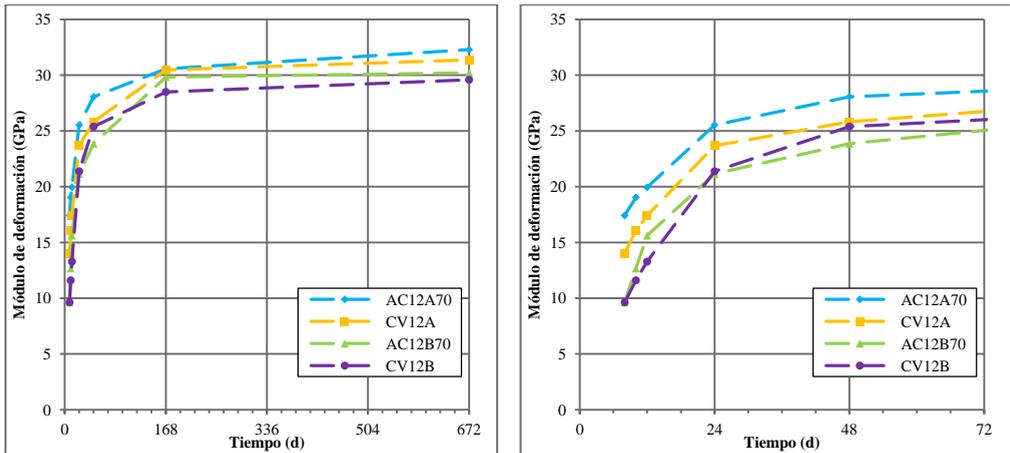


Figura 102 Evolución del módulo secante de los hormigones AC12A70, CV12A, AC12B70 y CV12B

b) Influencia de la dosificación

Como era de esperar, al igual que ha sucedido con las otras propiedades mecánicas analizadas, los hormigones fabricados con un cemento de mayor clase resistente han dado lugar a un módulo de deformación más alto, tanto en el caso de hormigones autocompactantes como en el de hormigones convencionales (Figura 102)

Los hormigones fabricados con un tamaño máximo de árido de 12,5 mm tienen un comportamiento similar al de los hormigones fabricados con árido de 20 mm, si bien a edades tempranas las diferencias entre HAC y HCV son más pequeñas, probablemente porque el volumen de áridos entre ambos tipos de hormigón es más parecido que en el caso de los hormigones fabricados con un tamaño máximo de árido de 20 mm. De hecho el volumen total de áridos en los hormigones autocompactantes y convencionales con el árido de 12,5 mm es prácticamente el mismo y, por el contrario, en los hormigones con árido de 20 mm, dicho volumen difiere entre los HAC y los HCV en un 11,2% (Tablas 10 y 11)

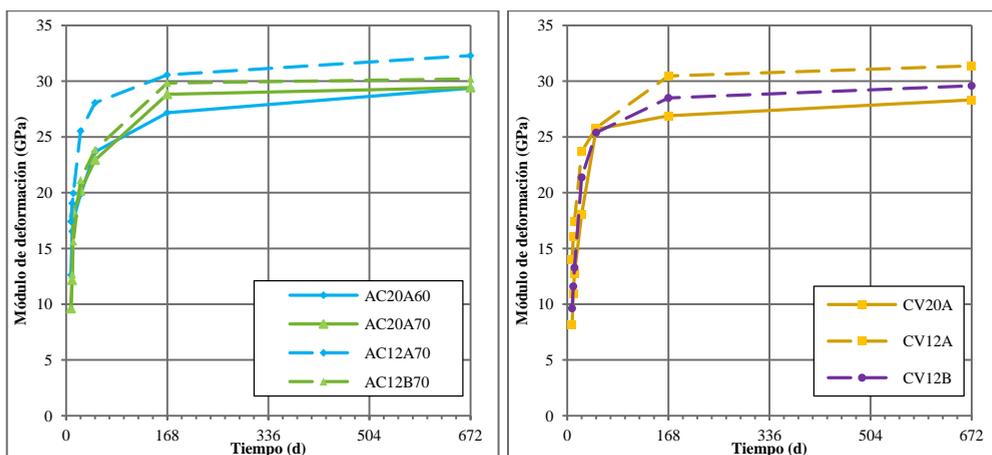


Figura 103 Evolución del módulo de deformación por tipo de hormigón

c) Influencia del tipo de aditivo

Los hormigones con el aditivo Viscocrete 20HE tienen mejor comportamiento que los hormigones con el aditivo Viscocrete 3425, y esta influencia se manifiesta tanto en los HAC como en los HCV. En ambos casos estas diferencias son muy importantes durante las primeras horas, pero tienden a desaparecer a edades más avanzadas las diferencias. Tal y como se ha comentado, esto se debe a que con el Viscocrete 3425 el fraguado se inicia más tarde y además el proceso de endurecimiento es más lento. Así por ejemplo, a la edad de 8 horas, las diferencias entre los hormigones AC12A70 y AC12B70 son del 81% y a la edad de 28 días estas diferencias son solo del 7%. En el caso de los HCV, a la edad de 8 horas las diferencias entre los hormigones CV12A y CV12B son del 46% y a los 28 días del 6%.

4.3.3.2 Evolución del módulo de deformación de los hormigones autocompactantes y hormigones convencionales

En la tabla 38 se recogen los valores de la relación $E_{cm}(t)/E_{cm28}$ resultantes de la aplicación de las expresiones propuestas por los códigos EHE-08, EC-2 y MC-10 que adoptan los coeficientes de los modelos EHE-08, EC-2, MC-10

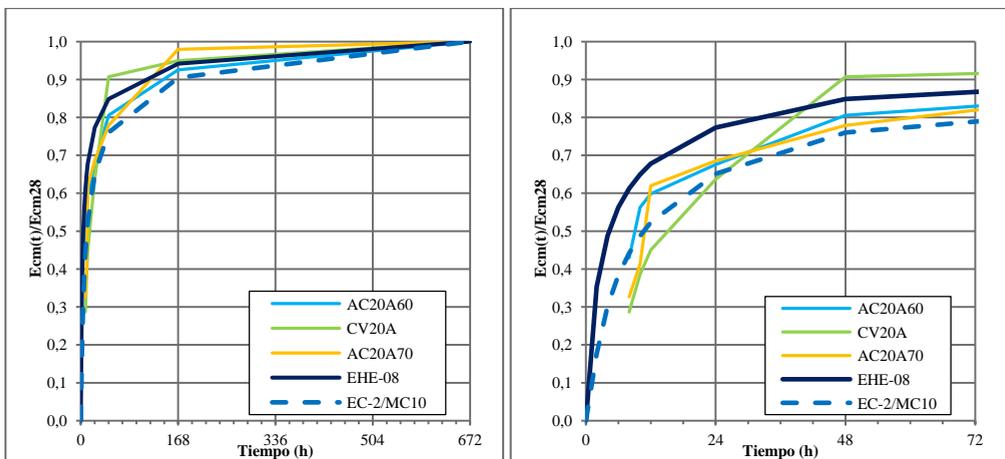
Tabla 39 Coeficientes de los modelos EHE-08, EC-2, MC-10

Modelo	Horas	0	2	4	6	8	10	12	24	48	168	672
	Días	0	0,08	0,17	0,25	0,33	0,42	0,5	1	2	7	28
EHE-08	$\beta_{ec}(t)^{0,3}$	0	0,35	0,49	0,56	0,61	0,65	0,68	0,77	0,85	0,94	1
EC-2/MC-10	$\beta_{ec}(t)^{0,5}$	0	0,18	0,30	0,38	0,44	0,49	0,52	0,65	0,76	0,90	1

La evolución del módulo relativo de los tres tipos de hormigones fabricados con tamaño máximo de árido 20 mm se muestra en la Tabla 39 y en la Figura 100, comparada con el modelo propuesto por los códigos EHE-08, EC-2 y MC-10.

Tabla 40 Modulo de deformación y relación $E_{cm}(t)/E_{cm28}$ de los hormigones de tamaño máximo 20 mm

Edad	AC20A60		CV20A		AC20A70	
	$E_{cm}(t)$	$E_{cm}(t)/E_{cm28}$	$E_{cm}(t)$	$E_{cm}(t)/E_{cm28}$	$E_{cm}(t)$	$E_{cm}(t)/E_{cm28}$
8h	12,62	0,43	8,12	0,29	9,62	0,33
10h	16,53	0,56	10,93	0,39	12,15	0,41
12h	17,58	0,60	12,76	0,45	18,24	0,62
24h	19,85	0,68	18,04	0,64	20,17	0,69
48h	23,66	0,81	25,69	0,91	22,93	0,78
7d	27,17	0,93	26,89	0,95	28,83	0,98
28d	29,37	1	28,32	1	29,43	1

**Figura 104** Evolución del módulo relativo secante con la edad

Por lo que respecta a los hormigones fabricados con tamaño máximo 12,5 mm, se muestran en la tabla 40 los resultados medios del módulo de deformación donde se comprueba que el módulo de los cuatro tipos de hormigón experimenta una evolución similar, siendo las diferencias entre los módulos muy bajas. No se aprecia fuerte sensibilidad a la diferencia de aditivos ni tampoco a la utilización o no de filler calizo

Tabla 41 Modulo de deformación y relación $E_{cm}(t)/E_{cm28}$ de los hormigones de tamaño máximo 12,5 mm

Edad	AC12A70		CV12A		AC12B70		CV12A	
	$E_{cm}(t)$	$E_{cm}(t)/E_{cm28}$	$E_{cm}(t)$	$E_{cm}(t)/E_{cm28}$	$E_{cm}(t)$	$E_{cm}(t)/E_{cm28}$	$E_{cm}(t)$	$E_{cm}(t)/E_{cm28}$
8h	17,42	0,54	14,04	0,45	9,62	0,32	9,63	0,33
10h	19,04	0,59	16,05	0,51	12,67	0,42	11,6	0,39
12h	19,95	0,62	17,41	0,55	15,62	0,52	13,28	0,45
24h	25,53	0,79	23,67	0,75	21,15	0,70	21,38	0,72
48h	28,06	0,87	25,82	0,82	23,86	0,79	25,39	0,86
7d	30,57	0,95	30,47	0,97	29,84	0,99	28,5	0,96
28d	32,29	1,00	31,38	1,00	30,21	1,00	29,59	1

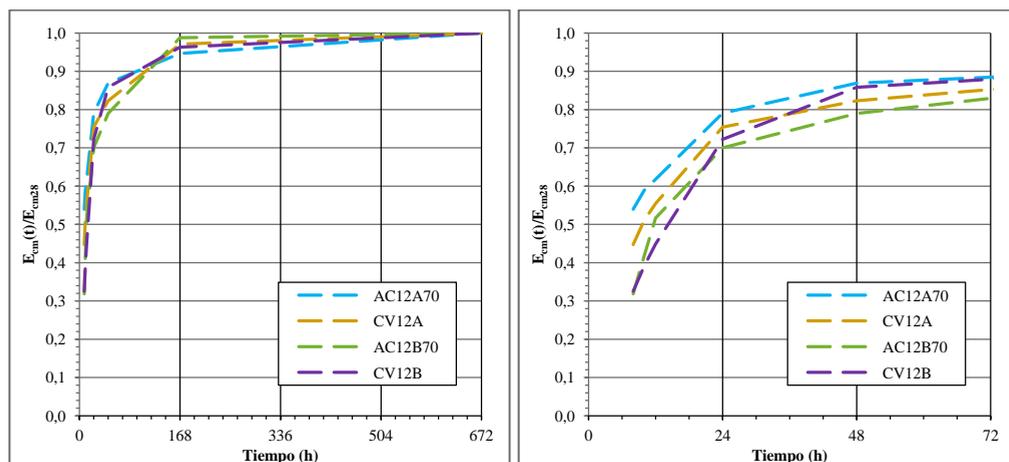


Figura 105 Evolución del módulo relativo secante con la edad

La evolución del modulo con el tiempo se caracteriza por un aumento del módulo muy rápidamente durante las primeras 48 horas para aumentar de forma más lenta hasta los 7 días y prácticamente estabilizarse a partir de esa edad como se puede apreciar en la figuras 104 y 105.

Los modelos no tienen en cuenta que realmente durante las primeras 8-10 horas el módulo de deformación es prácticamente nulo.

A partir de es momento, los valores experimentales se ajustan bastante bien a los modelos teóricos, siendo, en general, algo mejor el ajuste con los modelos del EC-2 y MC-10 que con el de la EHE-08 hasta edades del orden de 48 horas y viceversa para la edades superiores. Aunque la evolución del módulo de deformación depende de la dosificación.

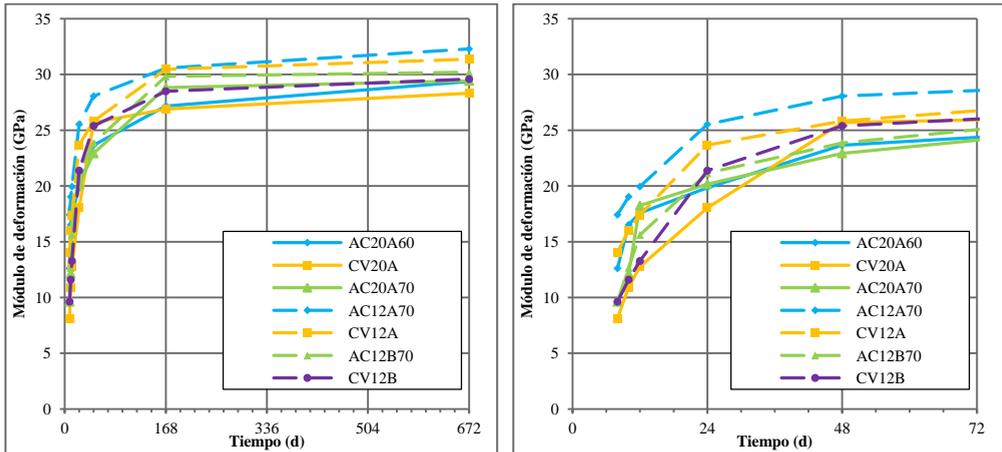


Figura 106 Evolución del módulo secante

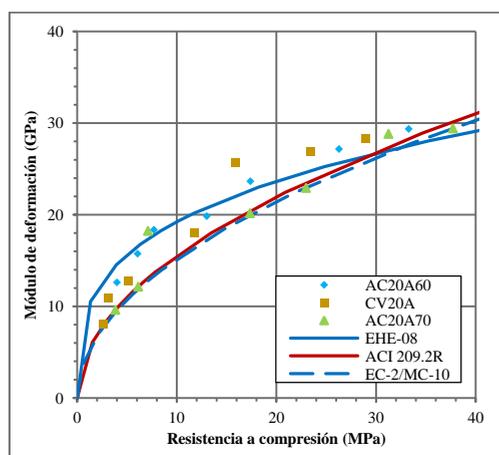
4.3.3.3 Relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión

La tabla 41 y las Figuras 106 y 107 muestran los valores del módulo de deformación y de la resistencia a compresión a distintas edades.

Los resultados experimentales muestran que a edades muy tempranas el módulo se desarrolla más rápidamente que la resistencia a compresión pero a partir de las 24 horas el desarrollo tiende a ser similar progresivamente.

Tabla 42. *Media de resultados a compresión y módulo de deformación.*

Edad	AC20A60		CV20A		AC20A70	
	$f_{cm}(t)$	$E_{cm}(t)$	$f_{cm}(t)$	$E_{cm}(t)$	$f_{cm}(t)$	$E_{cm}(t)$
8h	4,00	12,62	2,62	8,12	3,84	9,62
10h	6,07	15,75	3,13	10,93	6,13	12,15
12h	7,71	18,36	5,10	12,76	7,11	18,24
24h	13,02	19,85	11,82	18,04	17,35	20,17
48h	17,39	23,66	15,88	25,69	22,97	22,93
7d	26,29	27,17	23,43	26,89	31,26	28,83
28d	33,28	29,37	28,94	28,32	37,73	29,43

**Figura 107.** *Módulo de deformación en función a la resistencia a compresión de los hormigones de tamaño máximo de árido 20 mm*

Para evaluar como difieren los resultados experimentales de los previstos por las normas, se ha dividido la figura en dos partes, en una se utiliza la EHE-08 y el EC-02/MC-10, en la otro se representa el ACI 209.2R y así se contempla con más claridad el comportamiento y la tendencia que siguen los datos respecto a las normas indicadas. De igual manera se podrá observar la tendencia por cada edad de ensayo.

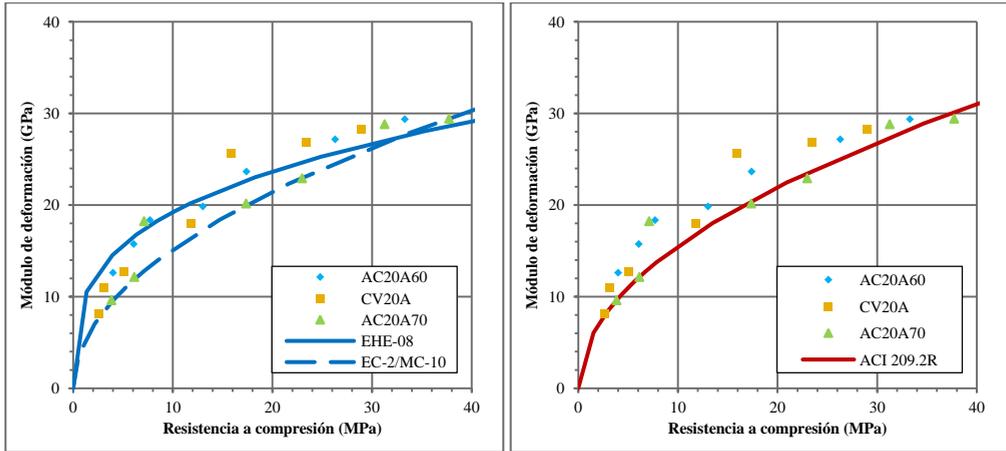


Figura 108. Detalle de la relación módulo-deformación respecto a las normas y tendencia por cada edad de ensayo

A edades tempranas, entre 24 y 48 horas, los datos tienden a ajustarse a la tendencia prevista por la EHE-08, pero a edades muy tempranas el modelo de la EHE-08 sobrestima el módulo de deformación. En cambio el mejor ajuste es propuesto por el EC-2/MC-10 y la ACI 209.2R, desde edades iniciales hasta edad de referencia, siendo estos más conservadores.

La tabla 42 muestra los valores y la resistencia a compresión correspondiente a los hormigones de tamaño máximo 12,5 mm. En estos hormigones el desarrollo del módulo de deformación sigue, en general, la misma pauta que en los hormigones de tamaño máximo 20 mm.

Tabla 43. Media de resultados a compresión y módulo de deformación.

Edad	AC12A70		CV12A		AC12B70		CV12A	
	$f_{cm}(t)$ (MPa)	$E_{cm}(t)$ (GPa)	$f_{cm}(t)$ (MPa)	$E_{cm}(t)$ (GPa)	$f_{cm}(t)$ (MPa)	$E_{cm}(t)$ (GPa)	$f_{cm}(t)$ (MPa)	$E_{cm}(t)$ (GPa)
8h	8,82	17,42	7,93	14,04	3,75	9,62	3,97	9,63
10h	12,20	19,04	8,39	16,05	6,71	12,67	5,16	11,60
12h	15,19	19,95	10,71	17,41	9,49	15,62	6,51	13,28
24h	28,24	25,53	20,61	23,67	21,19	21,15	17,99	21,38
48h	36,09	28,06	28,42	25,82	28,34	23,86	25,22	25,39
7d	43,65	30,57	33,55	30,47	39,34	29,84	28,97	28,50
28d	49,29	32,29	40,04	31,38	40,64	30,21	36,33	29,59

$f_{cm}(t)$: resistencia experimental respecto al tiempo (MPa) $E_{cm}(t)$: módulo de deformación (GPa)

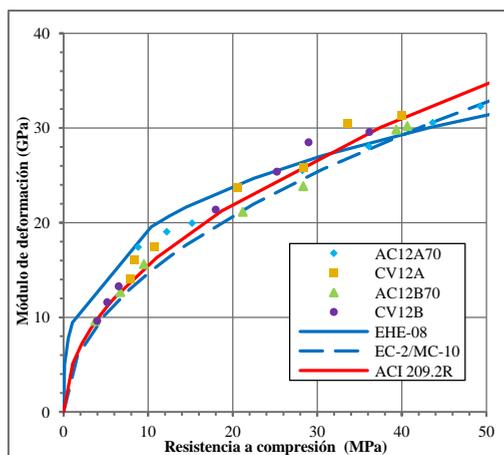


Figura 109. *Módulo de deformación en función a la resistencia a compresión de los hormigones de tamaño máximo de árido 12,5 mm*

Para evaluar como difieren los resultados experimentales con los propuestos por los modelos de los códigos, se ha dividido la figura 108 en dos partes. En una se utiliza la EHE-08 y el EC-02/MC-10, en la otra se representa el ACI 209.2R, y así se contempla con más claridad el comportamiento y la tendencia que siguen los datos respecto a las normas indicadas.

En general, el modelo de la EHE-08 sobreestima el valor del módulo de deformación, En cambio el mejor ajuste a edades iniciales es el propuesto por el EC-2/MC-10l y el ACI 209.2R, siendo el modelo EC-2/MC-10 el que mejor se ajusta desde edades iniciales hasta edad de referencia.

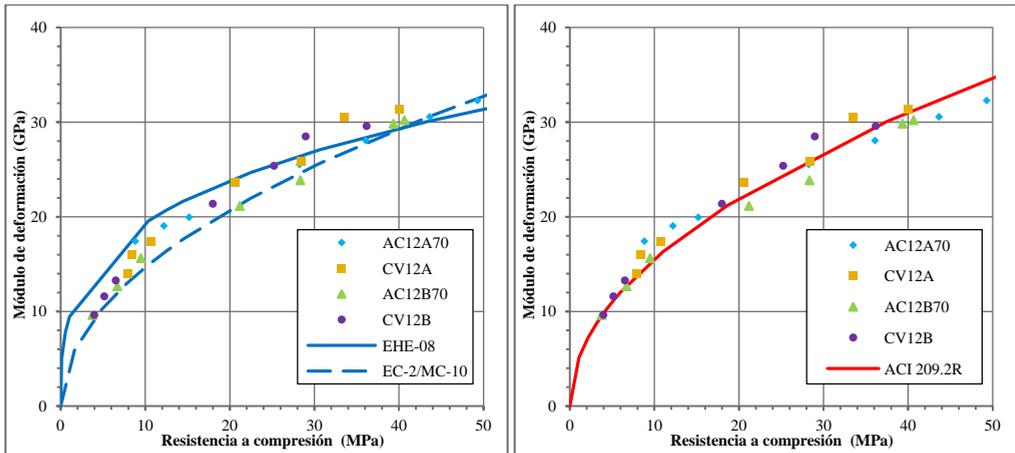


Figura 110. Detalle de la relación módulo de deformación respecto a los modelos de los códigos

4.4 Retracción

Según las especificaciones técnicas sobre los aditivos, la inclusión o el uso de los aditivos (20HE y 3425), proporcionan cierta disminución en la retracción en el hormigón, de tal manera se evaluara su comportamiento, según los resultados obtenidos para cada ensayo.

4.4.1 Pérdida de peso

La tabla 44 representa la pérdida media de peso de los hormigones estudiados a los 28 días de su fabricación

Tabla 44 Pérdida media de peso de los hormigones

Hormigón	AC20A60	CV20	AC20A70	AC12A70	CV12A	AC12B70	CV12B	
Pérdida de peso	(grs)	348	374.95	240,3	174,2	218,4	254,6	259,2
	(%)	3,58	3,88	2,52	1,80	2,30	2,78	2,75

a) Influencia de la fluidez

Contrastando los hormigones estudiados AC20A60 y AC20A70, se aprecia que hasta los 7 días presentan un comportamiento muy similar (Figura 111), pero a partir de esa edad en el hormigón de menor fluidez (AC20A60) la pérdida de peso es mayor y muy parecida a la del hormigón convencional (CV20A). De hecho, a la edad de 28 días, la

diferencia entre los hormigones AC20A70 y AC20A60 es de un 31%. y entre el CV20A y el AC20A70 es de un 36%. Esto puede deberse a que el hormigón que ha endurecido más rápidamente, que es el de mayor fluidez, adquiera más rápidamente una estructura porosa más fina que ralentiza más el proceso de evaporación del agua, lo que en teoría debería dar lugar a una retracción de secado más pequeña

Por otro lado, es probable que al estarse produciendo las reacciones de hidratación más rápidamente la cantidad de agua libre es algo menor y en consecuencia la evaporación de agua también es menor.

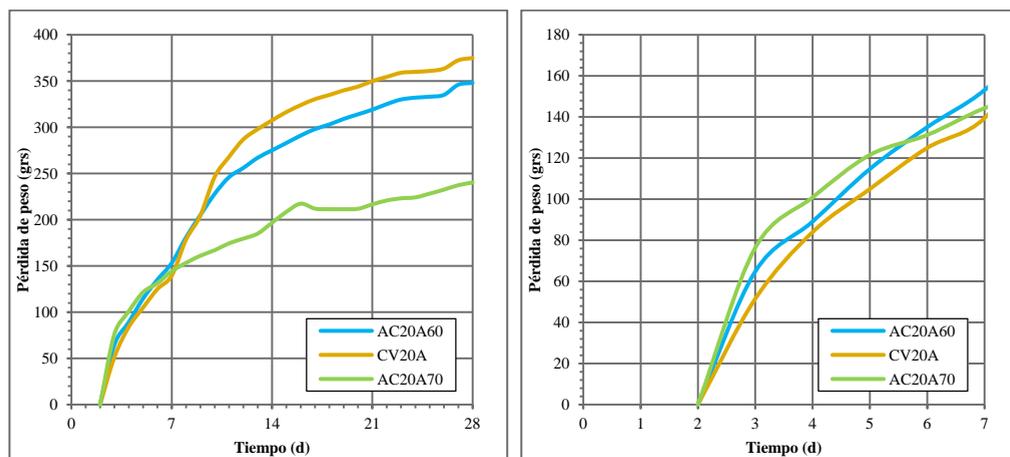


Figura 111. Pérdida de peso de hormigones de tamaño máximo de árido 20 mm

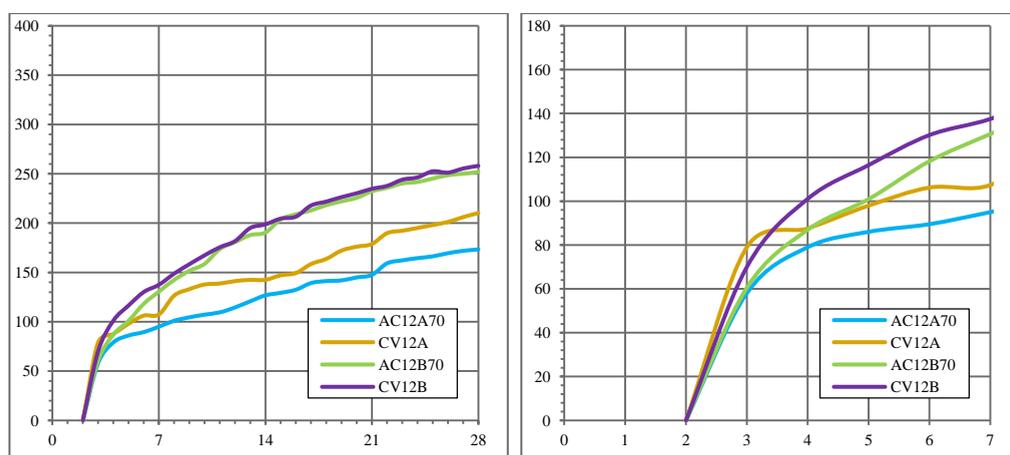


Figura 112. Pérdida de peso de hormigones de tamaño máximo de árido 12,5 mm

b) Influencia de la dosificación

Si comparamos los valores de los hormigones del mismo escurrimiento y aditivo, pero diferente tamaño máximo de árido, tipo y cantidad de cemento, se puede ver que los AC12A70 y CV12A, tienen más cantidad de cemento y de mayor categoría, presentan una pérdida de peso menor.

Los hormigones de menor tamaño máximo del árido y mayor cantidad de cemento y clase resistente, tienen una menor pérdida de peso que los hormigones de tamaño máximo de árido, excepto en el caso del AC20A70 que tiene una pérdida menor de peso equiparable a la que tienen los hormigones realizados con el aditivo Vicocrete 3425

c) Influencia del aditivo

La Figura 112 muestra que los hormigones realizados con el aditivo Viscocrete 3425 sufren más pérdida de peso que los hormigones diseñados con el aditivo Viscocrete 20HE, esto se debe a que al iniciarse el fraguado antes, las reacciones de hidratación se realizan más rápidamente y en consecuencia hay más agua combinada y se produce menor pérdida de agua por secado. Si se comparan estos resultados con los de la resistencia se comprueba que a mayor velocidad de desarrollo de la resistencia menor es la pérdida de peso, por la misma razón que se ha indicado más arriba.

4.4.2 Retracción autógena a edades tempranas

Comparación de la pérdida de volumen por retracción autógena a edades muy tempranas entre los dos tipos de HAC pero con aditivos distintos (Figura 113).

Se logra apreciar que los hormigones que presentan menos retracción a edades tempranas se da en los hormigones AC12B70 y CV12B, siendo éste el que presenta menor retracción. Esto puede ser debido a que el proceso de principio y final de fraguado que se produce con el aditivo Viscocrete 3425 es más lento respecto al aditivo Viscocrete 20HE. Así pues, al acelerarse las reacciones de hidratación, la desecación interna autógena es más rápida, dando lugar a una mayor retracción..

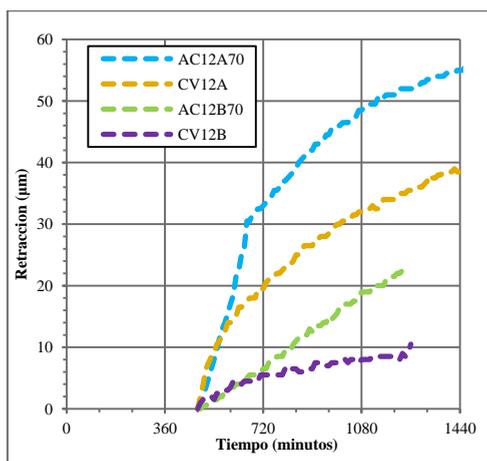


Figura 113. Comparación del HAC con aditivos distintos

4.4.3 Retracción autógena y total a partir de 48 horas

Para la representación gráfica de los resultados se ha empleado el mismo código de colores que para las propiedades mecánicas. El estado de conservación de las probetas durante el ensayo se identifica por el último número de la probeta, de acuerdo con la Tabla 44.

Tabla 45 Estados de conservación de cada probeta

Número	Estado de conservación
1	Sellada-Sellada
2	Enmoldada-Sellada
3	Sellada-Sin sellar
4, 5, 6	Enmoldada-Sin Sellar

4.4.3.1 Hormigones de tamaño máximo 20 mm

En la tabla 45 se reflejan los valores medios de la retracción autógena y total para cada uno de los hormigones. En la Figura 113 se han representado los valores medios con línea continua y los valores individuales para cada probeta con el símbolo correspondiente

Tabla 46 Valores medios de la retracción de los hormigones a la edad de 28 días

AC20A60		CV20		AC20A70	
AUTÓGENA	TOTAL	AUTÓGENA	TOTAL	AUTÓGENA	TOTAL
CP1-CP2	CP5-CP6	CP11-CP12	CP14-16	CP1-CP2	CP5-CP6
0,42	0,70	0,22	0,74	0,57	1,21

Si se comparan el AC20A60 y el AC20A70 entre sí, se puede comprobar, Figura 108, que el hormigón de menor escurrimiento tiene valores para ambos tipos de retracción menores. Esto se debe a que el proceso de hidratación es más lento y hay más humedad interna durante más tiempo.

Comparando los hormigones autocompactantes con el hormigón convencional equivalente, nuevamente se puede detectar la influencia que la cinética de hidratación tiene sobre la retracción ya que el hormigón convencional se hidrata más lentamente que los autocompactantes.

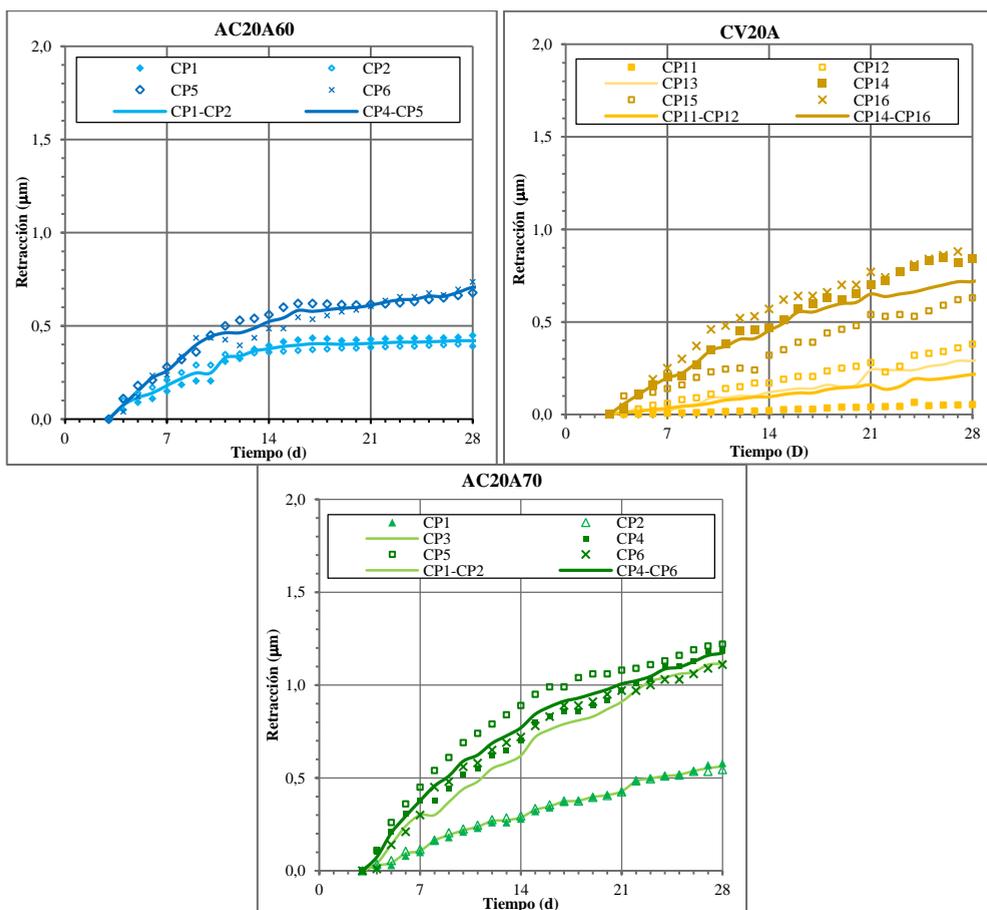


Figura 114. Retracción total y autógena de los hormigones AC20A60, CV20 y AC20A70

4.4.3.2 Hormigones de tamaño máximo 12,5 mm

En la Figura 115 se observa la retracción total y autógena para cada tipo de hormigón realizado. Se comprueba que las probetas que poseen una menor retracción, son las probetas selladas con lámina de polietileno que se corresponden con las probetas de retracción autógena.

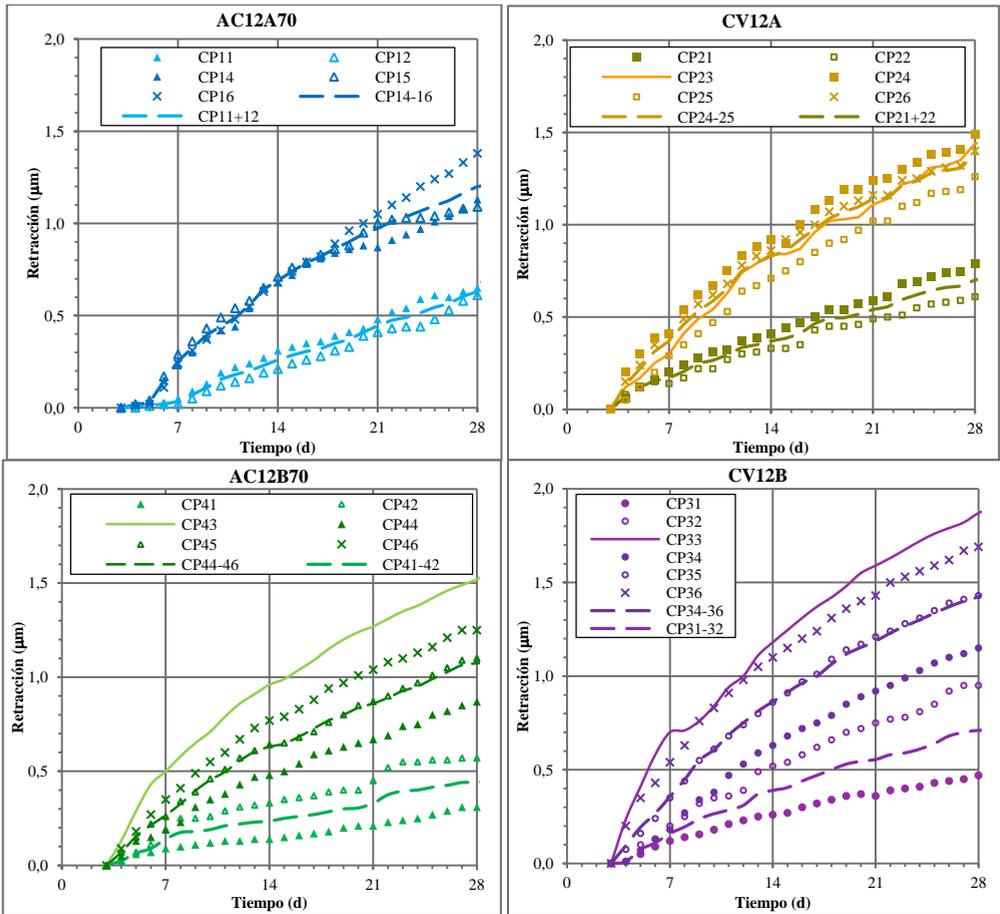
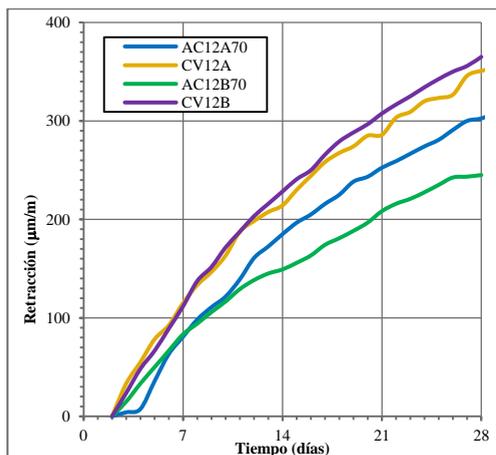
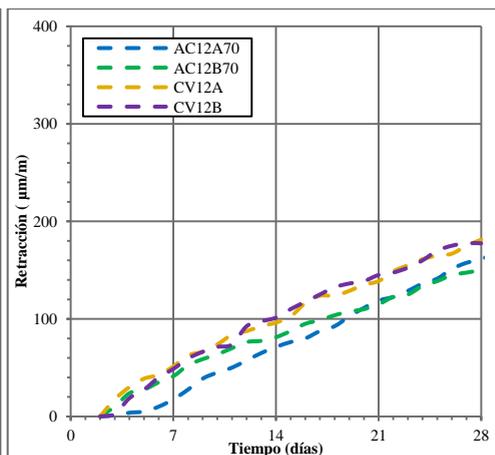


Figura 115. Retracción total y autógena de los hormigones AC12A70, CV12A, AC12B70 y CV12B

El tipo de aditivo influye en la retracción, de tal forma que los casos de mayor retracción total se observan con el aditivo Viscocrete 3425.

En las Figura 116 y Figura 117 se muestran las medias de la retracción total y autógena, respecto al tipo de hormigón en función a su aditivo correspondiente.

Figura 116. *Retracción total*Figura 117. *Retracción autógena*

De los hormigones realizados los convencionales vibrados, independientemente del tipo de aditivo utilizado, son los que presentan más retracción. Sin embargo, aunque la retracción es mayor, son los hormigones autocompactantes los que tienen más variabilidad entre sí.

En las Figuras 116 y 117 se muestra la retracción total y autógena, con las respectivas medias de los resultados obtenidos por cada tipo de hormigón.

Según lo que se planteó en el capítulo 3, de las 6 probetas por hormigón que se utilizaron para este ensayo, una probeta de las que estaba sellada desde la prueba de retracción autógena a edad temprana, se le despojo de la lámina de polietileno para evaluar su comportamiento en una etapa diferente a las demás, se determinó que estas son las que más retracción total presentan. En cambio las muestras que permanecían selladas hasta el final de cada ensayo, presentaron más retracción autógena que las que fueron selladas a partir de 48 horas de inicio de ensayo. Véase en la figura 118 con más detalle (las líneas continuas son los que identificas estos casos).

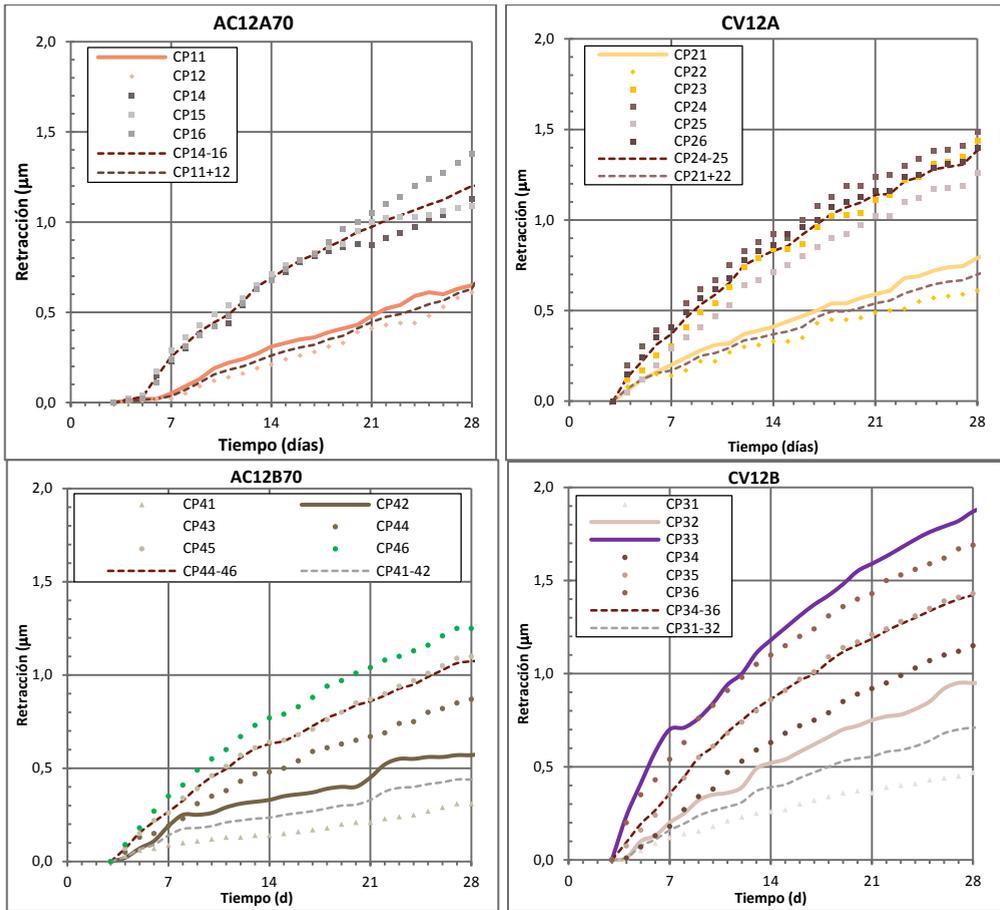


Figura 118. Diferencias entre muestras selladas y no selladas a partir de 48 horas

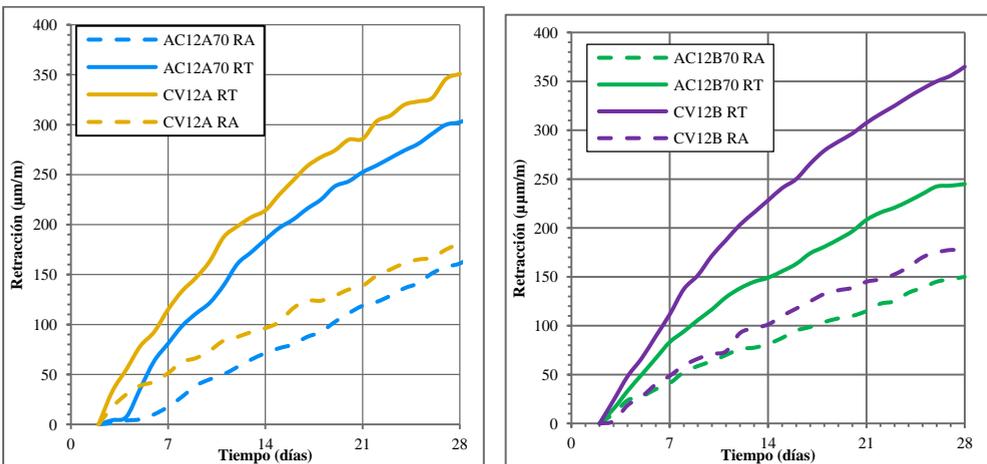


Figura 119. Retracción total y autógena por tipo de aditivo

**CAPÍTULO 5.
CONCLUSIONES Y FUTURAS
LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Con los resultados obtenidos en función de los objetivos planteados en el capítulo 1, se plantean las siguientes conclusiones. Estas conclusiones se han dividido en tres partes. Por un lado, se describen las conclusiones que hacen referencia a las pruebas mecánicas realizadas al hormigón a temprana edad. Por otro lado, se muestra un análisis un poco más conservador para los ensayos de retracción. Por último, se concluirá en el modelo de ajuste propuesto para correlacionar los fenómenos a temprana edad.

5.1 COMPORTAMIENTO REOLOGICO

La utilización de una relación a/c alta y un contenido de cemento bajo, junto con la utilización de aditivos diseñados para su uso en hormigones autocompactantes, ha permitido obtener hormigones sin exudación ni segregación, y con un adecuado comportamiento en sus condiciones de paso y fluidez.

El uso de aditivos superplastificantes en hormigón, mejora la trabajabilidad, aumenta de cohesión entre partículas, dando mayor fluidez sin tener la necesidad de añadir más agua a la mezcla

5.2 TIEMPOS DE FRAGUADO

De los ensayos realizados se concluye que la inclusión de filler calizo como adición altera los tiempos de fraguado, produciéndose un desarrollo más temprano producido por el efecto de nucleación que tiene el filler.

La estructura y composición de los aditivos superfluidificantes, aunque sean del mismo tipo, condicionan el fraguado y no necesariamente siempre en el mismo sentido.

Debido a lo anterior, se debe utilizar el aditivo adecuado para cada sistema de puesta en obra.

5.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

A las edades estudiadas, el comportamiento mecánico del hormigón además de estar condicionado por el tipo y categoría del cemento, también está influido por el tipo de aditivo y la cantidad que se haya utilizado en la dosificación.

Con respecto a la evolución de la resistencia a compresión, se ha comprobado que a edades muy tempranas el hormigón autocompactante desarrolla resistencias mayores que los hormigones convencionales vibrados.

En los hormigones estudiados se logra alcanzar el 50 al 60 % de la resistencia del hormigón a la edad de 24 horas, lo que nos permite establecer esta edad como fin de la edad temprana. Para edades de 48 horas se alcanza un 70 % de evolución de la resistencia, los cuales son mayores al propuesto por la EHE-08 a edades de 72 horas.

La utilización de aditivos del mismo tipo pero de diferente estructura de cadenas, influye en el comportamiento resistente del hormigón autocompactante tanto desde el punto de vista de su evolución como de la resistencia final.

La resistencia prevista en los códigos, a edades superiores a las 24 horas, en general, es conservadora respecto a los resultados obtenidos. Sin embargo, a edades muy tempranas la EHE-08 subestima la evolución de resistencias.

Concerniente a la evolución de la resistencia a tracción indirecta, el comportamiento establecido por las variables planteadas en esta propuesta investigativa son semejante a lo obtenidos a en los resultados a compresión. No obstante es de importancia establecer la relación existente entre la resistencia a compresión y la tracción.

Algunos autores han expuesto que la evolución de la resistencia a tracción en el HCV tiende a ser mayor que en el HAC, esto respecto a la tendencia evolutiva que corresponde en esta investigación es aceptable, aunque la diferencia no es amplia.

La relación existente entre el módulo de deformación y la compresión es muy similar para lo proyectado por las normas, a pesar que la relación más evidente entre los tipos de datos es respecto a la ACI 209.2R y el código modelo del 2010.

Ciertos autores estipulan que la inclusión de más pasta en el hormigón disminuye el resultado del módulo de deformación a edades iniciales en los HAC, en cambio los resultados obtenidos en este trabajo de tesis muestran que en el HAC se obtienen valores no muy diferentes de los obtenidos con el HCV, independientemente de cual sea la edad de ensayo. Esto puede ser debido a que la composición interna sea menos porosa y

con una microestructura más fina, proporcionando mayor densidad, a medida que evoluciona el tiempo. Todo esto a pesar de que se use una misma relación a/c de 0.65.

5.4 RETRACCIÓN

El uso de los aditivos en hormigón autocompactante puede incrementar la retracción total en el hormigón a edad temprana y posterior en condiciones ideales de temperatura y humedad.

La retracción a edades muy tempranas es mayor con la utilización de aditivos 20HE en HAC. En cambio, la utilización de aditivo 3425 proporciona menor retracción autógena a edades muy tempranas, a diferencia del 20HE. Esto puede ser debido a que el desarrollo de fraguado del 3425 es más lento.

La mayor retracción se produce en los hormigones realizados con aditivo 3425

La retracción total y autógena a partir de 48 horas, son mayores con los hormigones convencionales, sin importar el tipo de aditivo.

Los HAC presentan resultados más estables que los HCV, para la retracción autógena, secado por pérdida de peso y total. Esto puede ser debido a la inclusión de filler y la utilización en los aditivos componentes que mejoren la viscosidad del hormigón.

La utilización de lámina de polietileno permite que la pérdida de humedad sea menor en las probetas selladas evitando incremento de la retracción, en cambio las no selladas presenta lo contrario produciéndose el aumento de la retracción.

5.5 Futuras líneas de investigación

A continuación se presentan algunas propuestas para futuras líneas de investigación, en relación con la investigación desarrollada en esta tesis:

- Estudiar la influencia que sobre las propiedades a edades tempranas y muy tempranas puede tener la evolución de la temperatura, incluso sistemas de curado.
- Analizar la influencia que las condiciones de fabricación tienen sobre el inicio y desarrollo de las propiedades mecánicas y reológicas a edades muy tempranas

- Utilización de técnicas no destructivas para determinar el proceso de hidratación del hormigón y su relación con el proceso de rigidización del hormigón fresco
- Análisis, con cementos de composición distinta a los estudiados, de los parámetros que puedan influir en la resistencia y en los modelos de previsión de la resistencia.
- Estudiar la influencia de otros tipos de aditivos sobre la evolución de resistencias a edades muy tempranas y tempranas
- Estudiar la retracción desde el final del amasado hasta el final del fraguado, utilizando diferentes tipos y cantidades de cemento combinados con diferentes tipos de aditivos.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Abel J, Hover K.** Effect of water/cement ratio on the early age tensile strength of concrete. *Transp Res Rec* 1998;98(1510):33–8.
2. **ACHE** Monografía M-13:Hormigón Autocompactante: Diseño y aplicación. [Informe]..Comisión 2 GT 2/2, ACHE, 2008.
3. **ACI Committee 209** ACI 209.2R-08 Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete [Libro]..ACI, 2008.
4. **ACI Committee 237.** ACI 237R-07: Self-Consolidating Concrete. American Concrete Institute. 2007.
5. **AENOR.** Ensayos de hormigón. Determinación del tiempo de fraguado. Ed. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid. 1986.
6. **AENOR.** prNE 83 160 – Parte 1: Determinación de la resistencia del hormigón a edades tempranas. Métodos aplicables [Informe]..AENOR, 2014.
7. **AENOR.** UNE-EN 197-1. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. Ed. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid. Diciembre, 2000.
8. **AFNOR.** NF P18-508 Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité [Informe]. - 2012.
9. **Agranati Landsberger Galit.** .Estudio sobre la aplicación de los modelos de cálculo de la fluencia y retracción al hormigón autocompactable. - 2008. - Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. .
10. **Aïtcin PC.** Autogenous shrinkage measurement. In: E. Tazawa (Ed.), *Autogenous shrinkage of concrete*, Taylor & Francis, 1999c, pp. 257-268.
11. **Aïtcin PC.** Binders for durable and sustainable concrete. Taylor and Francis, London, 2008.
12. **Aïtcin PC.** Demystifyig autogenous shrinkage. *Concr. Int.*, 1999b; 21(11): 54-56.
13. **Aïtcin PC.** High performance concrete. London: E and FN Spon, 1999.
14. **Almeida Filho F.M. [y otros]** Hardened Properties of Self-Compacting Concrete — A statistical approach . *Construction and Building Materials.* - 2010. - 9 : Vol. 24. - págs. 1608-1615.
15. **Al-Saleh SA, Al-Zaid RZ.** Effects of drying conditions, admixtures and specimen size on shrinkage strains. *Cement and Concrete Research*, 2006; 36(10): 1985-1991.

16. **Ambroise J. y Pera J.** Design of self-levelling concrete. Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidation Concrete. - 2002. - págs. pp. 89-94.
17. **Anagnostopoulos NS, Georgiadis AS, Sideris KK.** Carbonation of self-compacting concretes produced with different materials. Proceedings of 5th international RILEM symposium on self-compacting concrete. Ghent, 2007. p. 721-727.
18. **Arshad AK, Cook WD, Mitchell D.** Tensile strength of low, medium and high-strength concretes at early ages. ACI Materials Journal, 1996; 93(5):487-493.
19. **Assié S, Escadeillas G, Marchese G.** Durability of self-compacting concrete. In: Wallevik O, Nielsson I editors. Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete. RILEM Publications S.A.R.L.; Reykjavik, 2003. pp. 655-662.
20. **Assié S, Escadeillas G, Waller V, Marchese G, Vachon M.** Self-compacting and vibrated concrete compared by their physico-chemical durability properties. Proceedings of 2nd North American conference on the design and use of self-consolidating concrete (SCC) and the 4th international RILEM symposium on self-compacting concrete. Chicago, 2005. p. 373-379.
21. **Assié S, Escadeillas G, Waller V.** Estimates of self-compacting concrete “potential” durability. Construction and Building Materials 2007;21(10):1909-1917.
22. **Assié S.** Durabilité des bétons autoplaçants. Phd thesis. INSA, Toulouse, 2004.
23. **Assié S.** Durabilité. Comparative des bétons autoplaçants et des bétons vibrés de même résistance mécanique. XXIII Rencontres Universitaires de Genie Civil 2005. Prix Jeunes Chercheurs. Toulouse. France. 2005.
24. **Assie S., Escadeillas G. y Marchese G.** Durability of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete. 3rd International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete..RILEM Publications, 2003. - págs. pp. 655-662.
25. **ASTM ASTM C150 / C150M - 12** Standard Specification for Portland Cement Volume 04.01 Cement; Lime; Gypsum..ASTM, 2012. - Vol. 04.02.
26. **ASTM ASTM C403 / C403M - 08:** Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance [Sección del libro] // ASTM Concrete and Aggregates Vol. 04.02..ASTM, 2008.

27. **Atrushi D.S.** Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete: Testing and Modelling . PhD Thesis, Department of Civil Engineering ; The Norwegian University of Science and Tachnology. 2003.
28. **Audenaert K, De Schutter G.** Chloride penetration in self compacting concrete. Proceedings of 3rd international RILEM symposium on self compacting concrete, pp. 818-825. Reykjavik, 2003.
29. **Barcelo L. [y otros]** Early age shrinkage of concrete: back to physical mechanisms . soncrete Science and Engineering. - 2001. - Vol. 3. - págs. pp. 85-91.
30. **Barluenga G, Palomar I, Puentes J.** Early age and hardened performance of fluid cement pastes combining mineral additions. Mater Struct 2013;46(6):921-941.
31. **Barluenga G, Puentes J, Palomar I.** Early age monitoring of self-compacting concrete with mineral additions. Construction and Building Materials, 2015; 77:66-73.
32. **Barluenga G., Puentes J. y Palomar I.** Monitorización a edades tempranas, microestructura y comportamiento endurecido de HAC con combinación de filler y adiciones minerales. 3º Congreso IberoACI 209.2R sobre hormigón autocompactante. Avances y oportunidades. - Madrid : [s.n.], 2012.
33. **Bentur A, Diamond S, Minders S.** Cracking process in steel fiber reinforced cement paste. Cement and Concrete Research 1985;15(2):331-342.
34. **Bentur A.** Chapter 1: Introduction: Overview of Early Age Cracking. Early Age Cracking in Cementitious Systems. RILEM TC 181-EAS: Final Report..RILEM Publications, 2002. - págs. 1-11.
35. **Bentz DP.** A review of early-age properties of cement-based materials. Cement and Concrete Research, 2008;38:196–204.
36. **Bissonnette B, Pierre P, Pigeon M.** Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. Cement and Concrete Research, 1999; 29(10): 1655-1662.
37. **Blitz, J. Simpson, G.,** Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing, London: Chapman and Hall, 1996.
38. **Boel V, Audenaert K, De Schutter G, Heirman G, Vandewalle L, Desmet B, Vantomme J, d’Hemricourt J, Ndambi JM.** Experimental durability evalua-

- tion of self-compacting concrete with limestone filler. Proceedings of 2nd North American conference on the design and use of self-consolidating concrete (SCC) and the 4th international RILEM symposium on self-compacting concrete. Chicago, 2005. p. 297-303.
39. **Boel V, Audenaert K, De Schutter G, Heirman G, Vandewalle L, Desmet B, Vantomme J, d'Hemricourt J, Ndambi JM.** Gas permeability of self-compacting concrete. Proceedings of 2nd North American conference on the design and use of self-consolidating concrete (SCC) and the 4th international RILEM symposium on self-compacting concrete. Chicago, 2005. p. 341-346.
 40. **Boel V, Audenaert K, De Schutter G, Heirman G, Vandewalle L, Desmet B, Vantomme J.** Transport properties of self compacting concrete with limestone filler or fly ash. *Materials and Structures* 2007c;40(5):507-516.
 41. **Boel V, Audenaert K, De Schutter G.** Behaviour of self-compacting concrete concerning frost action with deicing salts, in: O. Wallevik, I. Nielsson (Eds.), Proceedings of 3rd international RILEM symposium on self compacting concrete, Reykjavik, 2003, pp. 837-843.
 42. **Boel V, De Schutter G.** Determination of the porosity and the critical pore size of hardened self-compacting cement paste, in: G. De Schutter, V Boel (Eds.), Proceedings of 5th international RILEM symposium on self-compacting concrete, Ghent, 2007a, pp. 571-576.
 43. **Boel V, De Schutter G.** Optical and electron microscopy on the microstructure of traditional and self-compacting concrete, in: G. De Schutter, V. Boel (Eds.), Proceedings of 5th international RILEM symposium on self-compacting concrete, Ghent, 2007b, pp.577-582.
 44. **Boel V, De Schutter G.** Porosity of superplasticised cement paste containing limestone filler, *Advances in Cement Research*, 2006;18 (3): 97-102.
 45. **Bombled J.P.** Rheologie du beton frais: Influence de l'ajout de fillers aux ciments. Proc. 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro..Abla grafica, 1986. - Vol. IV. - págs. 190-196.
 46. **Bonavetti V, Donza H, Menéndez G, Cabrera O, Irassar EF.** Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy. *Cement and Concrete Research*, 2003; 33:865 – 871.

47. **Bosiljkov VB.** SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research*, 2003; 33: 1279-1286.
48. **Boulay C** Test Rig for Early Age Measurements of the Autogenous Shrinkage of a Concrete. *CONCRACK 3 – RILEM-JCI International Workshop on Crack Control of Mass Concrete and Related Issues Concerning Early-Age of Concrete Structures*, 15-16 March 2012, Paris, France . - 2012. - págs. pp. 111-122.
49. **Boulay C, Staquet S, Delsaute B, Carette J, Crespini M, Yazoghli-Marzouk O, Merliot E, Ramanich S.** How to monitor the modulus of elasticity of concrete, automatically since the earliest age? *Materials and Structures*, 2014; 47:141–155.
50. **Boulay C. y Paties C.** Mesure des déformations de béton au jeune âge . *Materials and Structures*. - 1993. - 159 : Vol. 26. - págs. pp. 307-311.
51. **Brooks J.J. y Megat-Johari M.A.** Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete . *Cement and Concrete Composite*. - 2001. - 6 : Vol. 23. - págs. 495-502.
52. **Brooks JJ, Cabrera JG, Megat Johari MA.** Factors affecting the autogenous shrinkage of silica fume high-strength concrete. In: E. Tazawa (Ed.), *Autogenous shrinkage of concrete*, Taylor & Francis, 1999, pp. 195-202.
53. **Bullard JW, Jennings HM, Livingston RA, Nonat A, Scherer G W, Schweitzer JS, Scrivener KL, Thomas JJ.** Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 2011;41:1208–1223.
54. **Byfors J.** Plain concrete at early age . Ph D. Thesis / Department of Building Materials ; Royal Institute of Technology, Stockholm..CBI Research / 80:3; CBI Betonginstitutet, 1980. - pág. 345 p..
55. **Castel A, Vidal T, Viriyametanont K, François R.** Effect of reinforcing bar orientation and location on bond with self-consolidating concrete. *ACI Structural Journal* 2006; 103(4): 559-567.
56. **CEB, Comité Euro-International du Bétón.** CEB-FIP Model Code 1990. CEB Bulletin d'Information n° 213 y 214. Ed. Thomas Telford Services Ltd. Londres. Mayo, 1993.
57. **CEN EN 206-13: Concrete - Specification, performance, production and conformity [Informe].**CEN/TC 104 - Concrete and related products. Comité Européen de Normalisation CEN, 2013a.

58. **CEN UNE-EN 1992-1-1:** Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación [Libro]..AENOR, 2013.
59. **Cetin A, Carrasquillo RL.** High-Performance concrete: Influence of coarse aggregates on mechanical properties. *ACI Materials Journal* 1998;95(3): 252-261.
60. **Chan YW, Chen YG, Liu YS.** Development of bond strength of reinforcement steel in self-consolidating concrete. *ACI Structural Journal* 2003; 100(4): 490-498.
61. **Chan YW, Chen YG, Liu YS.** Effect of consolidation on bond of reinforcement in concrete of different workabilities. *ACI Materials Journal* 2003; 100(4): 294-301.
62. **Chan YW, Liu CY, Lu YS.** Effects of slag and fly ash on the autogenous shrinkage of high performance concrete. In: E. Tazawa (Ed.), *Autogenous shrinkage of concrete*, Taylor & Francis, 1999, pp. 221-228.
63. **Chapman RA, Shah SP.** Early age bond strength in reinforced concrete. *ACI Mater. J.*, 1987; 84 (6):501-510.
64. **Chen JJ, Kwan AKH.** Adding limestone fines to reduce heat generation of curing concrete. *Magazine of Concrete Research* 2012, 64(12):1101-1111.
65. **Chopin D, Francy O, Lebourgeois S, Rougeau P.** Creep and shrinkage of heat-cured self-compacting concrete (SCC). In: Wallevik O, Nielsson I editors. *Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete*. RILEM Publications S.A.R.L.; Reykjavik, 2003, p. 672-683.
66. **Collepardi M, Borsoi A, Collepardi S, Troli R.** Strength, shrinkage and creep of SCC and flowing concrete. In: Shah SP editor. *Proceedings of 2nd North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Chicago, 2005. p. 911-919.
67. **Collepardi M., Collepardi S. y R. Troli R.** Properties of SCC and Flowing Concrete. *Proceedings of Special Session in Honor of Prof. Giacomo Moriconi, Sustainable Construction Materials and Technologies. - Coventry (U.K.)* : [s.n.], 2007. - págs. 25-31.
68. **Collepardi M., Collepardi, S., Troli, R.** Properties of SCC and Flowing Concrete. *Proceedings of Special Session in Honor of Prof. Giacomo Moriconi,*

- Sustainable Construction Materials and Technologies. - Coventry (U.K.) : [s.n.], 2007.
69. **D'Ambrosia MD, Lange DA, Brinks AJ.** Restrained shrinkage and creep of self-consolidating concrete. In: S.P. Shah (Ed.), Proceedings of 2nd North American conference on the design and use of self-consolidating concrete (SCC) and the 4th international RILEM symposium on self-compacting concrete, Chicago, 2005, pp. 921-928.
70. **D'Angelo R, Plona TJ, Schwartz LM, Coveney P.** Ultrasonic measurements on hydrating cement slurries - onset of shear wear propagation. *Adv. Cem. Based Mater.* 1995, 2 (1): 8-14.
71. **Dao VTN, Dux PF, Morris PH.** Tensile properties of early-age concrete. *ACI Mater J* 2009;106(6):483-92.
72. **Daoud A, Lorrain M, Elgonnoui M.** Résistance à l'arrachement d'armatures ancrées dans du béton auto-plaçant. *Materials and structures* 2002;35(7):395-401.
73. **Daoud A, Lorrain M, Laborderie C.** Anchorage and cracking behaviour of self-compacting concrete. In: Wallevik O, Nielsson I editors. Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self compacting concrete. RILEM Publications S.A.R.L.; Reykjavik, 2003, p. 692-702.
74. **Darquennes A, Khokhar MIA, Rozière E, Loukili A, Grondin F, Staquet S.** Early age deformations of concrete with high content of mineral additions. *Constr Build Mater* 2011;25:1836-47.
75. **De Almeida FM, De Nardin S, De Gresce ALH.** Evaluation of the bond strength of self-compacting concrete in pull-out tests. In: Shah SP editor. Proceedings of 2nd North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Chicago, 2005. p. 953-958.
76. **De Schutter G, Audenaert K, Boel V, Vandewalle L, Dupont D, Heirman G, Vantomme J, D'Hemricourt J.** Transport properties in self-compacting concrete and relation with durability: overview of a belgian research project, in: O. Wallevik, I. Nielsson (Eds.), Proceedings of 3rd international RILEM symposium on self compacting concrete, Reykjavik, 2003, pp. 799-807.

77. **De Schutter G, Audenaert K.** Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. *Materials and Structures* 2004;37(9):591-596.
78. **De Schutter G, Taerwe L.** Degree of hydration-based description of mechanical properties of early age concrete. *Mater Struct*, 1996;29:335–44.
79. **De Schutter G.** Hydration, microstructure, transport properties and durability of self-compacting concrete. 3rd North American conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete : Challenges and barriers to application (SCC 2008) / ed. Shah Surendra P..Center for Advanced Cement-Based Materials, 2008. - págs. 381-386.
80. **De Schutter G. y Taerwe L.** Degree of hydration-based description of mechanical properties of early age concrete . *Materials and Structures*. - 1996. - 190 : Vol. 29. - págs. 335-344.
81. **De Schutter G. y Taerwe L.** Towards a more fundamental non-linear basic creep model for early age concrete . *Magazine of Concrete Research*. - 1997. - 180 : Vol. 49. - págs. 195-200.
82. **Demirboga R, Türkmen I, Karakoç MB.** Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete, *Cem. Conc. Res.*, 2004, 34(12): 2329–2336.
83. **Desmet B. [y otros]** Monitoring the early-age hydration of self-compacting concrete using ultrasonic p-wave transmission and isothermal calorimetry . *Materials and Structures*. - 2011. - Vol. 44. - págs. 1537–1558.
84. **Do Q. H.** Modelling Properties of Cement Paste from Microstructure: Porosity, Mechanical Properties, Creep and Shrinkage . Ph. D. thesis / Faculté des Sciences et Techniques de l'Ingénieur ; École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL. - 2013. - pág. 183.
85. **Domone P. L.** Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies . *Cement & Concrete Composites*. - 2006. - Vol. 28. - págs. pp. 197-208.
86. **Domone P.L.** A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete . *Cement & Concrete Composites*. - 2007. - Vol. 29. - págs. pp. 1-12.
87. **Domone PL.** A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites* 2007; 29(1):1-12.

88. **Domone PL.** Proportioning of self-compacting concrete – the UCL method. Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering. 2010.
89. **Donatello S, Fernández-Jimenez A, Palomo A.** very high volume fly ash cements. early age hydration study using Na_2SO_4 as an activator. *J Am Ceram.* 2013;96:900-906.
90. **Druta C.** Tensile strength and bonding characteristics of SCC. Tesis's thesis, 2003.
91. **EFNARC** Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete [Informe]..EFNARC, 2002. - pág. 32.
92. **EFNARC.** The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use. The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.
93. **EPG** The European Guidelines for Self Compacting Concrete [Informe]..SCC European Project Group, 2005. - pág. 68.
94. **Esping O. y Löfgren I.** Investigation of Early Age Deformation in Self-Compacting Concrete. 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering / ed. Marchand J. [y otros]. - Quebec City, Canada : RILEM Publications, 2006. - págs. 207-224.
95. **Fava C, Bergol L, Fornasier G, Giangrasso F, Rocco C.**Fracture behaviour of self-compacting concrete. In: Wallevik O, Nielsson I editors. Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete. RILEM Publications S.A.R.L.; Reykjavik, 2003, p. 628-636.
96. **Felekoğlu B, Türkel S, Baradan B.** Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Building and Environment,* 2007;42(4): 1795-1802.
97. **FIB** fib Model Code for Concrete Structures 2010 [Libro]..Ernst & Young, 2013.
98. **Galan, A.,** Estimate of Concrete Strength by Ultrasonic Pulse Velocity and Damping Constant, *ACI J. Proceedings,* 1967, 64(10): 678–684.
99. **Galitz C. , Grasley, Z.** Effects of strain reversal on elastic and viscoelastic properties of early age cement paste beams . *Materials and Structures/Materiaux et Constructions.* - 2015.
100. **Garboczi E.J. y Dale P. Bentz D.P.** The Microstructure of Portland Cement-Based Materials: Computer Simulation and Percolation Theory. *Computational*

- & Mathematical Models of Microstructural Evolution - Materials Research Society Symposium Proceedings / ed. J.W. Bullard R. Kalia, M. Stoneham, L-Q. Chen. - 1998. - Vol. 529. - págs. 89-100.
101. **García Ballester LV.** [y otros] Study of Robustness of Self-Compacting Concretes Made with Low Fines Content . Journal of Materials in Civik Engineering..ASCE, 2013. - 4 : Vol. 25.
 102. **Gardner N. J.** Effect of temperature on early-age properties of type I, type II, type III, and fly ash concrete . ACI Materials Journal. - 1990. - 1 : Vol. 87. - págs. pp 68-78.
 103. **Gardner N. J., Scanlon, A.** Long-term deflections of two-way slabs . Concrete International. - 1990a. - 1 : Vol. 12. - págs. 63-67.
 104. **Gartner E.M.** [y otros] Hydration of portland cement [Sección del libro] // Structure and performance of cements / ed. Barnes Bentsed and..Spoon Pres, 2002.
 105. **Ghezal A. y KH. Khayat KH.** Optimizing self-consolidating concrete with limestone filler by using statistical factorial design methods . ACI Materials Journal. - 2002. - 3 : Vol. 99. - págs. 264-272.
 106. **Gibbs JC, Zhu W.** Strength of hardened self compacting concrete. In: Skarendhal A, Petersson Ö, editors. Proceedings of 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, 1999. p. 199-209.
 107. **González M.** El Comportamiento del Filler Calizo en los Concretos Autocompactos. ASOCEM. 2002.
 108. **Grünwald S.** Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete. PhD thesis, Delft University of Technology. Delf University Press. 2004.
 109. **Gu H, Song G, Dhonde H, Mo YL, Yan S.** Concrete early-age strength monitoring using embedded piezoelectric transducers. Smart Mater Struct 2006;15(6):1837-45.
 110. **Gu P, Xie P, Beaudoin JJ.** Microstructural characterization of the transition zone in cement systems by means of A. C. impedance spectroscopy. Cement and Concrete Research, 1993, 23: 581-591.

111. **Gutsch A.** Properties of Early Age Concrete - Experiments and Modelling. RILEM International Conference on 'Early Age Cracking in Cementitious Systems' (EAC'01). - 2001. - págs. 11-18.
112. **Hammer TA, Fossa KT, Bjøntegaard Ø.** Cracking tendency of HSC: tensile strength and self generated stress in the period of setting and early hardening. *Mater Struct*, 2007;40:319-24.
113. **Hammer TA, Johansen K, Bjøntegaard Ø.** Volume changes as driving forces to self-induced cracking of norwegian SCC. In: Ozawa K, Ouchi M editors. Proceedings of the 2nd international RILEM symposium on self-compacting concrete. Published by COMS Engineering Corporation; Tokyo, 2001, p. 423-432.
114. **Hammer TA.** The influence of some mix design parameters on drying shrinkage of SCC. In: G. De Schutter, V. Boel (Eds.), Proceedings of 5th international RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM Publications S.A.R.L., Ghent, 2007, pp. 559-564.
115. **Hannant DJ, Branch J, Mulheron M.** Equipment for tensile testing of fresh concrete. *Mag Concr Res* 1999;51(4):263-7.
116. **Hans-Èrik G, Pentti P.** Properties of SCC-especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance. In: Skarendahl Å, Petersson Ö editors. Proceedings of the 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete. RILEM Publications S.A.R.L.; Stockholm, 1999, p. 211-225.
117. **Hauke B.** Self-compacting concrete for precast concrete products in Germany". In: Ozawa K, Ouchi M editors. Proceedings of the 2nd international RILEM symposium on self-compacting concrete. Published by COMS Engineering Corporation; Tokyo, 2001, p. 633-642.
118. **Heirman G, Vandewalle L, Van Gemert D.** Influence of mineral additions and chemical admixtures on setting and volumetric autogenous shrinkage of SCC-equivalent-mortars. In: G. De Schutter, V. Boel (Eds.), Proceedings of 5th international RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM Publications S.A.R.L., Ghent, 2007, pp. 553-558.
119. **Heirman G, Vandewalle L.** The influence of fillers on the properties of self-compacting concrete in fresh and hardened state. In: Wallevik O, Nielsson I editors. Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete. RILEM Publications S.A.R.L.; Reykjavik, 2003, p. 606-618.

120. **Hoffmann C, Leemann A.** Homogeneity of structures made with self-compacting concrete and conventional concrete. In: Wallevik O, Nielsson I, editors. Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Reykjavik, 2003. p. 619-627.
121. **Holschemacher K.** Hardened material properties of self-compacting concrete . Journal of Civil Engineering and Management. - 2003. - 4 : Vol. 10. - págs. pp. 261-266.
122. **Holt E, Leivo M.** Cracking risks associated with early age shrinkage. Cement Concr Compos 2004;26:521–30.
123. **Holt E.E.** Early age autogenous shrinkage of concrete [Informe]. Technical Research Centre of Finland (VTT),, 2001. - VTT Publications 446.
124. **Hongyu S, Jinrui Z, Tianyuan F, Zongjin L.** Electrical method to evaluate elastic modulus of early age concrete. Construction and Building Materials, 2015;101:661-666.
125. **Ichimiya K, Yamasaki T, Hashimoto C.** The influence of surface void characteristics on the durability and appearance of self-compacting concrete. Proceedings of 5th international RILEM symposium on self-compacting concrete. Ghent, 2007. p. 805-810.
126. **Jennings HM.** A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste. Cement and Concrete Research, 2000;30:101-116.
127. **Jensen OM, Hansen PF.** Autogeneous deformation and change of the relative humidity in silica fume–modified cement paste. ACI Mater. J., 1996; 93(6): 539-543.
128. **Jin X. y Li Z.** Investigation on mechanical properties of young concrete . Materials and Structures/ Materiaux et Constructions. - 2000. - Vol. 33. - págs. pp 627-633.
129. **Jooss M, Reinhardt HW.** Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature, Cement and Concrete Research 32 (9) (2002) 1497-1504.
130. **Kaminetzky D, Stivaros PC.** Early-age concrete: construction loads, behavior, and failures. ACI Concrete International 1994, 16 (1): 58-63.
131. **Kaminetzky D. y Stivaros P. C.** Early-age concrete: construction loads, behavior, and failures. Concr Int 1994;16(1):58–63. . Concrete International. - 1994. - Vol. 1. - págs. pp. 58-63.

132. **Kanstad T.** [y otros] Mechanical properties of young concrete: Evaluation of test methods for tensile strength and modulus of elasticity. Determination of model parameters [Informe]. - 1999.
133. **Kasai Y, Yokoyama K, Matsui I.** Tensile properties of early age concrete. In: 'Mechanical behavior of materials', society of materials science, Japan, vol. 4; 1972. pp. 288-99.
134. **Khan A.A.** Concrete Properties and Thermal Stress Analysis of Members at Early-ages . PhD Thesis / Department of Civil Engineering and Applied Mechanics ; McGill University. - 1995.
135. **Khan A.A., Cook W.D. y Mitchell D.** Tensile Strength of Low, Medium, and High-Strength Concretes at Early Ages . ACI Materials Journal. - 1996. - 5 : Vol. 93. - págs. pp. 487-493.
136. **Khayat KH, Manai K, Trudel A.** In situ mechanical properties of wall elements cast using self-consolidating concrete. ACI Materials Journal 1997;94(6):491-500.
137. **Khayat KH, Tremblay S, Paultre P.** Structural response of self-consolidating concrete columns. In: Skarendhal A, Petersson Ö, editors. Proceedings of 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, 1999. p. 291-306.
138. **Khayat KH.** Use of viscosity-modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete. ACI Materials Journal 1998;95(2):158-167.
139. **Kim JK, Han SH, Park YD, Noh JH.** Material properties of self flowing concrete. J. Mater. Civ. Eng., 1998; 10(4): 244-249.
140. **Klug Y, Holschemacher K.** Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete. In: Wallevik O, Nielsson I editors. Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete. RILEM Publications S.A.R.L.; Reykjavik, 2003, p. 596-605.
141. **Klug Y. y Holschemacher K.** Comparison of the hardened properties of self compacting and normal vibrated concrete. Proceedings 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete / ed. Nielsson O. Wallevik and I...RILEM Publications, 2003. - págs. 596-605.

142. **Koehler E. P.** [y otros] Self-Consolidating Concrete for Precast Structural Applications: Mixture Proportions, Workability and Early-Age Hardened Properties . CTR Technical Report / Center for Transportation Research ; The University of Texas at Austin. - 2007. - pág. 348 pp. - 0-5134-1.
143. **König G, Holschemacher K, Dehn F, Weiße D.** Bond of reinforcement in self-compacting concrete (SCC) under monotonic and cyclic loading. In: Wallevik O, Nielsson I, editors. Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Reykjavik, 2003. p. 939-947.
144. **König G, Holschemacher K, Dehn F, Weiße D.** Self-compacting concrete-time development of material properties and bond behaviour. In: Ozawa K, Ouchi M editors. Proceedings of the 2nd international RILEM symposium on self-compacting concrete. Published by COMS Engineering Corporation; Tokyo, 2001, p. 507-516.
145. **Kovler K.** 'Testing system for determining the mechanical behavior of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage . Materials and Structures. - 1994. - 170 : Vol. 27. - págs. pp. 324-330.
146. **Leemann A, Münch B, Gasser P, Holzer L.** Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete. Cement and Concrete Research, 2006;36(8): 1425-1433.
147. **Leemann A. y Hoffmann C.** Properties of self-compacting and conventional concrete – differences and similarities . Magazine of Concrete Research. - 2005. - No. 6, : Vol. 57. - págs. pp. 315-319.
148. **Lew H. S. y Reichard T. W.** 'Mechanical properties of concrete at early ages', ACI Journal 175 (10) (1978) 533-542. . ACI Journal of Materials. - 1978. - 10 : Vol. 75. - págs. 533-542.
149. **Lew HS, Reichard TW.** Mechanical properties of concrete at early ages. ACI J. Proc. 1978;75(10):533-542.
150. **Li LG, Kwan AKH.** Adding limestone fines as cementitious paste replacement to improve tensile strength, stiffness and durability of concrete. Cement and Concrete Composites 2015, 60:17-24.
151. **Li Z.** Advanced Concrete Technology [Libro]. - 2011.
152. **Lim SN, Wee TH.** Autogenous shrinkage of ground-granulated blast-furnace slag concrete. ACI Mater. J., 2000; 97(5): 587-593.

153. **Lin Y, Lai CP, Yen T.** Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete, *ACI Mat. J.*, 2003, 100(1): 21–28.
154. **Losler R, Leemann A.** Effects of curing time and drying behaviour of SCC in case of restrained shrinkage deformations. In: G. De Schutter, V. Boel (Eds.), *Proceedings of 5th international RILEM symposium on self-compacting concrete*, RILEM Publications S.A.R.L., Ghent, 2007, pp. 539-544.
155. **Lothenbach B, Le Saout G, Gallucci E, Scrivener K.** Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 2008; 38 (1):1-18.
156. **Lothenbach B, Winnefeld F.** Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 2006; 36 (2):209-226.
157. **Lowke D, Wiegink K, Schiessl P.** A simple and significant segregation test for SCC. In: O. Wallevik, I. Nielsson (Eds.), *Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete*, RILEM Publications S.A.R.L., Reykjavik, 2003, pp. 358-366.
158. **Makishima O, Tanaka H, Itoh Y, Komada K, Satoh F.** Evaluation of mechanical properties and durability of super quality concrete. In: Ozawa K, Ouchi M editors. *Proceedings of the 2nd international RILEM symposium on self-compacting concrete*. Published by COMS Engineering Corporation; Tokyo, 2001, p. 475-482.
159. **Markovich I, Grünwald S, Walraven JC.** Characterization of bond between steel fibres and concrete – conventional fibre reinforced versus self-compacting fibre reinforced concrete. *Proceedings of 3rd International Symposium on Bond in Concrete*. Budapest, 2002. p. 520-528.
160. **Martin H.** Bond performance of ribbed bars (pull-out tests) – Influence of concrete composition and consistency. In: *Bond in concrete*, pp 289-299, edited by P. Bartos, 1982
161. **Martí-Vargas J. R. [y otros]** Comportamiento adherente del hormigón autocompactante en transmisión y anclaje . *Materiales de Construcción*. - 2006. - 284 : Vol. 56. - págs. pp. 27-42.
162. **Meddah M. S. y Tagnit-Hamou A.** Evaluation of Rate of Deformation for Early-Age Concrete Shrinkage Analysis and Time Zero Determination. . *Journal of Materials in Civil Engineering*. - 2011. - 7 : Vol. 23. - págs. 1076–1086..

163. **Mehta P, Monteiro P.** Concrete: Microstructure, properties, and materials. 3rd edn. McGraw-Hill, New York. 2006.
164. **Mehta P.** Concrete: Structure, properties and materials, Prentice Hall D.L. 2nd ed., 1993.
165. **MFOM** Instrucción para el Hormigón Estructural EHE-08 [Libro]. Ministeriode Fomento, 2012. - 5ª ed. : pág. 456.
166. **Mihashi H. y Leite J.P.** State-of-the-Art Report on Control of Cracking in Early Age Concrete . Journal Of Advanced Concrete Technology 2(2):141-154 .
167. **Mindess S, Young F.** Concrete. Prentice-Hall. 1981.
168. **Moir G, Kelham S.** Developments in manufacture and use of portland limestone cement, in: V.M. Malhotra (Ed.), Proceedings of High Performance Concrete, ACI SP-172, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1997, pp. 797 – 819.
169. **Nahlawi H, Chakrabarti S, Jodikara J.** A direct tensile strength testing method for unsaturated geomaterials. Geotech Test J 2004;27(4):1–6.
170. **Nehdi M y Soliman A.M.** Early-age properties of concrete: overview of fundamental concepts and state-of-the-art research . Proceedings of the ICE - Construction Materials, Volume 164, Issue 2. - 2011. - 2 : Vol. 164. - págs. 57-77.
171. **Nehdi M, Pardhan M, Koshowski S.** Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements. Cement and Concrete Research, 2004; 34: 2103- 2112.
172. **Nehdi M. y Rahman M.** Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials. Cement and concrete Research. - 2000. - 10 : Vol. 30. - págs. 1663-1669.
173. **Nehdi M., Soliman, A.M.** Early-age properties of concrete: overview of fundamental concepts and state-of-the-art research .Proceedings of the ICE Construction Materials..ICE, 2011. - 2 : Vol. 164.
174. **Neville A .M.** Tecnología del hormigón. Ed. Limusa, S.A. 1988.
175. **Neville AM.** Properties of concrete. 4th edition. Longman Group, London, 1996.
176. **Newlands M. D., Paine, K. A., Vemuri, N. A. and Dhir, R. K.** A linear test method for determining early-age shrinkage of concrete . Magazine of Concrete Research. - 2008. - 10 : Vol. 60. - págs. 747-757.

177. **Oluokun FA, Burdette EG, Deatherage JH.** Splitting tensile strength and compressive strength relationship at early ages. *ACI Materials Journal*, 1991; 88(2):115-121.
178. **Østergaard L.** Early-Age Fracture Mechanics And Cracking of Concrete. Experiments and Modelling : DTU-Tryk (Denmark), 2003. - pág. 299.
179. **Ozawa K, Maekawa K, Kunishima M, Okamura H.** Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures. In: Okamura H, Shima H, editors. Second East-Asia and Pacific conference on structural engineering and construction, Kochi, Japan 1; 1988. p. 445–50.
180. **Parra C, Valcuende M, Gómez F.** Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 2011; 25(1):201-207.
181. **Parra C.** Estudio experimental del comportamiento en estado endurecido de los hormigones autocompactantes. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2005.
182. **Pedersen B, Smeplás S.** The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase. In: Wallevik O, Nielsson I editors. Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete. RILEM Publications S.A.R.L.; Reykjavik, 2003.
183. **Péra J., Husson S. y Guilhot B.** Influence of finely ground limestone on cement hydration. . *Cement and Concrete Composites*. - 1999. - Vol. 21. - pág. p. 99–105.
184. **Persson B.** A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. *Cement and Concrete Research*, 2001; 31(2): 193-198.
185. **Persson B.** Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete. In: A. Skarendhal, Ö. Petersson (Eds.), Proceedings of 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, 1999, pp. 239-250.
186. **Petrov N, Khayat KH, Tagnit-Hamou A.** Effect of stability of self-consolidating concrete on the distribution of steel corrosion characteristics along experimental wall elements. In: Ozawa K, Ouchi M, editors. Proceedings of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Tokyo, 2001. p. 441-450.

187. **Piérard J, Dieryck V, Desmyter J.** Autogenous shrinkage of self-compacting concrete. In: S.P. Shah (Ed.), Proceedings of 2nd North American conference on the design and use of self-consolidating concrete (SCC) and the 4th international RILEM symposium on self-compacting concrete, Chicago, 2005, pp. 1013-1021.
188. **Pigeon M. [y otros]** Étude expérimentale du retrait endogène restreint au jeune âge . Materials and Structures / Matériaux et Constructions,. - 2003. - Vol. 36. - págs. 666-672.
189. **Pons G, Proust E, Assié S.** Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete? In: O. Wallevik, I. Nielsson (Eds.), Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM Publications S.A.R.L., Reykjavik, 2003, pp. 645-654.
190. **Popovics S.** Strength and Related Properties of Concrete: A Quantitative Approach. Joh Wiley & Sons, 1998. - pág. 535.
191. **Poppe AM, De Schutter G.** Cement hydration in the presence of high filler contents. Cement and Concrete Research, 2005;35:2290-2299.
192. **Puertas F, Alonso MM, Vázquez T.** Effect of polycarboxylate admixtures on portland cement paste setting and rheological behaviour. Materiales de Construcción 2005a;55(277): 61-73.
193. **Puertas F, Santos H, Palacios M, Martínez-Ramírez S.** Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour. Advances in Cement Research 2005b;17(2): 77-89.
194. **Qizhe H.** Setting behavior and shrinkage of high performance pavement concrete: Effect of supplementary cementitious materials, chemical admixtures and temperature . Tesis thesis / Iowa State University. - 2013. - pág. 84 p..
195. **Quennoz A, Scrivener KL.** Hydration of C₃A-gypsum systems, Cement and Concrete Research 2012;42:1032-1041.
196. **Rao GA.** Long-term drying shrinkage of mortar – influence of silica fume and size of fine aggregate, Cement and Concrete Research, 2001; 31(2): 171-175.
197. **Ravina D, Shalon R.** Plastic shrinkage cracking. ACI J 1968;65(22):282-294.
198. **Reinhardt HW, Grosse CU.** Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete. Constr Build Mater 2004;18(3):145–54.

199. **Rigueira. J.W., García-Taengua, E., Serna-Ros, P.** Self-consolidating concrete robustness in continuous production regarding fresh and hardened state properties . *ACI Materials Journal*..ACI, 2009. - 3 : Vol. 106.
200. **RILEM** Properties of set concrete at early-ages . *Materials and Structures* / ed. 42-CEA RILEM Commission. - 1981. - 84 : Vol. 14. - págs. 399-460.
201. **RILEM** Self-Compacting Concrete – State-of-the-Art report. RILEM report 23 / ed. Skarendahl A Petersson O. RILEM publications, 2000.
202. **RILEM.** Properties of set concrete at early-ages. (R. C. 42-CEA, Ed.) *Materials and Structures*, 1981;14(84), 399-460.
203. **Robeyst N, Gruyaert E, Grosse CU, De Belie N.** Monitoring the setting of concrete containing blast-furnace slag by measuring the ultrasonic p-wave velocity. *Cement and Concrete Research*, 2008;38:1169-1176.
204. **Rols S, Ambroise J, Péra J.** Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete. *Cement and Concrete Research*, 1999; 29(2): 261-266.
205. **Roncero J, Gettu R.** Influencia de los superplastificantes en la microestructura de la pasta hidratada y en el comportamiento diferido de los morteros de cemento. *Cemento-hormigón*, 2002;832:12-28.
206. **Rougeau P, Maillard JL, Mary-Dippe C.** Comparative study on properties of self-compacting and high performance concrete used in precast construction. *Proceedings of 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete*. Stockholm, 1999. p. 251-261.
207. **Roziere E, Cortas R, Loukili A.** Tensile behaviour of early age concrete: New methods of investigation. *Cement and Concrete Composites*, 2015; 55: 153-161.
208. **Rozière E, Granger S, Turcry P, Loukili A.** Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2007; 29(8):26-36.
209. **Rozière E, Loukili A, Cussigh F.** A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation. *Construction and Building Materials*, 2009; 23(1): 190-199.
210. **Rozière E, Turcry P, Loukili A.** Influence of paste volume, addition content and addition type on shrinkage cracking of self-compacting concrete. In: S.P. Shah (Ed.), *Proceedings of 2nd North American conference on the design and*

- use of self-consolidating concrete (SCC) and the 4th international RILEM symposium on self-compacting concrete, Chicago, 2005, pp. 945-951.
211. **Sant G., Lura P. y Weiss J.** Measurement of Volume Change in Cementitious Materials at Early Ages: Review of Testing Protocols and Interpretation of Results . Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. - 2006. - Vol. 1979. - págs. p. 21-29.
 212. **Santhanam M. y Subramanian S.** Current developments in self-compacting concrete . The Indian Concrete Journal. - 2004. - págs. 11-22.
 213. **Schiessl A, Zilch K.** The effects of the modified composition of SCC on shear and bond behaviour. In: Ozawa K, Ouchi M, editors. Proceedings of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Tokyo, 2001. p. 501-506.
 214. **Seddik M, Tagnit-Hamou A.** Pore structure of concrete with mineral admixtures and its effect on self-desiccation shrinkage. ACI Materials Journal, 2009; 106(3): 241-250.
 215. **Seng V, Shima H.** Creep and shrinkage of self-compacting concrete with different limestone powder contents. In: S.P. Shah (Ed.), Proceedings of 2nd North American conference on the design and use of self-consolidating concrete (SCC) and the 4th international RILEM symposium on self-compacting concrete, Chicago, 2005, pp. 981-985.
 216. **Shuker MT, Memon KR, Tunio SQ, Memon MK.** Laboratory investigation on performance of cement using different additives schemes to improve early age compressive strength. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2014; 7(11): 2298-2305.
 217. **Skarendhal A, Petterson Ö.** In: Skarendhal A, Petersson Ö, editors. Proceedings of 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, 1999.
 218. **Sonebi M, Bartos PJM, Zhu W, Gibbs J, Tamimi A.** Task 4. Properties of hardened concrete, Final report, Brite EuRam Project No. BE96-3801/Contact BRPR-CT96-0366, 2000, 73 pp.
 219. **Sonebi M, Bartos PJM.** Hardened SCC and its bond with reinforcement. In: Skarendhal A, Petersson Ö, editors. Proceedings of 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, 1999. p. 275-289.

220. **Sonebi M, Ibrahim R.** Assessment of the durability of medium strength SCC from its permeation properties, in: G. De Schutter, V Boel (Eds.), Proceedings of 5th international RILEM symposium on self-compacting concrete, Ghent, 2007, pp. 677-682.
221. **Song HW, Byun KJ, Kim SH, Choi DH.** Early-age creep and shrinkage in self-compacting concrete incorporating GGBFS. In: Ozawa K, Ouchi M editors. Proceedings of the 2nd international RILEM symposium on self-compacting concrete. Published by COMS Engineering Corporation; Tokyo, 2001, p. 413-422.
222. **Song X, Wu Y, Gu X, Chen C.** Bond behaviour of reinforcing steel bars in early age concrete. *Construction and Building Materials*, 2015;94:209-217.
223. **Spengler A, Schiessl P.** Sand-rich self compacting concrete. In: Ozawa K, Ouchi M, editors. Proceedings of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Tokyo, 2001.
224. **Su N; Hsu K, Chai H.** A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 2001;31(12): 1799-1807.
225. **Sukumar B, Nagamani K, Srinivasa R.** Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash. *Construction and Building Materials* 2008; 22:1394-1401.
226. **Sukumar B., Nagamani, K., Raghavan, R.** Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash . *Construction and Building Materials*. - 2008. - Vol. 22. - págs. 1394-1401.
227. **Suraneni P. [y otros]** Set time measurements of self-compacting pastes and concretes using ultrasonic . *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*. - 2015. - 1 : Vol. 27.
228. **Tam VWY, Gao XF, Tam CM.** Carbonation around near aggregate regions of old hardened concrete cement paste. *Cement and concrete research* 2005;35(6):1180-1186.
229. **Tangtermsirikul S.** Effect of chemical composition and particle size of fly ash on autogenous shrinkage of paste. In: E. Tazawa (Ed.), *Autogenous shrinkage of concrete*, Taylor & Francis, 1999, pp. 175-186.
230. **Tattersal GH.** *Workability and quality control of concrete*. E&FN Spon. Londres, 1991.
231. **Taylor HFV.** *Cement chemistry*. Ed. Thomas Telford. London, 1997.

232. **Taylor P.C. [y otros]** Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manua [Informe] / Federal Highway Administration..Iowa State University, 2007. - FHWA HIF - 07 - 004.
233. **Tazawa E, Miyazawa S.** Effect of constituents and curing conditions on autogenous shrinkage of concrete. In: E. Tazawa (Ed.), Autogenous shrinkage of concrete, Taylor & Francis, 1999, pp. 269-280.
234. **Tazawa E, Miyazawa S.** Influence of constituent and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials. Magazine of Concrete Research, 1997; 49(178): 15-22.
235. **Thrane L. N., Pade C, y Nielsen C, V.** Determination of Rheology of Self-Consolidating Concrete Using the 4C-Rheometer and How to Make Use of the Results . Journal of ASTM International . - 2010. - 1 : Vol. 7.
236. **Thrane L.N., Pade C. y Svensson T.** Estimation of Bingham rheological parameters of SCC from slump flow measurement. Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete - SCC 2007..RILEM, 2007. - Vol. 1. - págs. 353-358.
237. **Torrenti J.M.** La résistance du béton au très jeune âge [Publicación periódica]. - 1992.
238. **Trägårdh J.** Microstructural features and related properties of self-compacting concrete, in: A. Skarendhal, Ö. Petersson (Eds.), Proceedings of 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, 1999, pp. 175-186.
239. **Träghard J, Skoglung P, Westerholm M.** Frost resistance, chloride transport and related microstructure of field self-compacting concrete. Proceedings of 3rd international RILEM symposium on self compacting concrete. Reykjavik, 2003.
240. **Turcry P, Loukili A.** A study of plastic shrinkage of self-compacting concrete. In: Wallevik O, Nielsson I editors. Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete. RILEM Publications S.A.R.L.; Reykjavik, 2003, p. 576-585.
241. **Turcry P. [y otros]** Cracking tendency of selfcompacting concrete subjected to restrained shrinkage: experimental study and modeling . Journal of Materials in Civil Engineering ASCE. - 2006. - 1 : Vol. 18. - págs. pp. 46-54.

242. **Ulucan ZÇ, Türk K, Karatas M.** Effect of Mineral Admixtures on the Correlation between Ultrasonic Velocity and Compressive Strength for Self-Compacting Concrete. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2008, 44(5): 367-374.
243. **Valcuende M, Benito F, Parra C, Miñano I.** Shrinkage of self-compacting concrete made with blast furnace slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 2015; 76:1-9.
244. **Valcuende M, Marco E, Parra C, Serna P.** Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* 2012b; 42:583-592.
245. **Valcuende M, Parra C, Benlloch J.** Permeability, porosity and compressive strength of self-compacting concretes. *Materiales de Construcción*, 2005; 55 (280):17-25.
246. **Valcuende M, Parra C, Ferrer A.** Uniformity of SCC properties cast in vertical column. *Magazine of Concrete Research* 2009; 61(3):183-191.
247. **Valcuende M, Parra C, Jarque JC.** Self-consolidating concrete homogeneity. *Materiales de Construcción*, 2007; 57 (287):37-52.
248. **Valcuende M, Parra C, Marco E, Garrido A, Martínez E, Cánoves J.** Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the porous structure of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 2012a, 28: 122–128.
249. **Valcuende M, Parra C.** Natural carbonation of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, 2009;24:848-853.
250. **Valcuende M., Parra C.** Bond behaviour of reinforcement in self-compacting concretes. *Construction and Building Materials* 2009;23(1):162-170.
251. **Venkiteela G, Sun Z, Najm H.** Prediction of early age normal concrete compressive strength based on dynamic shear modulus measurements. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2013, 25(1): 30-38.
252. **Vieira M, Bettencourt A.** Deformability of hardened SCC. In: O. Wallevik, I. Nielsson (Eds.), *Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete*, RILEM Publications S.A.R.L., Reykjavik, 2003, pp. 637-644.

253. **Voigt T, Malonn T, Shah SP.** Green and early age compressive strength of extruded cement mortar monitored with compression tests and ultrasonic techniques. *Cement and Concrete Research*, 2006b; 36: 858-867.
254. **Voigt T, Sun Z, Shah SP.** Comparison of ultrasonic wave reflection method and maturity method in evaluating early-age compressive strength of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 2006a; 28:307-316.
255. **Voigt T.** The application of an ultrasonic shear wave reflection method for non-destructive testing of cement-based materials at early ages: an experimental and numerical analysis. PhD Thesis, Leipzig, University of Leipzig, Germany, Nordstedt, 2005.
256. **Wang D, Zhu H.** Monitoring of the strength gain of concrete using embedded PZT impedance transducer. [Conferencia] //2011;25(9):3703-3708.
257. **Wang G, Zheng J.** Bond behaviors of self-compacting concrete. In: Yu Z, Shi C, Khayat KH, Xie Y, editors. *Proceedings of 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete*. China: Changsha, 2005. p. 465-471.
258. **Wei X, Xiao L.** Influence of the aggregate volume on the electrical resistivity and properties of Portland cement concretes. *J. Wuhan Univ. Technol.-Mater. Sci. Ed.* 26, 2011, 965–971.
259. **Wongtanakitcharoen T. y Naaman A.E.** Unrestrained early-age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers . *Materials and Structures*. - 2007. - 3: Vol. 40.- págs. 289-300.
260. **Xiao L, Wei X.** Early age compressive strength of pastes by electrical resistivity method and maturity method. *Journal of Wuhan Univ. Technol.-Mater. Sci. Ed.* 26, 2011, 983-989.
261. **Xuhao W.** Proportioning and performance evaluation of self-consolidating concrete . Ph. D. Thesis / Iowa State University. - 2014. - pág. 200 p..
262. **Ye G, Liu X, De Schutter G, Poppe AM, Taerwe L.** Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 2009; 29:94-102.
263. **Ye G, Liu X, Poppe AM, De Schutter G, van Breugel K.** Numerical simulation of the hydration process and the development of microstructure of self-

- compacting cement paste containing limestone as filler. *Mater Struct* 2007;40:865-75
264. **Zain MF, Mahmud HB, Ilham A, Maizal M.** Prediction of splitting tensile strength of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 2002; 32(8):1251-1258.
265. **Zhang J, Qin L, Li ZJ.** Hydration monitoring of cement based materials with resistivity and ultrasonic methods. *Materials and Structures*, 2009;42(1):15-24.
266. **Zhu W, Bartos P.** Permeation properties of self compacting concretes. *Cement and Concrete Research* 2003;33(7):921-926.
267. **Zhu W, Bartos PJM.** Application of depth-sensing microindentation testing to study of interfacial transition zone in reinforced concrete. *Cement and Concrete Research* 2000;30(8):1299-1304.
268. **Zhu W, Bartos PJM.** Microstructure and properties of interfacial transition zone in SCC, in: Z. Yu, C. Shi, K.H. Khayat, Y. Xie (Eds.), *Proceedings of 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete*, China, Changsha, 2005, pp. 319-327.
269. **Zhu W, Gibbs JC, Bartos PJ.** Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements. *Cement and Concrete Composites* 2001;23(1):57-64.
270. **Zhu W, Quinn J, Bartos PJM.** Transport properties and durability of self-compacting concrete. *Proceedings of 2nd international symposium on self-compacting concrete*. Tokyo, 2001. p. 451-458.
271. **Zhu W, Sonebi M, Bartos PJM.** Bond and interfacial properties of reinforcement in self-compacting concrete. *Materials and Structures* 2004;37(8):442-448.
272. **Zhu W., Gibbs J.C.** Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete . *Cement and Concrete Research*. - 2005. - págs. 1457–1462.