



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

Departamento de Construcciones Arquitectónicas

TESIS DOCTORAL:

**Propiedades mecánicas y retracción de
hormigones autocompactantes fabricados
con escorias siderúrgicas de alto horno**

Autor:

D. Francisco Javier Benito Saorin
Ingeniero de Edificación

Dirigida por:

D. Manuel Octavio Valcuende Payá
Dr. Arquitecto

D. Carlos José Parra Costa
Dr. Arquitecto

Julio de 2014

Resumen

El objetivo de este trabajo experimental es estudiar la evolución de la retracción en hormigones autocompactantes (HAC) en los que se ha sustituido parte del árido calizo por escorias siderúrgicas granuladas de alto horno (EGAH) en forma de arena. Al utilizar escoria como árido se recicla un residuo y se reduce el consumo de recursos naturales, permitiendo una construcción más sostenible. Ahora bien, al utilizar EGAH puede haber una modificación de las prestaciones mecánicas del hormigón debido a la hidratación a largo plazo de las escorias. Para analizar este último aspecto, se han fabricado siete tipos de HAC de relación $a/c = 0,55$, con diferentes contenidos de escoria (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% y 60%). Se estudió en todos ellos su comportamiento reológico, las propiedades mecánicas, la microestructura, la porosidad y la retracción.

Los resultados muestran que el reemplazo de arena por escoria da lugar a mezclas con un mayor volumen de poros, pero con una estructura porosa ligeramente más fina. A edades tempranas los HAC con mayor contenido de escorias tienden a dar resistencias a compresión más bajas debido a un mal empaquetamiento de los áridos, si bien a largo plazo su resistencia aumenta debido a la reactividad de las escorias. De hecho, a la edad de 365 días, los morteros con sustitución del 50% de cemento por EGAH molida alcanzan una resistencia a compresión similar a la del mortero fabricado con el 100% del cemento. El consumo de hidróxido cálcico durante la hidratación de la EGAH y la formación de CSH mejoran las propiedades mecánicas de la interfaz escoria-pasta.

En los morteros con EGAH analizados con microscopia electrónica de barrido se obtiene una concentración de átomos de Al y Mg en la interfaz escoria-pasta, lo que demuestra que se ha producido una difusión de los compuestos de la escoria hacia la pasta. Las mayores concentraciones se alcanzan en una franja de unas $5\ \mu\text{m}$ en torno a la EGAH.

En los ensayos de QNM (Quantitative Nano-mechanical) realizados con el microscopio de fuerza atómica se obtuvieron módulos de deformación similares en las pastas fabricadas con árido silíceo inerte y en las fabricadas con EGAH. Además, se observa solo en el caso de las pastas con escoria un incremento del módulo de deformación, de entre 5 y 10 GPa, en una franja de la interfaz de unas $5\ \mu\text{m}$ de anchura, junto a la EGAH.

Asimismo, se observa que la retracción autógena y la retracción de secado son mayores cuanto mayor es el porcentaje de árido sustituido. Este hecho es debido a la mayor deformabilidad del hormigón (mayor porosidad), a la mayor autodesecación que se genera como consecuencia de la hidratación de la escoria y a la retracción química producida por la reactividad de la escoria. Como consecuencia de ello, la retracción total también es mayor, siendo el incremento de retracción en relación a la del hormigón patrón del orden de un 4% y de un 44% cuando el reemplazo de arena es respectivamente del 10% y del 60%.

Abstract

The objective of this experimental work is to study shrinkage in self compacting concrete (SCC) in which part of the fines limestone aggregates have been replaced by granulated slag of blast furnace (GBFS). The consumption of natural resources is reduced by using slag as aggregate, allowing a more sustainable construction. Nevertheless the use GBFS could modify the mechanical properties of concrete and also the microstructure and the hydration process.

In order to analyse the influence in the shrinkage of replaced aggregates by GBFS seven types of SCC are manufactured with a water/binder relationship of 0.55. Different content of slag (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% and 60%) is used. This work also includes the study mechanical properties, microstructure and porosity.

The results show that replacement fines aggregates by slag sand produces mixtures with a greater volume of pores and slightly finer pore structure. At an early age SCC with higher content of slag tend to obtain compressive strength lower due to a bad aggregates packing, although the strength increases with time due to the reactivity of the slag. In fact, at the age of 365 days, mortars produce with 50% of GBFS instead of cement achieve a similar compressive strength than mortar manufactured with 100% of the cement. The consumption of calcium hydroxide during the hydration of the GBFS and also the formation of CSH improve the mechanical properties of interface slag-paste.

When GBFS mortars is analysed using scanning electron microscopy is observed a concentration of Al and Mg atoms in the interface slag-

paste, so spread of slag to paste components is happen. The highest concentrations are reached in a strip of $5\mu\text{m}$ around the GBFS.

Using QNM (Quantitative Nano-mechanical) tests, is observed that the deformation modules are similar in pastes made of siliceous aggregate inert and those made with GBFS. Nevertheless in a thin strip of $5\mu\text{m}$ slightly increase in the modulus of elasticity (between 5 and 10 GPa) is observed in the GBFS pastes.

By the other hand, autogenous shrinkage and drying shrinkage increases as the increase the percentage of fines aggregates replace by slag. This is due to several reasons: the higher deformability of concrete (greater porosity); the largest self- desiccation due to the hydration of clinker; and the chemical shrinkage produced by the reactivity of the slag. In fact, total shrink of GBFS concrete is an 4% higher than the pattern concrete, when the fine aggregates is replace by a 10% of slag, and 44% higher for a 60 % of sand replaced.

Resum

L'objectiu d'aquest treball experimental és estudiar l'evolució de la retracció en formigons autocompactants (FAC) en els quals s'ha substituït part de l'àrid calcari per escòries siderúrgiques granulades d'alt forn (EGAF) en forma d'arena. En utilitzar escòria com a àrid es recicla un residu i es redueix el consum de recursos naturals, la qual cosa permet una construcció més sostenible. Ara bé, en utilitzar EGAF pot haver-hi una modificació de les prestacions mecàniques del formigó a causa de la hidratació a llarg termini de les escòries. Per analitzar aquest últim aspecte, s'han fabricat set tipus de FAC de relació $a/c = 0,55$, amb diferents continguts d'escòria (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% i 60%). S'ha estudiat el comportament reològic, les propietats mecàniques, la microestructura, la porositat i la retracció de cadascun d'aquests formigons.

Els resultats mostren que la substitució d'arena per escòria dona lloc a barreges amb un major volum de porus, però amb una estructura porosa lleugerament més fina. A edats primerenques, els FAC amb major contingut d'escòries tendeixen a donar resistències a compressió més baixes a causa d'un mal empaquetament dels àrids, si bé a llarg termini la resistència d'aquests augmenta a causa de la reactivitat de les escòries. De fet, a l'edat de 365 dies, els morters amb substitució del 50% de ciment per EGAF molta aconsegueixen una resistència a compressió similar a la del morter fabricat amb el 100% de ciment. El consum d'hidròxid càlcic durant la hidratació de l'EGAF i la formació de CSH milloren les propietats mecàniques de la interfície escòria-pasta.

En els morters amb EGAF analitzats amb microscòpia electrònica de rastreig s'obté una concentració d'àtoms d'Al i Mg en la interfície escòria-pasta, la qual cosa demostra que s'ha produït una difusió dels compostos de l'escòria cap a la pasta. Les majors concentracions s'aconsegueixen en una franja d'unes $5\ \mu\text{m}$ al voltant de l'EGAF.

En els assajos de QNM (Quantitative Nano-mechanical) realitzats amb el microscopi de força atòmica es van obtenir mòduls de deformació similars en les pastes fabricades amb àrid silici i en les fabricades amb EGAF. A més, s'observa solament en el cas de les pastes amb escòria un increment del mòdul de deformació, entre 5 i 10 GPa, en una franja de la interfície d'unes $5\ \mu\text{m}$ d'amplada, al costat de l'EGAF.

Així mateix, s'observa que la retracció autògena i la retracció d'eixugament són majors com més gran és el percentatge d'àrid substituït. Aquest fet es deu a la major deformabilitat del formigó (major porositat), a la major autodesseccació que es genera com a conseqüència de la hidratació de l'escòria i a la retracció química produïda per la reactivitat de l'escòria. Com a conseqüència d'això, la retracció total també és major, i així l'increment de retracció amb relació a la del formigó patró és d'un 4% i d'un 44%, quan el reemplaçament d'arena és respectivament del 10% i del 60%.

Agradecimientos

A todas las personas que han formado parte de mi vida estos años, tanto en el ámbito personal como profesional, ya que sin su apoyo, consejos, experiencias y dedicación no hubiera sido posible el desarrollo de este trabajo.

A D. Manuel Valcuende y D. Carlos Parra, grandes personas y directores de este trabajo, por todas sus indicaciones, consejos y enseñanzas.

A D. Rafael Calabuig y D. Jesús Martínez por su enorme e incalculable ayuda en la realización de esta investigación y su cordial trato diario.

A los técnicos integrantes del laboratorio de construcción de la Escuela de Arquitectura, D. Damián y D. Rafael.

A la empresa Holcim por facilitar el material para los desarrollos prácticos de éste trabajo.

Gracias a toda mi familia, en especial a mis padres, Antonio y Amalia, y a Isabel por su apoyo incondicional incluso en los malos momentos.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ASPECTOS GENERALES	1
1.2. OBJETIVOS	6
1.2.1. Objetivos generales	6
1.2.2. Objetivos específicos	6
1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	7

CAPÍTULO 2. HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

2.1. INTRODUCCIÓN	9
2.2. COMPONENTES	12
2.2.1. Áridos	13
a) Árido grueso	14
b) Árido fino	16
2.2.2. Adiciones	18
2.2.3. Agua	21
2.2.4. Aditivos	22
a) Agentes reductores de agua o superplastificantes	23
b) Agentes modificadores de viscosidad	24
2.2.5. Cemento	25
2.2.6. Pasta	28
2.3. ESQUELETO GRANULAR	29
2.4. TIPIFICACIÓN DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE	31
2.5. MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN	31
2.6. DOSIFICACIONES TÍPICAS DE LOS HAC	33
2.7. CARACTERÍSTICAS DE LOS HAC EN ESTADO FRESCO	36
2.7.1. Influencia de los aditivos y adiciones	45
2.7.2. Presión sobre los encofrados	46
2.7.3. Capacidad de relleno	48
2.7.4. Resistencia a la segregación	49

2.8. ENSAYOS DEL HAC EN EL ESTADO FRESCO	52
3.3.1. Ensayo de escurrimiento o Slump Flow:	53
2.8.2. Embudo en V	56
2.8.3. Caja en L	57
2.8.4. Anillo Japonés	58
2.8.5. Otros ensayos	59
2.8.6. Reómetros	60
2.8.7. Ensayo de segregación	62
a) Índice de segregación y exudación visual, "VSI"	62
b) Índice estabilidad visual, "IEV"	64
c) Índice de estabilidad visual "HVSÍ"	65
d) Sonda de segregación.	66
e) Método de columna de segregación en estado fresco.	67
f) Ensayos de segregación GTM	68
2.9. CARACTERÍSTICAS Y ENSAYOS DEL HAC EN EL ESTADO ENDURECIDO	70
2.9.1. Resistencia a la compresión	70
2.9.2. Resistencia a tracción	73
2.9.3. Módulo de deformación	75

CAPÍTULO 3. SOSTENIBILIDAD DE LOS HORMIGONES. LA ESCORIA GRANULADA DE ALTO HORNO

3.1. INTRODUCCIÓN	79
3.1.1. Residuos, reciclaje y valorización en los hormigones	81
3.1.2. Hormigones sostenibles	83
a) Clinker	84
b) Materiales cementantes sustitutorios	85
c) Áridos	86
d) Finos	87
e) Superplastificantes	87
3.2. LAS ESCORIAS Y SU CLASIFICACIÓN.	88
3.2.1. Clasificación de las escorias según enfriamiento	89
3.3. ESCORIA GRANULADA DE ALTO HORNO	92
3.3.1. Composición química de la escoria	93
3.3.2. Reactividad de la escoria	96

3.3.3. Propiedades de la EGAH como árido en los hormigones.	107
a) Como árido fino	107
b) Como árido grueso	108

CAPÍTULO 4. RETRACCIÓN DEL HORMIGÓN

4.1. INTRODUCCIÓN	111
4.1.1. Los áridos en la retracción	113
4.1.2. La humedad relativa en la retracción	118
4.1.3. Microestructura	121
4.1.4. Agua	123
4.2. LA RETRACCIÓN DE LOS HORMIGONES	125
4.2.1. Retracción plástica	126
4.2.2. Retracción térmica	129
4.2.3. Retracción química o de hidratación	132
4.2.4. Retracción por autodesecación	133
4.2.5. Retracción autógena	133
4.2.6. Retracción por secado	136
4.2.7. Retracción por carbonatación	139
4.3. LA RETRACCIÓN DE LOS HAC	140
4.4. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LA RETRACCIÓN	145
4.4.1. Introducción	145
4.4.2. CEB-FIB MODEL CODE 2010	145
4.4.3. ACI 209R-92	147
4.4.4. EUROCODIGO 2	149
4.4.5. EHE -08	151
4.4.6. Análisis de los modelos EHE-08, ACI, EC-2 y CM-2010	151
a) Modelo de cálculo CM-2010 Y EC-2	152
c) Modelo de cálculo EHE-08, ACI, EC-2 y CM-2010	154

CAPÍTULO 5. FASE EXPERIMENTAL

5.1. INTRODUCCIÓN	159
5.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	163
5.2.1. Introducción	163

5.2.2. Caracterización óptica de las EGAH (x20)	163
5.2.3. Composición de la EGAH y CV	165
5.2.4. Módulo de deformación de los áridos	167
5.2.5. Estudio con microscopio electrónica de barrido	170
5.2.6. Estudio con microscopio de fuerza atómica	174
5.2.7. Estudio de la reactividad de la EGAH molida	177
5.2.8. Resistencia a la fragmentación de los áridos (Micro-Deval)	180
5.2.9. Densidad aparente y absorción de los áridos	184
5.2.10. Granulometría de los áridos	187
5.2.11. El esqueleto granular de los HAC	189
5.2.12. Caracterización del cemento	191
5.3. DOSIFICACIÓN	192
5.3.1. Granulometría del HAC	192
5.3.2. Automatización de cálculos en la dosificación	194
5.3.3. Dosificación de los HAC con EGAH	196
5.4. PROGRAMA DEL PLAN EXPERIMENTAL	198
5.5. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO	201
5.5.1. Ensayo de escurrimiento (slump- flow)	201
5.5.2. Estudio reológico	204
5.5.3. Índice de segregación y exudación visual, “VSI”	207
5.5.4. Acabado superficial. Método propuesto “ICB”	209
5.5.5. Determinación de inicio y final de fraguado de los HAC	214
5.6. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO	216
5.6.1. Ensayo de resistencia a compresión en probeta cilíndrica	216
5.6.2. Ensayo de resistencia a tracción indirecta	218
5.6.3. Ensayo de resistencia a flexotracción	221
5.6.4. Módulo de deformación	223
5.6.5. Porosimetría por intrusión de mercurio (PIM)	226
5.7. ENSAYOS DE RETRACCIÓN	231
5.7.1. Introducción	231
5.7.2. Ensayo de pérdida de peso en probetas	232
5.7.3. Evolución de temperatura del HAC durante el fraguado	233
5.7.4. Ensayo de retracción a edad temprana	234
5.7.5. Ensayo de retracción autógena y total	235

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	239
6.1. ESTRUCTURA POROSA DE LOS HAC. POROSIMETRÍA CON INTRUSIÓN DE MERCURIO	239
6.2. REACTIVIDAD DE LOS ÁRIDOS	249
6.2.1. Microscopia electrónica de barrido	250
a) Arena sílicea. Interfaz árido-pasta a x1.000 y x3.500	252
b) Arena caliza y EGAH. Interfaz árido-pasta x 1.000	253
c) Interfaz EGAH-pasta a 28 días (x 1.300 y x 5.000)	254
d) Interfaz EGAH-pasta a 120 días (x 1.300)	257
e) Interfaz sílice-pasta a 120 días (x 1.300)	259
6.2.2. Microscopio de fuerza atómica	260
6.2.3. Morteros para estudiar reactividad de la EGAH molida.	265
6.3. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO	268
6.4. ACABADO SUPERFICIAL DE LOS HAC	274
6.4.1. Método ICB en los HAC fabricados	274
6.4.2. Análisis del valor ICB por parámetros reológicos	282
6.4.3. Conversión de valores ICB a la escala CIB N°24 W29	285
6.4.4. Verificación del método ICB con las plantillas CIB N°24 W29	288
6.5. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	290
6.5.1. Resistencia a la compresión en probeta cilíndrica	290
6.5.2. Evolución de la resistencia a compresión de los HAC	308
6.6. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	311
6.6.1. Resistencia a la tracción indirecta	311
6.6.2. Resistencia a la flexotracción	317
6.6.3. Resistencia a tracción según varias instrucciones	322
6.7. MÓDULO DE DEFORMACIÓN	326
6.7.1. Módulo de deformación del mortero	326
6.7.2. Módulo de deformación de los HAC	328
6.7.3. Módulo de deformación según diferentes instrucciones	333
6.8. RETRACCIÓN DE LOS HAC	335
6.8.1. Introducción	335
6.8.2. Determinación del inicio y final de fraguado	336
6.8.3. Ensayo de pérdida de peso en probetas prismática	338
6.8.4. Temperaturas del HAC durante el fraguado	340

6.8.5. Ensayo de retracción a edad temprana	343
6.8.6. Retracción autógena	347
6.8.7. Retracción de secado	354
6.8.8. Retracción total	360
6.8.9. Retracción de los HAC con EGAH según los modelos de la EHE-08, ACI-92, EC-2 y CM-2010.	362
a) Retracción autógena	362
b) Retracción de secado	364
c) Retracción total	366
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES GENERALES	371
7.1. INTRODUCCIÓN	371
7.2. CONCLUSIONES	372
7.3. TRABAJOS FUTUROS	377
BIBLIOGRAFÍA	379
ANEXOS	421
1 Granulometría de los áridos	421
2 Procesos de amasado y molienda	426
3 Ajustes previos de la dosificación de los HAC	431
4 Estudio VSI en los HAC	440
5 Estudio del ensayo de escurrimiento	445
6 Digitalización y conversión de la plantilla del CIB N°24 al método ICB	455
7 Tablas de resultados. Compresión y densidades	458
8 Estudio de la interfaz árido-pasta	464
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	481

Capítulo 1.Introducción

1.1. ASPECTOS GENERALES

El alto consumo de recursos naturales, la producción de gran cantidad de desechos industriales y la contaminación del medio ambiente requieren de nuevas soluciones para un desarrollo sostenible, siendo éste el objetivo principal de esta investigación. Para ello, se estudia la fabricación de hormigones autocompactantes (HAC) con baja cantidad de clínker y sustitución de parte de los áridos finos de cantera por residuos siderúrgicos. La eficiencia en la utilización de los recursos (reducción de energía y materiales) permite desarrollos más sostenibles (Astori et al., 2005; Aguado y Gálvez, 2011). Estos satisfacen las necesidades del presente sin afectar negativamente a la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Para ello, hay tres aspectos a tener en cuenta: ambiental, económico y social (Gettu et al., 2012).

La fabricación de acero produce grandes cantidades de residuos industriales y por tanto de residuos siderúrgicos (escorias). Según la Federación Española de Asociaciones de Fundidores la producción total de metales en España en el 2006 fue de 1.177.427 T, de los cuales el 81% (948.174 T) corresponden a fundición de hierro, el 8% (85.144 T) corresponden a fundición de acero y el 12% restante (144.109 T) corresponden a fundición no férrea (Cedex, 2013).

Los residuos generados por esta industria cada vez se revalorizan más, empleándose en otros procesos para evitar su depósito en vertederos y generar mayores costes económicos y medioambientales a los sectores implicados.

En el 2006 se fabricaron 1.600 millones de toneladas de hormigón, generando aproximadamente el 7% de la carga global del dióxido de carbono (CO₂)¹ en la atmósfera (Hernández y Mendoza, 2006). Además, esta industria del hormigón usa 12,6 billones de toneladas de materias primas por año, representando dos veces la producción mundial del resto de materiales de construcción (Liébana et al., 2011), siendo la mayor consumidora de recursos naturales del mundo, llegando al 50 % del consumo de los recursos naturales extraídos de la tierra. (Sjostrom, citado por John, 2000). La fabricación del cemento libera aproximadamente el 5% (100 millones de toneladas al año) del total de emisiones de CO₂ a la atmósfera (Liébana et al., 2011).

El hormigón, como material compuesto, es ideal para la utilización de algunos residuos industriales en su fabricación. Si se reemplaza parte del cemento por adiciones como cenizas volantes o escorias la energía utilizada disminuye en gran medida con el aumento de las adiciones. El cemento supone el 80% de la energía total de la fabricación del hormigón (Liébana et al., 2011).

La producción mundial de cemento es de aproximadamente 3 millones de toneladas por año. Para la fabricación de cada tonelada de cemento portland se requiere alrededor de 1,5 toneladas de materias

¹ El CO₂ del proceso de fabricación del cemento se genera en la producción del clínker a partir del calentamiento de la piedra caliza. La cantidad total de CO₂ producido varía según el tipo de cemento. La producción de una tonelada de cemento Portland requiere aproximadamente de 4 GJ de energía y la manufactura del clínker emite aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono a la atmósfera (Mehta, 2002).

primas, tales como piedra caliza, arcilla, yeso y agua (Gettu et al., 2012). A nivel mundial se emplean aproximadamente 10 billones de toneladas de arena y roca natural (Mehta, 2002).

La industria del hormigón, cada vez más concienciada con los aspectos medioambientales, tiende a reducir el consumo de recursos naturales con la reutilización de desechos, como es el caso de la utilización de áridos reciclados procedentes de la construcción y residuos metalúrgicos como adiciones o áridos en la fabricación de hormigones (Mehta y Monteiro, 2008, Isaia y Gastaldini, 2009) que minimizan los efectos medioambientales del sector.

La creciente degradación del medio ambiente y la preocupación de la industria para cumplir con las legislaciones de residuos hacen que algunos de ellos de origen industrial, como la escoria de alto horno y las cenizas volantes, sean cada vez más utilizados para sustituir parte del cemento o como árido en la producción de hormigón. La posibilidad de reutilizar estos subproductos industriales en el sector de la construcción está muy condicionada por su posible inestabilidad volumétrica² debido a la presencia de ciertos compuestos no deseados (Frías et al, 2010).

En la actualidad se están desarrollando hormigones autocompactantes (HAC) más sostenibles denominados en algunos casos verdes o EcoHAC por el bajo consumo de cemento (en torno a 200 kg/m³) y con una cantidad de finos entre 450 y 600 kg/m³ (Rodríguez, 2010). Estos HAC se consiguen con el empleo de aditivos químicos modificadores de la viscosidad que permiten dotar a las mezclas de

² Frías et al. (2002, 2004) muestran los resultados de una escoria de alto horno española con alta cristalinidad y baja presencia de productos expansivos (Cl⁻, SO₃, CaO libre, MgO libre) posibilitando su utilización como árido de reciclado.

una mayor cohesión y, por tanto, de una mayor resistencia a la segregación.

El objetivo de esta investigación es obtener HAC más sostenibles a los comercializados actualmente, con menores emisiones de CO₂ a la atmosfera, disminuyendo el balance medioambiental de CO₂ equivalente de los HAC (limitación de demanda energética del Código Técnico de la Edificación, HE1, 2009 y Guía técnica IECA, 2012). Para ello, se da empleo a productos de desecho industrial como la escoria siderúrgica, cenizas volantes y finos calizos, permitiendo un menor empleo de cemento y por tanto una reducción en el consumo energético y de materias primas, así como una disminución en la emisión de gases de efecto invernadero. Estos desechos industriales se utilizan por un lado como finos para mejorar el comportamiento en estado fresco de los HAC y de su microestructura. Por otro lado, los desechos industriales también se utilizan como áridos en los HAC, sustituyendo a parte de los áridos convencionales de cantera³ por escorias granuladas de alto horno (EGAH) sin tratamiento alguno. Se estudia la viabilidad de sustituciones del 10 al 60% del árido fino de cantera por EGAH. Ecológicamente el beneficio es doble. Por un lado, se da salida a un subproducto industrial cuyo almacenamiento y tratamiento puede crear serios problemas y, por otro lado, se evita parte de la destrucción de canteras naturales para obtener las materias primas necesarias. Esto supone un ahorro en emisiones de CO₂ importantes, que sumado a la valorización y reciclaje del residuo se obtiene un HAC más sostenible. Además, se obtienen hormigones de características mecánicas

³ El sector europeo de los áridos se considera como el mayor sector extractivo no energético en la Unión Europea, con una producción anual de 3.000 millones de toneladas. Está constituido por más de 23.624 explotaciones en toda Europa (UEPG, 2007).

y de durabilidad aceptables, incluso superiores a los HAC con árido de cantera (Berridi, 2008; Yuksel et al., 2007 y Bilir, 2012).

En la investigación se utiliza un cemento CEM II/B-M (S-L) 42,5R⁴, con parte del clínker remplazado por finos calizos de desechos de canteras⁵ y por escorias de alto horno⁶, con el fin de reducir el impacto ambiental al reducir significativamente la emisiones de CO₂ a la atmosfera (Miñano et al., 2012).

El concepto de desarrollo sostenible implica el uso y producción de materiales de alto rendimiento a un costo razonable, con mayor durabilidad y con el mínimo impacto ambiente posible (Miñano et al., 2012d). Estas cuatro variables son las adoptadas como premisas en este trabajo de investigación.

⁴ La Norma UNE-EN 197-1:2000 establece que CEM II contiene entre el 6 y el 35 % de adiciones que pueden ser escorias vítreas de alto horno (S) y caliza (L). Poseen el sufijo B cuando está comprendido entre el 21 y el 35 %. Las adiciones se incorporan a los cementos sustituyendo parcialmente al clínker lo que contribuye positivamente a reducir las elevadas emisiones de CO₂ generadas en su producción, así como a disminuir el consumo energético que su fabricación implica, pero además, estas adiciones pueden conferir a los cementos propiedades mejoradas con respecto al cemento Portland puro (Alonso, 2011).

⁵ Producidos generalmente durante la rotura de rocas para la fabricación de áridos de machaqueo o corte de piedras calizas para solados o revestimientos.

⁶ Por cada tonelada de cemento Portland sin adiciones son producidas 0,91 toneladas de CO₂. La energía necesaria para la molienda de escoria de alto horno genera cerca de 0,07 toneladas de CO₂/tonelada. La sustitución, por tanto, de cemento Portland por una misma masa de escoria de alto horno molida puede reducir la emisión de CO₂ cerca de 0,84 t/t de cemento (Canmet, 1993).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivos generales

Esta investigación pretende estudiar las propiedades reológicas, mecánicas y retracción de los hormigones autocompactantes fabricados con sustitución del árido fino de cantera por escoria granulada de alto horno, profundizando en el estudio de la retracción de estos HAC.

1.2.2. Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general es necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la influencia del porcentaje de sustitución de áridos finos de cantera por la EGAH (del 10% al 60%) en las propiedades del HAC.
- Conocer el comportamiento de las propiedades mecánicas de los HAC (resistencia a compresión, resistencia a tracción y módulo de deformación a diferentes edades).
- Analizar la retracción autógena, de secado y total en función del porcentaje sustituido de árido fino por EGAH.

Todo ello se analiza frente a un HAC de referencia sin sustitución de árido fino por EGAH.

1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Esta tesis doctoral se estructura en seis capítulos:

El Capítulo 1 presenta la base y fundamentación de este trabajo, la descripción del objetivo general, los objetivos específicos y la estructura que constituye el presente trabajo.

El Capítulo 2 recoge una pequeña reseña histórica del HAC, revisando los materiales que lo componen y sus características. Se recopilan los métodos de ensayo más utilizados, tanto en estado fresco como endurecido, con la descripción las propiedades físicas y mecánicas más importantes de los hormigones. Además, se profundiza en las características en estado fresco y endurecido de los HAC. Estudiando el hormigón como un fluido, así como las características y requerimientos principales para la autocompactabilidad de éste, con sus ventajas e inconvenientes. En estado endurecido se analizan las propiedades de los HAC, tanto físicas como mecánicas.

El Capítulo 3 aborda los aspectos generales de la sostenibilidad de los HAC y de sus componentes, especialmente el de la escoria granulada de alto horno, profundizando con el estudio de su clasificación según el proceso de fabricación de los hierros o del tipo de enfriado que se realice. Además, se estudian las propiedades químicas y físicas de la EGAH, así como su hidratación en su uso como sustitutivo del clínker y como sustitutivo del árido natural de cantera.

En el *Capítulo 4* se procede al estudio de la retracción de los hormigones vibrados y autocompactantes, profundizando en los

principales tipos existentes con el fin de evaluar las diferencias entre ellos.

En el *Capítulo 5* se establecen y describen el plan experimental realizado. Se ha adoptado una dosificación de referencia a partir de la cual se va sustituyendo parte del árido fino por EGAH.

En el *Capítulo 6* se procede a la evaluación y discusión de los resultados obtenidos, centrándose en la influencia de la EGAH como sustitutivo de árido natural en la retracción de los HAC.

El Capítulo 7 recoge las principales conclusiones obtenidas en el presente trabajo y propuestas futuras.

Capítulo 2. Hormigón autocompactante

2.1. INTRODUCCIÓN

El profesor Okamura, de la Universidad de Kochi en Japón, en 1986 y debido a los problemas de durabilidad que se habían detectado en las estructuras de hormigón armado; atribuibles a la disminución en los niveles de calidad de la mano de obra especializada para la ejecución de los procesos de compactación, puso de manifiesto la necesidad de desarrollar un tipo de hormigón que compactase por su propio peso, sin que el factor humano interviniera.

Ozawa y Maekawa, de la Universidad de Tokio, desarrollaron dos años más tarde lo planteado por Okamura. Éste, definió a este hormigón como aquél que es capaz de fluir en el interior del encofrado, rellenándolo de forma natural, pasando entre las barras de armadura y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso sin compactación interna o externa (Okamura, 1997). A este producto se le denomina Hormigón Autocompactante (HAC) y debe satisfacer los siguientes requisitos (Okamura et al., 2003):

1. Fluir libremente por cada rincón del encofrado sin el uso de vibración.
2. Una autocompactación que resistiera a la segregación. A edad temprana evitar la formación de fisuras generadas por la generación del calor que proviene de la hidratación del

cemento o de la retracción por secado.

3. Debe brindar una protección contra factores agresivos externos (la penetración del oxígeno, cloruros y agua debe ser mínima). Es decir, deben presentar una permeabilidad muy baja y ser resistente a las heladas.

La principal diferencia entre los HAC y los tradicionales vibrados (HT) está en el comportamiento en el estado fresco y en su composición. El hormigón debe tener una buena resistencia a la segregación¹, una buena capacidad de paso y presentar un buen acabado superficial.

La alta fluidez de los HAC proporciona la capacidad de movilidad en el encofrado, recubriendo las armaduras sin necesidad de compactación externa. La viscosidad (μ) y cohesión² moderadas evitan la segregación de sus componentes, garantizando una deformabilidad uniforme en el proceso de transporte, bombeo y vertido, permitiendo hormigonar elementos de formas complicadas o muy armadas (figura 2.1).

Dada las características exigidas a los HAC se plantean serios problemas de estabilidad de la mezcla. A medida que aumenta la fluidez³ del hormigón su resistencia a la segregación disminuye, pudiendo además quedar bloqueados los áridos al pasar por zonas congestionadas de armaduras, no llegando a rellenar el molde, ocasionando defectos superficiales y una reducción de las propiedades físicas y mecánicas del elemento hormigonado (Valcuende et al., 2007).

¹ La resistencia a la segregación deben permitir una distribución uniforme del árido en toda su masa, manteniéndose la homogeneidad de los compuestos en los hormigones.

² Cohesión es la propiedad que indica la capacidad de mantenerse unido el hormigón.

³ Fluidez o capacidad de llenado es la propiedad que permite comportarse como un fluido y pasar entre los obstáculos en estado fresco (Filho, 2006). Mayor fluidez implica generalmente menor viscosidad y menor tensión umbral de corte.



Figura 2.1. Hormigonado del arco del viaducto sobre los ríos Anleo y Navia. Izquierda comienzo hormigonado, derecha culminación del arco (Navarro, 2009)

El equilibrio entre fluidez y viscosidad en el HAC se obtiene con un apropiado diseño de la mezcla y por el empleo de aditivos de gran capacidad de reducción de agua (Roncero y Magarotto, 2008). Aunque reciben el nombre de aditivos reductores de agua en realidad se trata de superplastificantes que permiten mejorar la fluidez del hormigón sin variar la relación agua/cemento (a/c), o reducir el agua de amasado manteniendo la trabajabilidad necesaria para la correcta puesta en obra.

Los HAC, por su alta demanda de partículas finas, son ideales para incorporar subproductos o residuos industriales. Los residuos más comunes son el humo de sílice, las cenizas volantes y las escorias de alto horno que contribuyen al desarrollo sostenible de la tecnología del hormigón y dan salida comercial a los residuos industriales. Además, por lo general, mejoran las propiedades mecánicas, la durabilidad y la microestructura de los hormigones. Esto se debe a su participación como microfiller, mejorando la interfaz árido-pasta y formando una microestructura más densa y homogénea. Además, se produce una reacción con el hidróxido de calcio formando nuevos productos hidratados similares a los del cemento. Cuanto más finas y más vítreas son las adiciones (residuos) más rápido se producen estas reacciones.

2.2. COMPONENTES

El HAC posee básicamente los mismos componentes que el HT (cemento, áridos, arena, adiciones, agua y aditivos), pero existe una clara diferencia en la composición final de la mezcla (figura 2.2).

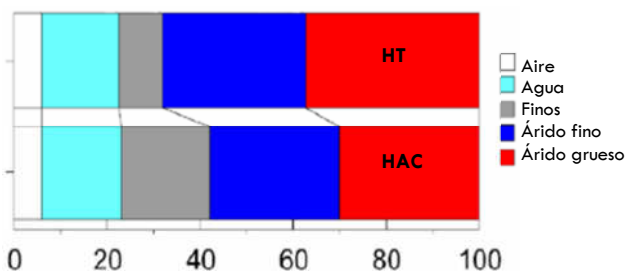


Figura 2.2. Comparación de proporciones entre HT y HAC (Okamura y Ouchi, 2003)

Dos componentes atípicos en la elaboración del HAC, respecto al HT, son los agentes modificadores de viscosidad y los finos minerales, necesarios para evitar la segregación y exudación⁴ del hormigón durante su colocación, y para obtener la cohesión necesaria de la mezcla.

Es necesario, para la dosificación de un HAC, proveer a la mezcla de un mayor contenido de pasta (agua + material de tamaño de partícula menor de 125 μm + aditivos químicos) que reduzca la fricción entre los áridos; y así mejore la capacidad de fluir del material (EHE-08). Para conseguir un mayor contenido de pasta se puede incrementar la cantidad de cemento, obteniendo HAC de alta resistencia, lo cual potencia enormemente la retracción⁵, o añadiendo filler calizo, cenizas volantes u otro tipo de adiciones.

⁴ Exudación: ascensión del agua de amasado hacia la superficie del hormigón fresco tras la separación de ésta de la pasta de cemento.

⁵ Por ello, la gran importancia de utilizar cementos de bajo calor de hidratación.

Un aspecto a destacar de manera especial es el hecho de que la mayoría de las guías de diseño de HAC como EFNARC (2002) o ACI 318 08 sugieren que las mezclas de HAC deben estar compuestas por entre 160 y 240 l/m³ de finos, aunque trabajos con cantidades por debajo de 90 Kg/m³ de filler calizo (Valcuende et. al, 2012) han demostrado que se pueden obtener HAC de calidad.

La habilidad del HAC de poder pasar a través de zonas de alto contenido de armaduras viene regida principalmente por el volumen del mortero y por la proporción de los áridos gruesos presentes en la mezcla. Asimismo, los materiales finos mantienen la cohesión de la mezcla evitando la segregación y, de igual forma, arrastrando o manteniendo en suspensión las partículas de mayor tamaño (ACHE, 2008). Un rango adecuado para la relación agua/finos de los HAC es entre 0,85 y 1,10 en volumen (IECA, 2012). A continuación se describe cada uno de los componentes del HAC.

2.2.1. Áridos

Se pueden emplear los mismos áridos que para el hormigón convencional, sin necesidad de tener que cumplir ningún tipo de exigencia adicional. No obstante, se debe prestar una especial atención a la calidad y distribución de los tamaños de los mismos porque influyen en el comportamiento en el estado fresco del hormigón autocompactante, siendo esencial emplear arenas continuas, sin cortes en su granulometría y preferiblemente sin formas lajosas.

En el hormigón convencional, el volumen de áridos⁶ es aproximadamente el 70% del volumen de la mezcla, frente al 57% - 67% para los HAC (AFGC, 2002).

Aumentos en la cantidad de pasta pueden generar efectos contrarios en la reología de los HAC. Con el aumento del volumen de pasta en los HAC la viscosidad (μ) aumenta y la tensión umbral de corte (τ) disminuye hasta que se alcanza el recubrimiento ideal de los áridos gruesos. A partir de este punto un aumento del volumen de pasta ocasiona que ambos parámetros puedan disminuir.

Las mezclas del HAC son más sensibles a la variación de agua que las del HT, por lo que es importante tener en cuenta el nivel de humedad del árido en el cálculo total de agua de la mezcla. La utilización de agentes modificadores de la viscosidad son muy efectivos para compensar las variaciones de humedad en el árido (EFNARC, 2002). En cuanto al árido fino, su forma y textura tienen un efecto significativo sobre la demanda de agua de la mezcla, mientras que la forma del árido grueso generalmente tiene un efecto significativo en la trabajabilidad del hormigón (Neville, 1997).

a) Árido grueso

En el HAC se controla el contenido y el tamaño del árido grueso para conseguir una mezcla más uniforme, disminuir el riesgo de bloqueo, mejorar la deformabilidad y reducir el riesgo de segregación. El tamaño máximo del árido grueso dependerá de varios factores que son particulares a cada caso, como las dimensiones del elemento a

⁶ Las partículas menores a 0,125 mm no se consideraran como parte de los áridos, sino como parte del contenido total de finos del hormigón autocompactante.

hormigonar, el espacio libre entre las armaduras, elementos embebidos, condiciones de trabajo, el acabado deseado y la viscosidad de la mezcla (viscosidades bajas no pueden admitir tamaños grandes). Normalmente se limita el tamaño máximo del árido grueso a valores entre 10- 20 mm (EFNARC, 2002).

El Anejo 17 de la Instrucción EHE-08, en su Artículo 28 y de forma similar a la mayoría de literatura técnica, indica que el tamaño máximo de árido permitido es de 25 mm, aunque se aconseja utilizar áridos entre 12 y 20 mm como máximo, en función de la disposición de las armaduras. Casos especiales, como los microhormigones precisan de tamaños máximos menores (4-8 mm).

El volumen de árido grueso puede oscilar entre el 30% y 35% del volumen del hormigón y un 50% del volumen del sólido (Gomes, 2002 y Okamura, 1997).

Se puede utilizar árido grueso de machaqueo o rodado en las mezclas del HAC, influyendo la forma y textura de los áridos más en las propiedades en estado fresco que en estado endurecido (Silva, 2000). El empleo de áridos de machaqueo incrementa el rozamiento entre las partículas del HAC en estado fresco y por ello debe aumentar el volumen de pasta o la cantidad de SP para conseguir una fluidez equivalente a la de las mezclas con árido rodado.

Una de las características del HAC es que, por lo general, el contenido de árido grueso es menor o igual al del árido fino, y mucho menor al que se utiliza en el HT (Bui et al., 2002). La relación árido fino/totalidad de áridos, es de gran importancia en el HAC ya que sus propiedades reológicas mejoran al incrementarse esa relación (Su et

al., 2002). Por otro lado, si el contenido de árido grueso en el HAC excede de cierto límite, la mezcla se bloquea⁷ independientemente de la viscosidad de ella (Okamura, 1997). De hecho, es más efectivo reducir el volumen de árido grueso que disminuir la relación arena/pasta para incrementar la capacidad de paso de las mezclas por zonas densamente armadas (Su et al., 2002).

b) Árido fino

La forma de los áridos finos afecta a la reología del HAC. Cuanto más angulosas sean las partículas, mayor será la resistencia al cizallamiento del mortero, dificultando la deformabilidad del hormigón (Okamura y Ouchi, 2003)

En HAC el contenido de arena es aproximadamente el 40% del volumen del mortero y la relación arena/grava es mayor para los HAC frente a los HT (AFGC, 2002). Esta menor cantidad de grava en los HAC, y por tanto mayor cantidad de pasta, hace que la retracción en ellos aumente. En este sentido, la norma ACI 209R-92 cuantifica variaciones de la retracción de los hormigones con diferentes proporciones de árido fino/árido total (Ψ). En la figura 2.3 se muestra un ejemplo de ello, grafiándose la evolución, con el paso del tiempo, de la retracción de un hormigón variando la relación del árido fino sobre la total (Ψ). En la tabla 2.1 se cuantifica las variaciones de la retracción para estos hormigones. A los 10.000 días se obtienen para $\Psi = 20\%$ una retracción igual al 56% de la obtenida con un 70% de árido fino (ACI 209R-92).

⁷ El bloqueo del hormigón se produce cuando el tamaño máximo del árido es demasiado grande y/o cuando el contenido del árido grueso es demasiado alto. Una forma de mejorar la capacidad de paso es aumentar la viscosidad de la mezcla reduciendo el riesgo de segregación. Esto se obtiene disminuyendo la relación agua/polvos y/o utilizando aditivos moduladores de la viscosidad.

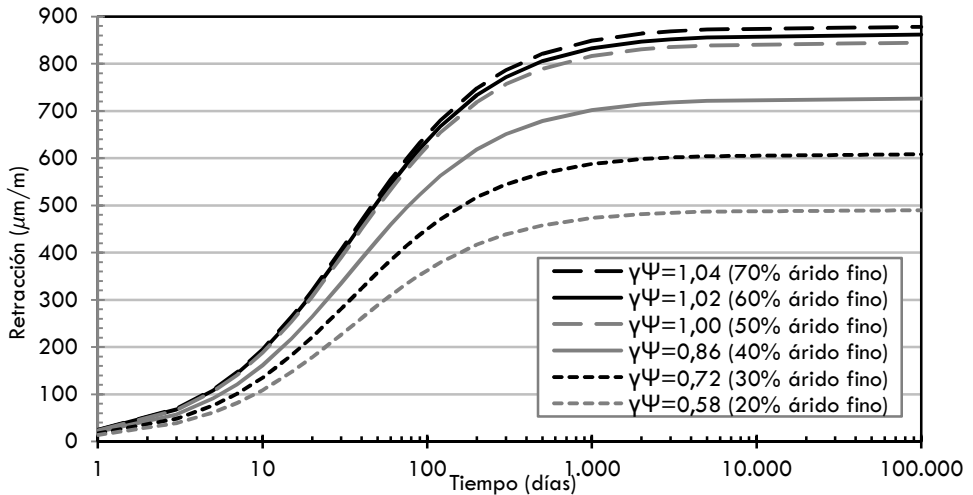


Figura 2.3. Evolución de la retracción de un hormigón variado la relación del árido fino sobre la total ($\gamma\psi$), con HR 50% y según ACI 209R-92

Tabla 2.1. Valores de la retracción, con HR 50% y según ACI 209R-92, de un hormigón variado la relación del árido fino sobre la total ($\gamma\psi$)

Días	$\gamma\psi=0,58$ 20% árido fino		$\gamma\psi=0,72$ 30% árido fino		$\gamma\psi=0,86$ 40% árido fino		$\gamma\psi=1,00$ 50% árido fino		$\gamma\psi=1,02$ 60% árido fino		$\gamma\psi=1,04$ 70% árido fino	
	$\mu\text{m/m}$	%	$\mu\text{m/m}$	%	$\mu\text{m/m}$	%	$\mu\text{m/m}$	%	$\mu\text{m/m}$	%	$\mu\text{m/m}$	%
1	13,6	2%	16,9	2%	20,2	2%	23,5	3%	23,9	3%	24,4	3%
3	38,7	4%	48,0	5%	57,4	7%	66,7	8%	68,0	8%	69,4	8%
7	81,7	9%	101,4	12%	121,1	14%	140,8	16%	143,6	16%	146,5	17%
30	226,2	26%	280,8	32%	335,4	38%	390,0	44%	397,8	45%	405,6	46%
90	352,9	40%	438,0	50%	523,2	60%	608,4	69%	620,6	71%	632,7	72%
500	458,0	52%	568,6	65%	679,1	77%	789,7	90%	805,5	92%	821,3	93%
3.000	484,4	55%	601,4	68%	718,3	82%	835,2	95%	851,9	97%	868,6	99%
10.0000	489,9	56%	608,2	69%	726,4	83%	844,7	96%	861,6	98%	878,5	100%

2.2.2. Adiciones

Una de las características más destacadas de las mezclas de HAC es su alto contenido de material fino, necesario para proporcionar a la mezcla la cohesión adecuada para evitar la segregación de los áridos y/o la exudación del agua durante la colocación del HAC. Además, con un alto contenido de material fino se consigue un microestructura más densa, se disminuye su permeabilidad y se mejora la durabilidad del hormigón (De Holanda, 2006).

A efectos del comportamiento reológico del HAC el material fino incluye todas las partículas de diámetro inferior a 125 μm , incluso las del cemento y adiciones, recomendándose que la relación agua/fino se sitúe entre 0,9 y 1,1 (EFNARC, 2002). El contenido total de finos en el HAC varía entre 450-600 kg/m^3 . Esto incluye entre 350-450 kg/m^3 de cemento y 100-250 kg/m^3 de adiciones. Se puede emplear como material fino materiales sustitutivos del cemento que reducen el calor de hidratación, la retracción y por lo general el coste del HAC; al permitir bajar la cantidad de cemento (Mata, 2004). Normalmente se determina el contenido de cemento en función de los requisitos de resistencia y durabilidad, y a esto se añade la cantidad necesaria de adiciones en función de los criterios de autocompactabilidad (Ambroise, 2002). Numerosos investigadores utilizan adiciones mucho más finas de 125 μm , como Gomes (2002) con finos de menos de 100 μm y Okamura et al. (2003) de menos de 90 μm .

La utilización de altos contenidos de finos permite obtener valores aceptables de tensión umbral de corte y viscosidad plástica, entre 0 y 30 Pa, y de 50 a 120 Pa·s, respectivamente. Por el contrario, bajos

contenidos de finos producen una bajada de tensión umbral de corte y una moderada viscosidad (Wallevik, 2003; Zerbino et al., 2006 y Roncero et al., 2008). Cantidades de finos inferiores a 450 kg/m³ requieren el empleo de aditivos moduladores de viscosidad para garantizar la cohesión y evitar la exudación y/o segregación (Roncero et al., 2008). Esta última posibilidad es una de las que puede permitir una mayor penetración en el mercado del hormigón elaborado, por la mayor robustez lograda (Mantegna et al., 2008).

Con el aumento de la cantidad de finos, por lo general, mejoran las características de autocompactabilidad de los hormigones. Al sobrepasar una cantidad crítica se puede obtener efectos negativos como la segregación, por un exceso de la pasta que envuelve a los áridos, impidiendo su correcta sustentación (Santos et al., 2008). Un exceso de la cantidad de finos, en relación al contenido de cemento, disminuye la eficiencia de éste por la alta demanda de los finos, por su gran superficie específica (Parra et al., 2008).

Los finos utilizados en el hormigón influyen de manera diferente dependiendo del tipo utilizado. La bentonita o humo de sílice actúan aumentando la capacidad de retener agua de la mezcla debido a su elevada superficie específica (por su gran finura). Si se emplean finos como las cenizas volantes, cal hidratada, caolín o materiales de origen puzolánico pueden actuar aumentando la tixotropía⁸ de la mezcla. Las adiciones más utilizadas son el polvo calizo o filler calizo, el polvo de cuarzo, el humo de sílice, las cenizas volantes y las escorias de alto horno molida.

⁸ La tixotropía es una propiedad de algunos fluidos no newtianos y pseudoplásticos. Estos pierden su resistencia o disminuyen su viscosidad al someterlos a una tensión cortante (cizalla).

Las adiciones se pueden clasificar en tres grupos:

-El primer grupo incluye las adiciones como la puzolana natural, humo de sílice, ceniza volante⁹, la cáscara de arroz y el metacaolín, que son materiales inorgánicos con propiedades puzolánicas. La reacción de estos materiales se debe a la sílice reactiva que reacciona con el hidróxido de calcio (portlandita) producida por la hidratación del cemento Portland, formando hidratos de silicato de calcio (tobermorita) adicionales. La formación de estos nuevos silicatos reduce la porosidad de la pasta y aumenta la resistencia del hormigón (Mehta, 1994).

-En el segundo grupo incluye otros materiales cementantes como la escoria granulada de alto horno que interaccionan con los productos de hidratación del cemento Portland pero de forma diferente a las adiciones puzolanas. Las EGAH se diferencian de las puzolanas por la gran proporción de calcio en su composición química (Escalante, 2002) que en contacto con agua forma una capa de gel impermeable. Ésta acaba reaccionando con la cal liberada en la hidratación del C_3S y C_2S para formar CSH y C_4AH_{13} (Aitcin 2008).

-En el tercer grupo se encuentran las adiciones inertes, tales como los filleres calizos, filleres de cuarzo, polvo de mármol o polvo de granito. Estos materiales muy finos afectan a la formación de productos hidratados, creando nuevos centros para la nucleación y acelerando la reacción de hidratación del cemento a edades tempranas. Los núcleos de cristalización formados facilitan la precipitación de portlandita e incrementan la resistencia (Aris et al., 2008 y Gonnon et al., 2012). La mayor presencia de filler mejora la disolución de los carbonatos alcalinos

⁹ Las cenizas volantes pueden ser del tipo síliceas con propiedades puzolánicas o calcáreas con propiedades hidráulicas y/o puzolánicas.

(Aris et al., 2008). La mayor finura de los filleres contribuye acelerando las reacciones de hidratación (Barluenga, G. et al., 2012). Parra et al. (2008) indican que las mayores velocidades de hidratación a 7 días obtenidas en los HAC, frente a los HT, puede deberse al mayor contenido en finos calizos de los HAC. Además, estos filleres ocupan los espacios que de otro modo estarían ocupados por el agua, densificando la estructura final.

La Instrucción EHE-08, en su Artículo 30, indica que las adiciones pueden ser orgánicas, puzolánicas o con hidraulicidad latente que, finamente divididas, pueden ser añadidas al hormigón con el objetivo de mejorar alguna de sus propiedades. Sólo contempla el empleo de ceniza volante y humo de sílice con cementos CEM I en cantidades no superiores al 35% y 10% respectivamente.

2.2.3. Agua

El agua de amasado, al igual que en la elaboración de los hormigones convencionales, debe de estar limpia y libre de impurezas para no provocar reducciones de resistencia y durabilidad por alteraciones en la hidratación del cemento.

Además, el agua actúa como lubricante entre las partículas haciendo que la masa, en estado fresco, sea trabajable. Los espacios creados por ella, tras su consumo o evaporación, serán, en parte, rellenados por los productos resultantes de la hidratación del cemento. Para el cálculo de la relación a/c se debe considerar la cantidad de adiciones activas (cenizas volantes y humo de sílice), considerándose por tanto, la relación agua/material cementante.

Como consecuencia de las bajas cantidades de agua utilizadas en general para preparar los HAC se favorecen muy positivamente las propiedades del hormigón endurecido como la porosidad, la resistencia mecánica, la fluencia, la retracción y la durabilidad. Los HAC son muy sensibles a pequeñas variaciones en el contenido de agua de la mezcla; incluso variaciones inferiores al 1,5% en la humedad de los áridos pueden alterar la viscosidad de la mezcla, haciendo que ésta pierda sus propiedades de fluidez o que, por el contrario, pase a segregarse (Valcuende et al., 2007; Lowke et al., 2003). Para garantizar la fluidez del HAC, sin afectar negativamente a sus propiedades, parte del agua puede sustituirse por superplastificantes.

2.2.4. Aditivos

En el HAC, el uso de los aditivos se hace imprescindible para un adecuado comportamiento en estado fresco y/o endurecido. Normalmente, la cantidad de aditivos no debe superar el 5% del peso del cemento (Neville, 1995; MOPT, 2008). Pueden afectar a: relación agua/cemento, consistencia, tiempo de fraguado, capacidad de repeler el agua, retracción, contenido de aire, etc.

Los aditivos más usados en los HAC son los superplastificantes o aditivos reductores de agua de alta actividad y los cohesionantes o agentes modificadores de viscosidad. Además de estos aditivos se puede emplear cualquiera de los aditivos definidos en la norma UNE-EN 934-2:2002, dependiendo de los requerimientos de cada aplicación.

A continuación se profundiza en los dos principales tipos de aditivos, los superplastificantes (SP) y los agentes modificadores de viscosidad (AMV).

a) Agentes reductores de agua o superplastificantes

Los SP son imprescindibles para conseguir la trabajabilidad adecuada del HAC. El alto contenido de finos hace que la mezcla sea mucho más viscosa y sin estos productos la única forma de aumentar la fluidez es aumentar la cantidad de agua, algo no deseado por sus efectos negativos sobre la resistencia, porosidad, y estabilidad del hormigón. Una mezcla de HT, sin reductores de agua, contiene alrededor del 20% de agua por volumen, siendo un 8% la necesaria para la hidratación del cemento, lo que significa que el 12% restante no reacciona con el cemento, y es necesaria sólo para mejorar la trabajabilidad del hormigón. El agua libre que no reacciona con el cemento, tras su evaporación, genera poros capilares en el hormigón. El aumento de la porosidad del hormigón reduce su resistencia, permeabilidad y durabilidad (Neville, 1995).

La superior capacidad reductora de agua conseguida con aditivos superplastificantes de nueva generación se debe a que el efecto dispersante de éstos se basa, además de por el efecto electrostático, por un efecto estérico generado por sus cadenas laterales de larga longitud que impiden que las partículas de cemento puedan flocular (Borralleras, 2012). Las cadenas de moléculas de los SP cuentan con un extremo hidrófilo y otro hidrófobo, quedando adsorbidas en la superficie de los granos de cemento (figura 2.4). De su orientación resulta un efecto lubricante y una defloculación¹⁰ o dispersión de las partículas, lo que permite que puedan ser mojadas con una cantidad de agua mínima.

¹⁰ Defloculación: cuando la fuerza de repulsión entre dos partículas son mayores que las de atracción, como consecuencia se dispersan.

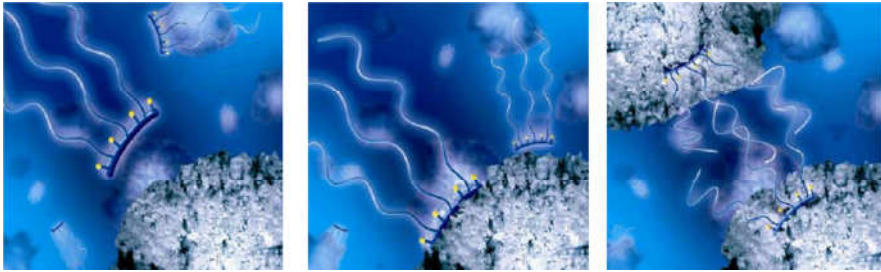


Figura 2.4. Representación de las fases de distribución, adsorción y orientación de un grano de cemento y un aditivo superplastificante de nueva generación basado en polímeros carboxílicos (Borralleras, 2009)

b) Agentes modificadores de viscosidad

Los aditivos cohesionantes o agentes modificadores de viscosidad son compuestos químicos cuyo objetivo es aumentar la viscosidad y la cohesión del material cementante, evitar la segregación y la exudación del agua, además de estabilizar la fluidez. El AMV confiere cohesión interna a la masa con pocas pérdidas de fluidez. Son polímeros solubles en agua con un alto peso molecular que inducen al hormigón una viscosidad de moderada a alta, lo que hace que se comporte de manera pseudoplástica¹¹, mejorando sus propiedades en estado fresco. Son recomendables si no se dispone de los finos suficientes para generar suficiente cohesión a la mezcla e imprescindibles en algunas aplicaciones como HAC ligero con fibras.

¹¹ El hormigón tiene un comportamiento pseudoplástico cuando su viscosidad plástica disminuye al aumentar el gradiente de velocidad aplicado. Lo anterior da lugar a un hormigón con una elevada estabilidad, es decir, mínima tendencia a la segregación y exudación.

2.2.5. Cemento

En cuanto al tipo de cemento, no existen requisitos específicos para su uso en HAC (Cavalcanti, 2006) y se pueden usar todos aquellos que cumplan con la vigente Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08). Los criterios a seguir en la elección del cemento para obtener un HAC son similares a los empleados en un HT, y se pueden usar todos los cementos que cumplan con la normativa UNE-EN 197-1 (EFNARC, 2006) además de las especificaciones del artículo 37.3.2 y del artículo 26 del Anejo 17 de la EHE-08.

No obstante, existen cementos no convencionales que por sus características son muy apropiados para elaborar HAC, como es el cemento con belita, con escoria granulada de alto horno o con puzolanas, que hace que se obtengan mayores resistencias a largo plazo y un menor calor de hidratación (Uomoto y Ozawa, 1999). En la figura 2.5 se muestra la curva del calor de hidratación de un cemento Pórtland, retrasándose esta curva para los cementos compuestos que sustituyen parte del clínker por adiciones puzolánicas. Por otro lado, la utilización de cementos más finos, debido a la mayor superficie específica de los granos de cemento, aceleran su hidratación tanto en HAC como en HT, contribuyendo a ganar resistencia en el hormigón a edades más tempranas, por lo que la curva de la figura 2.5 se vería adelantada en función de la calidad y finura de los granos de cemento (Neville, 1997).

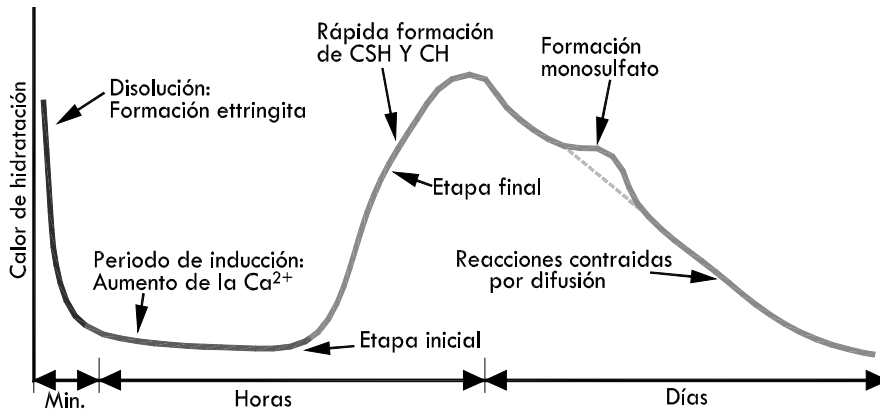


Figura 2.5. Evolución del calor de hidratación del cemento Portland (Adap. de Puertas, 1989)

La cantidad de cemento utilizada para la elaboración del HAC es, generalmente, mayor que la del HT y oscila normalmente entre un mínimo de 350 kg/m^3 para satisfacer la demanda de finos y un máximo de 550 kg/m^3 , cantidades variables dependiendo del tipo y cantidad de adiciones empleadas (Khayat et al., 1999, EFNARC, 2002, Gomes, 2002 y Fernández, 2007). Cantidades mayores de 450 kg/m^3 pueden aumentar considerablemente la retracción. El ACI 209R-92 (ACI-92) en su modelo de retracción tiene en cuenta la cantidad de cemento incluyendo el coeficiente γ_c (Tabla 2.2), el cual aumenta con el aumento de la cantidad de cemento, considerando $\gamma_c=1$ para 410 kg/m^3 .

Tabla 2.2. Factor corrector para el contenido de cemento, γ_c (ACI-92)

Cantidad de cemento(kg/m3)	γ_c
350	0,96
400	0,99
450	1,02
500	1,06
550	1,09
600	1,12

El Eurocodigo-2 (EC-2) y el Model Code 2010 CEB-FIB (CM-2010) incluyen en sus modelos de cálculo de retracción parámetros correctores en función del tipo de cemento utilizado. A mayor finura y velocidad de hidratación del cemento mayor será la retracción. En la figura 2.6 se muestran las diferentes valores de retracción según ambos códigos para un mismo hormigón de $f_{cm}=60\text{MPa}$, constatando unas similares tendencias con la variación del tipo de cemento, aunque un 80% mayores para las indicadas por el CM-2010.

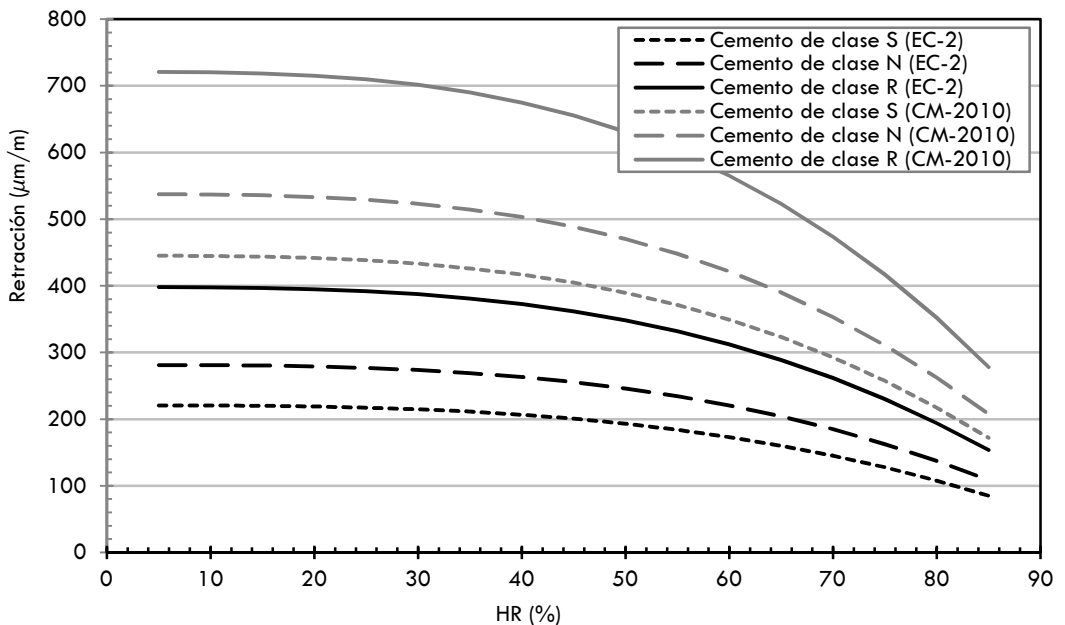


Figura 2.6. Relación entre la HR y la retracción de secado a 28 días según EC-2 y CM-2010 para un hormigón de $f_{cm}=60\text{MPa}$ con diferentes tipos de cemento

2.2.6. Pasta

El espesor óptimo de la capa de pasta, entre los áridos gruesos, se encuentra muy acotado, siendo mayor para los HAC frente a los HT. Si el espesor es demasiado pequeño hay demasiada fricción (aumento de la tensión umbral de corte) para alcanzar la autocompactabilidad. Si el espesor es demasiado grande los áridos gruesos se hunden, produciéndose la segregación. Con el agua se debe obtener una mínima fricción interna entre las partículas gruesas, las finas y el polvo en el estado fresco de los HAC (Shah et al., 2008). El volumen de pasta tiene que ser suficiente para llenar los vacíos del esqueleto granular y asegurar la fluidez del HAC (Giaccio et al., 2012). La mayor cantidad de pasta de los HAC, frente a los HT, los hace menos rígidos en estado endurecido y cuentan, por lo general, con menor módulo de elasticidad.

Midorikawa (2001) nombrado en Walraven, (2008) llevó a cabo ensayos a fin de encontrar el espesor óptimo de la capa de pasta, mostrándose los resultado en la figura 2.7 para una relación variable del volumen de agua/volumen de finos. Se observa que el espesor de la capa de pasta aumenta exponencialmente con $V_{\text{agua}}/V_{\text{finos}}$ por debajo de 0,8 (valor no relevante). La relación óptima en este caso es en el rango de

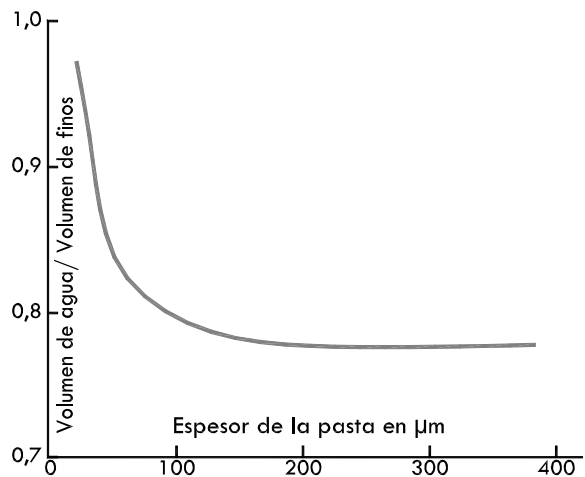


Figura 2.7. Relación entre el espesor de pasta óptimo y la relación volumen de agua/ volumen de finos (Midorikawa, 2001en Walraven, 2008)

$V_{\text{agua}}/V_{\text{finos}} = 0,8 - 0,9$, con espesores medios de la capa de pasta de unos 0,05 mm.

Ordóñez et al. (2008) en su investigación, con el fin de disminuir el tiempo de avance del fluido, en el ensayo de escurrimiento (T_{50}) y el tiempo de fluidez en el embudo en V, aumentó el contenido en pasta de la mezcla en 10 l/m^3 , obteniendo disminuciones de 8 segundos en el vaciado del embudo y de 1 segundo en el valor del T_{50} .

2.3. ESQUELETO GRANULAR

Los requerimientos de autocompactabilidad del hormigón determinan el contenido de árido grueso, el volumen de pasta y la relación entre el contenido de finos y de agua (Giaccio et al., 2012), siendo más determinantes cuanto mayor es el diámetro de los áridos gruesos. Estructuras poco armadas permiten aumentar el volumen de árido grueso en la mezcla de HAC, reduciéndose el volumen de mortero y pasta, con una menor demanda de finos y cemento lo que abarata el producto (Nepomuceno et al., 2012). El equilibrio entre el contenido de áridos gruesos y mortero debe ser tal que las partículas mayores sean recubiertas por una película de mortero. La relación agua/finos debe ser muy baja para obtener una matriz de alta viscosidad que evite el bloqueo de los áridos gruesos entre ellos y cuando el hormigón fluye a través de obstáculos (Giaccio et al., 2012).

El diseño del HAC basado en el ajuste previo sobre morteros constituye una herramienta recomendable. Además, el tamaño medio y el espaciamiento del paquete granular (calculados a partir del tamaño de partículas y las proporciones de los áridos fino y grueso) brindan

información útil para optimizar el proceso de diseño (Zerbino et al., 2008b). Aplicaciones o colocaciones distintas de los HAC conducen a dos tipos de esqueletos (Viacava et al., 2012).

Por un lado, están los esqueletos que presentan una distribución discontinua, con un elevado aporte de áridos finos, un pequeño aporte del árido intermedio y un mediano aporte de árido grueso que son ideales para bombear los HAC (figura 2.8). Por otro lado, aquellos que presentan una distribución continua (figura 2.9) son adecuadas para hormigonados donde la autocompactabilidad se obtiene por un deslizamiento de los áridos más gruesos sobre los áridos intermedios, y éstos a su vez sobre los más finos. Si el hormigón contiene un exceso de finos aumenta, por lo general, la viscosidad y puede disminuir su fluidez por asentamiento de los áridos gruesos y si hay una falta de finos aumenta la fricción entre los áridos. La cantidad de finos afecta a la fluidez, la cohesión y retención de agua, lo que puede repercutir en segregación y/o exudación del HAC (Santos et al., 2008).

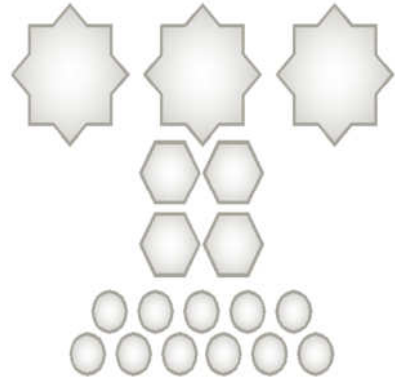


Figura 2.8. Granulometría discontinua

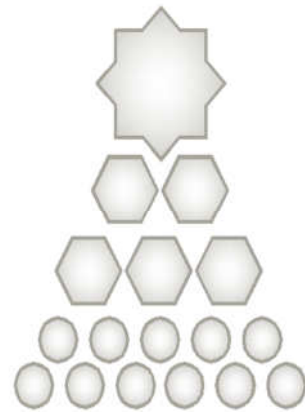


Figura 2.9. Granulometría continua

2.4. TIPIFICACIÓN DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

La tipificación del hormigón autocompactante es similar a la del hormigón convencional según se especifica en el Artículo 39.2 del Anejo 17 de la Instrucción EHE-08, con la salvedad de usar las siglas AC como indicativo de la consistencia(C), de acuerdo con la siguiente expresión: T-R/AC/TM/A

Alternativamente se puede clasificar el hormigón autocompactante en función de su grado de autocompactabilidad (ver apartado 2.8).

2.5. MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

Frente a los métodos teóricos más conocidos y consolidados de dosificación en los HT, en los HAC aún no existe un método universalmente aceptado. Con frecuencia, las tendencias en la dosificación de los HAC responden a extrapolaciones de criterios de los HT, incidiendo principalmente en las características del material en estado fresco. Distintos autores han propuestos diversos métodos para obtener hormigón autocompactante, a continuación se menciona alguno de ellos.

El método general de dosificación fue propuesto por Okamura y Ozawa en 1997. Probablemente sea el método más usado. Se consideraba que su constitución está básicamente conformada por árido grueso y mortero, fijando el volumen del árido grueso en el 50% del volumen sólido del hormigón y fijando el volumen correspondiente al árido fino como el 40% del volumen de mortero. La relación de agua/finos y la cantidad de superplastificante se obtiene mediante ensayos de fluidez de morteros. Luego se realizan pruebas sobre el

hormigón para determinar la dosificación final. El procedimiento concluye cuando se alcanza un diámetro de 650 mm en el ensayo de escurrimiento del HAC.

Posteriormente esta metodología fue modificada (Billberg, 1999a), proponiendo determinar el mínimo volumen de pasta y un determinado esqueleto granular que garantice el paso del hormigón por una determinada separación de armaduras sin que exista bloqueo. Ésta, es una de las diferencias con el método anterior, ya que se tiene en cuenta el volumen de huecos en el esqueleto granular, calculándose éste a partir del grado de compacidad de distintas relaciones entre el arrio grueso y fino. La cantidad de finos y de SP se determina mediante la utilización de un viscosímetro coaxial. Esta metodología es la que se conoce con el nombre de método CBI (Swedish Cement and Concrete Institute).

El método de dosificación LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) fue desarrollado por Sedran et al. (1996). Se basa en el modelo de suspensión de sólidos que consiste en utilizar un modelo computacional para determinar un esqueleto granular compacto, con el mínimo de vacíos, considerando el efecto pared y la viscosidad de la mezcla. Se fija inicialmente la dosificación de finos y se estima el contenido de superplastificantes mediante el cono de Marsh. Se ajusta finalmente el contenido de agua y de superplastificante para obtener la viscosidad deseada mediante el uso del reómetro y a través del ensayo de extensión de flujo.

En España, en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos, de la Universidad Politécnica de Cataluña se desarrolló, para hormigones autocompactantes de alta

resistencia, una metodología fundamentada en la utilización de los materiales disponibles en la zona y en el empleo de técnicas de ensayo de uso común. La metodología se basa en la optimización por separado de la composición de la pasta (cemento, microsílíce, filler, agua y superplastificante) y del esqueleto granular. Se define éste último por la relación óptima entre la arena y la grava que genere la máxima compacidad a la estructura granular en seco y sin compactar (Gómez et al., 2002).

2.6. DOSIFICACIONES TÍPICAS DE LOS HAC

Aunque la dosificación de las mezclas de HAC puede ser muy variada dependiendo de las características de los componentes empleados se pueden definir unos límites generales para los HAC.

En general, se puede observar que las cantidades de finos y superplastificante son altas comparadas con las utilizadas en HT. Asimismo, la dosificación del árido grueso es menor que la habitual, siendo inferior en peso, o por lo menos del mismo orden, que la de la arena. En este caso, todos los hormigones llevan filler complementado a veces por un AMV.

En el Anejo 17 de la Instrucción EHE-08, en su Artículo 71.3.2, se definen unos rangos típicos de los componentes del hormigón autocompactante por metro cúbico y están recogidos en la tabla 2.3. En la tabla 2.4 se muestran los rangos indicado en los trabajos de IECA, y en la tabla 2.5 se muestran algunas dosificaciones de HAC utilizadas por diferentes investigadores.

Tabla 2.3. Dosificación de un HAC según EHE-08

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

(*) Incluyendo la adición caliza del cemento y partículas de los áridos $< 63 \mu\text{m}$
 NOTA: las limitaciones de contenido de agua y cemento quedarán precisadas según las condiciones de exposición definidas en la Instrucción.

Tabla 2.4. Rango de valores de diferentes variables según IECA

Material	Contenido(kg/m^3)
Finos (Cemento+filler+adiciones)	380 - 600
Pasta (Cemento+filler+adiciones+agua)	530 - 810
Agua	150 - 210
Árido Grueso	650 - 900
Arena	(*)
Relación agua/polvo (volumen)	0,95 - 1,05

(*) Entre el 48 al 55 % del peso total del árido grueso más la arena

Tabla 2.5. Dosificaciones de HAC propuestas por distintos autores. (Gomes, 2002; Pacios, 2003 y Valcuende et al., 2008)

Mezclas (Kg/m ³)	Autores										
	Nagataki (1995)	Domone (1997)	Kim (1996)	Sakata (1996)	Sedran (1996)	Bartos (1999)	Umehar a (1999)	Ambroise y Péra (2001)	Su (2001)	Pacios et al. (2002)	Valcuende et al. (2008)
Cemento	250 – 200 - 390	218	370	331 – 331	350	280	360	380	300	450	350
Ceniza Volante	0.0 – 100 – 0.0	125	159	-	-	-	-	-	148	-	
Escoria	0.0 – 200 – 0.0	280	-	-	-	-	247	-	63	-	
Filler	250 – 0.0 – 0.0	-	-	216 – 216	134	240	-	20	-	100	45
Arena	805 – 704 – 829	686	782	713 - 713	852	865	774	900	928	840	1080,1
Grava	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10 mm	-	-	-	-	363	-	-	-	-	-	684,3
16 mm	-	-	-	-	-	-	803	800	-	-	
20 mm	820 – 898 – 920	785	820	888 – 888	571	750	-	-	718	770	
Superplastificante	8.5 – 6.0 – 11.7	8.2	10.0	5,95 – 8.3	7.1	4.2	6.40	4,00	8.8	9,60	5,25
Agente de viscosidad	0.0 – 0.0 – 5.0	-	0.50	0.0 – 0.35	-	-	-	2,0	-	-	1,23
Aire ocluido	-	0.8	-	0.05 – 0.02	-	-	-	-	-	-	
A/C	-	0.82	0.50	0.50	0.48	0.71	0.49	0,53	0.57	0,33	0,6
*A/Finos	-	0.28	0.35	0.30	0.34	0.36	0.29	0,50	0.40	0,27	0,36

*Relación agua/fino medida en peso

2.7. CARACTERÍSTICAS DE LOS HAC EN ESTADO FRESCO

El HAC a una escala macroscópica fluye como un líquido. Está formado por una pasta considerada como un líquido viscoso (partículas sólidas con agua) sobre la que se mantiene en suspensión los áridos. La fluidez y la viscosidad se pueden describir a través de la reología¹². Ésta estudia la deformación y el flujo de los materiales, relacionando el esfuerzo aplicado, las deformaciones sufridas y el tiempo de actuación de ambas.

Los fluidos ideales, como los líquidos y gases, se deforman irreversiblemente. La energía necesaria para la deformación se disipa como calor y no se puede recuperar mediante la eliminación de la tensión. Por el contrario, el sólido ideal se deforma elásticamente, recuperando la energía necesaria para la deformación cuando la tensión desaparece. Otra diferencia importante entre estos materiales es que, mientras la tensión de cizallamiento es la causante de la deformación en los sólidos, en los líquidos la causa un gradiente de velocidad de deformación (Schramm, 2006, citado por Miñano, 2010).

Otro parámetro importante para caracterizar un fluido es la tensión umbral de corte (τ). Ésta es consecuencia de las fuerzas internas entre las partículas, pudiendo romperse este vínculo al aplicar una fuerza determinada. Diferentes modelos de fluidos tratan de relacionar la μ y τ . En la figura 2.10 se muestra la relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad ($\dot{\gamma}$) de algunos de los diferentes tipos de

¹² Billberg (2001) indica que la reología del hormigón autocompactante debe ser optimizada desde la etapa de pasta y mortero hasta llegar al hormigón.

fluidos que existen¹³, siendo el de Bingham el que mejor se adapta al comportamiento del HAC, considerándolo como una suspensión de las partículas de árido en la pasta; como un sólido que no fluye hasta que la tensión tangencial aplicada supera un umbral o tensión crítica “yield stress” (τ_0). En ese momento comienza a comportarse como un líquido, presentando una relación lineal entre la tensión aplicada y la velocidad de deformación. El factor que más influye sobre el valor de la tensión crítica es la fricción que se genera entre las partículas sólidas. τ_0 es el valor con que la recta corta al eje de ordenadas y μ es la pendiente de la recta formada por τ y γ , es decir la viscosidad (figura 2.10, derecha).

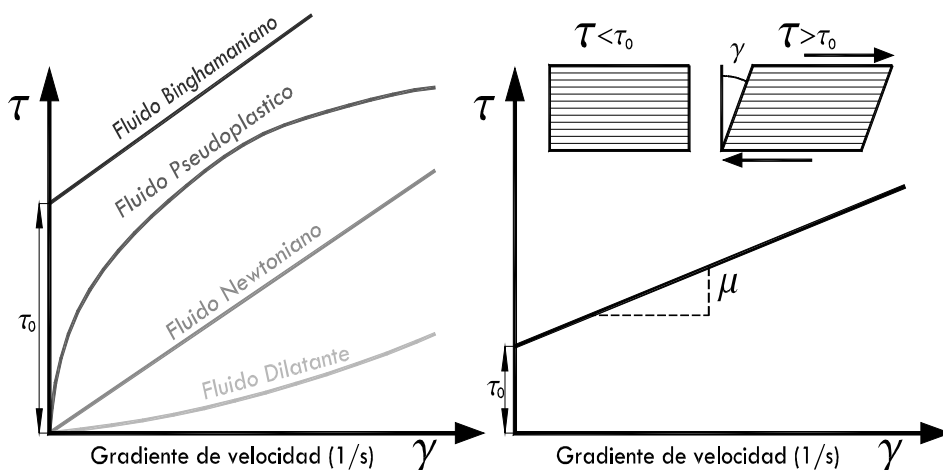


Figura 2.10. Izquierda, relación entre τ y γ de varios fluidos (Adaptado de Rodrigo, 2011). Derecha, relación entre τ , μ , y γ del HAC (Modelo de Bingham)

¹³ El tipo más sencillo de fluido es el newtoniano, donde la viscosidad es constante (pendiente de la recta) e independiente de la velocidad de cizalla. El agua es un fluido newtoniano.

La ecuación de la recta del modelo de Bingham es $\tau = \tau_0 + \mu\gamma$,
donde;

γ es la velocidad de deformación (1/s)

τ_0 es la tensión umbral de corte (en Pa)

μ es similar al coeficiente de viscosidad de los líquidos newtonianos y se lo denomina “viscosidad plástica” (en Pa*s).

La tixotropía es un aspecto importante de la reología del hormigón, especialmente de los HAC, no manteniéndose constante la relación entre el esfuerzo cortante y la viscosidad, pudiendo aumentar ésta si la tensión de corte se establece en cero durante un período de tiempo. La viscosidad original retorna al aplicar un nuevo esfuerzo cortante. Así, durante el amasado la microestructura se altera reduciéndose su viscosidad y aumentando su fluidez. Cuando el esfuerzo de corte es inferior a τ_0 el HAC se mantiene en reposo (Wang k. et al 2005). En la figura 2.11 la tixotropía se ilustra como un efecto de histéresis¹⁴ entre el aumento y disminución del gradiente de velocidad (Wallevik y Nielsson, 2003).

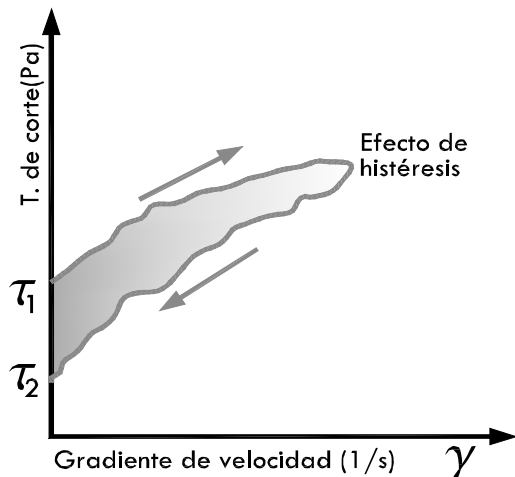


Figura 2.11. Comportamiento tixotrópico y efecto de histéresis de un material

¹⁴ Fenómeno por el que el estado de un material depende de su historia previa. Se manifiesta por el retraso del efecto sobre la causa que lo produce. El área entre las curvas de aumento y disminución de la velocidad de deformación (zona difuminada de la figura 2.11) puede entenderse como la 'energía' necesaria para romper la estructura tixotrópica (Wallevik y Nielsson, 2003).

Trabajabilidad, estabilidad, consistencia y compactación de los hormigones son propiedades que dependen en gran medida de parámetros como la densidad de las partículas, el ángulo de fricción interno, la adherencia y la viscosidad. La fluidez caracteriza la facilidad con la que el HAC pasa a través de la armadura. La viscosidad del HAC asegura que las partículas se mantengan suspendidas, facilitando el movimiento sin fricción y con una distribución uniforme, evitando su segregación y/o exudación (Tojal et al., 2012).

Un HAC, frente a los HT, se caracteriza por poseer una tensión umbral de corte muy baja y una viscosidad plástica hasta 10 veces menor, necesarias para garantizar el transporte, llenado y consolidación del HAC, y todo ello sin segregación (Zerbino et al., 2006).

Para alcanzar la autocompactabilidad deben tenerse en cuenta numerosos factores. En la figura 2.12 se muestra un esquema de ello. (Okamura y Ouchi, 1999).

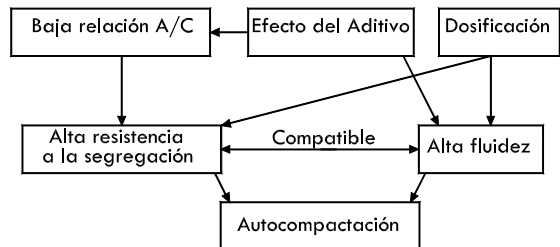


Figura 2.12. Factores en la autocompactación

El valor de τ_0 de la mezcla debe ajustarse con los aditivos superfluificantes que son los responsables de dispersar las partículas de cemento. Pero la sola utilización de un aditivo superfluidificante no es siempre suficiente ya que esto puede conducir a la obtención de mezclas segregables.

Si el HAC tiene una viscosidad plástica en torno a $40 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ¹⁵, la tensión umbral de corte deberá ser elevada (Wallevik, 2003) para evitar la segregación, al no ser capaz de mantenerse una dispersión homogénea de todos sus componentes (Khayat y Daczko, 2002). Si el HAC tiene una viscosidad alta, es decir, mayor de $70 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, la tensión de corte podrá ser muy baja, cercana a 0 Pa .

Shah et al. (2007) determinan la existencia de unos valores máximos y mínimos recomendables de μ y τ_0 para una autocompactabilidad adecuada. En la figura 2.13 (izquierda) se muestra el concepto de "ventana de autocompactabilidad" según estos autores, quedando delimitada por 2 vértices, el superior que marca el límite con la zona óptima de resistencia a la segregación y el inferior que marca el punto óptimo para autocompactarse. Esto coincide con lo sugerido por Wallevik y Nielsson (2003), quienes proponen una zona de autocompactabilidad (figura 2.13, derecha).

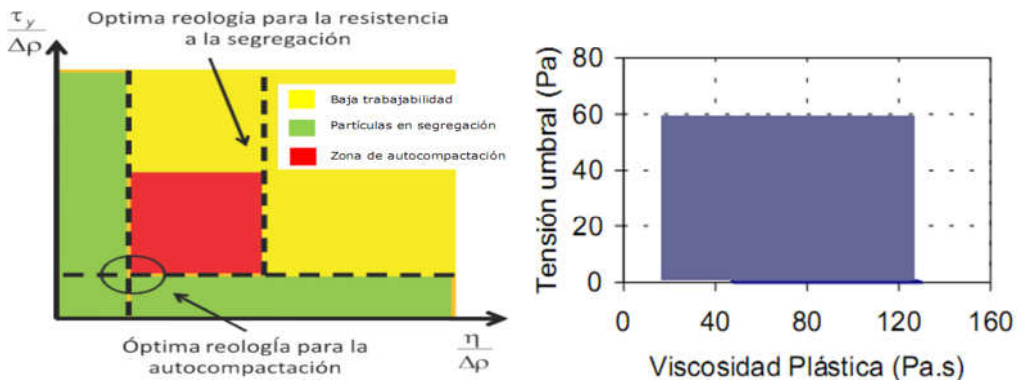


Figura 2.13. Izquierda, ventana de autocompactabilidad (Zegarra y Rodríguez, 2011, en Shah et al., 2007). Derecha, zona del HAC (Wallevik y Nielsson, 2003)

¹⁵ Una viscosidad muy baja podría afectar la estabilidad de la mezcla, mientras que la viscosidad alta puede conducir a la obstrucción de los áridos en contacto con las armaduras y a deficiencias en el acabado de la superficie de hormigón.

La τ máxima recomendada para los HAC (menor a 60 Pa, Wallevik y Nielsson, 2003) es mucho menor que la de un HT (de 100 a 1000 Pa). En la figura 2.14 (izquierda) se muestra una comparativa de las propiedades reológicas de diferentes hormigones en estado fresco. Cuanto menor sea el valor de la tensión de inicio de flujo (τ) más rápido fluye el hormigón (Newman y Choo, 2003). En la figura 2.14 (derecha) se muestra la influencia de los diferentes componentes de la mezcla en la reología de los HAC. En este sentido, el contenido del agua afecta a la viscosidad plástica y la resistencia al flujo. A mayor contenido de agua ambos parámetros se reducirán en términos significativos. Los superplastificantes se caracterizan por el aumento de la fluidez con una reducción pequeña de la viscosidad (Okamura, 1997; Zerbino et al., 2006). Este comportamiento se puede justificar en base a la dispersión de los flocúlos y al aprovechamiento del agua atrapada entre los mismos, siendo los efectos más notorios en mezclas con bajas relaciones a/c. El aire incorporado en la mezcla reduce ambos parámetros. En general a medida que aumenta el contenido de aire los efectos sobre la viscosidad son menores.

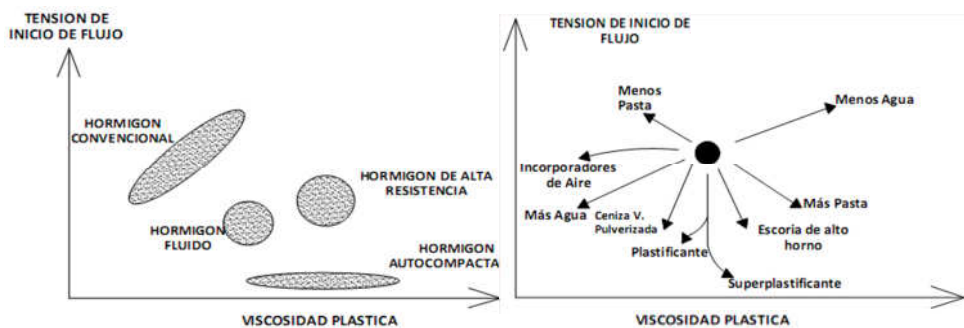


Figura 2.14. Izquierda, propiedades reológicas por tipos de hormigón. Derecha, efecto de los componentes del HAC sobre la reología de la mezcla (Newman y Choo, 2003)

De igual forma, también influye en este comportamiento el tipo de cemento utilizado. Por lo general, a mayor finura del cemento mayor μ se obtiene (Santos et al., 2004). Los componentes del cemento afectan igualmente a la reología de los HAC, a mayor velocidad de hidratación mayor será la μ . Entre los compuestos de mayor incidencia aparecen el contenido de sulfatos y el de C_3A (Zerbino et al., 2006).

Otros aspectos a tener en cuenta son el tipo de árido, aditivos y cantidad de agua. Los áridos machacados, frente a los de canto rodado, aumentan la consistencia y viscosidad, disminuyendo la fluidez por la mayor fricción interna de los áridos. Aumentos en el contenido de agua y en los aditivos reductores de agua, en especial los superplastificantes, reducen la viscosidad plástica y en gran medida la resistencia al flujo, similar al efecto que produce la utilización de áridos más redondeados (Zerbino et al., 2008b).

En general, el valor de μ y τ de un hormigón vibrado es lo suficientemente alto como para evitar que el hormigón fresco segregue. Los hormigones de alta resistencia poseen habitualmente mayor viscosidad plástica que un HT, en gran parte debido a su menor relación agua/ligante, y también presenta una menor τ . La relación agua/finos influye de forma muy determinante en

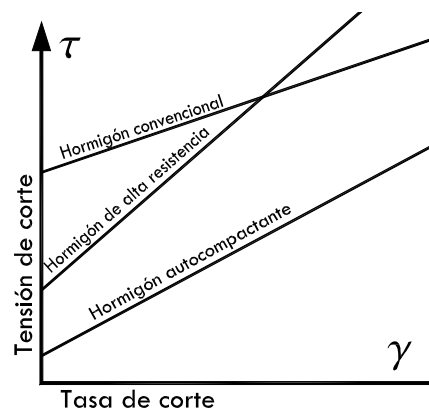


Figura 2.15. Tensión de corte para HAC, HT y HAR

la reología y sobre todo en la μ del HAC (figura 2.15). Además, la tipología del aditivo SP de nueva generación, su compatibilidad y su dosificación afectarán también en gran medida sobre la reología del HAC (Borralleras, 2012). En la figura 2.16 se muestra una comparación entre las curvas de flujo de un HT vibrado y varios casos de un HAC.

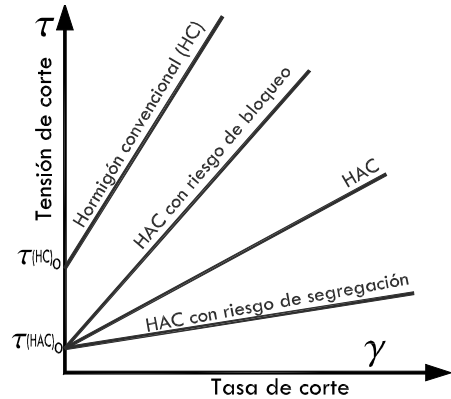


Figura 2.16. Curvas de flujo de hormigones

La viscosidad plástica se asocia, en parte, al tamaño y número de flóculos formados inicialmente, mientras que la tensión de corte se asocia con la fuerza de interacción entre dichos flóculos sumado a la fricción interna de los áridos (Alonso et al., 2012). Son la combinación de μ , τ y densidad de la matriz las que contribuye a mantener en suspensión¹⁶ a las partículas mayores de los hormigones (Flatt, 2004).

Burgo et al. (2012) indican que la viscosidad tiene una dependencia exponencial al contenido de sólidos de la mezcla. Sustituciones mayores del 30% del cemento Portland por caliza afectan a las propiedades reológicas de la pasta. Cementos con un 50% de caliza presentan una menor demanda de agua de amasado que el cemento sin adición. La adición de cenizas volantes reduce la cantidad de agua mínima necesaria para obtener una adecuada fluidez.

¹⁶ Las fuerzas que actúa en las partículas de los HAC son varias; la gravedad, la inercia, viscosidad de arrastre, dispersión (van der Waals), electrostática y Browniano..

Para la autocompatibilidad, la fricción entre las partículas tiene que reducirse sin perjudicar la estabilidad de hormigón en estado fresco (robustez¹⁷ del HAC). Además, se debe mantener sus características en estado fresco dentro de los rangos especificados, aún cuando se producen pequeñas variaciones en los componentes (fiabilidad¹⁸), como en el caso del contenido de finos, que con apenas incrementos de 30 o 40 kg/m³, pueden conducir a dosificaciones no aceptables (Wilker, 2007). Además, durante el periodo desde la fabricación del HAC hasta su puesta en obra (tiempo abierto¹⁹) deben garantizarse la fiabilidad y la robustez del HAC.

La trabajabilidad del HAC depende principalmente de la reología de éste. Por lo general, viscosidades bajas mejoran la trabajabilidad de los HAC debido a las menores fuerzas internas a vencer. Una alta viscosidad, bien por alta floculación de partículas de cemento o por alto contenido de finos, hace aumentar las fuerzas internas entre partículas lo que perjudica su trabajabilidad. El aire ocluido en el HAC mejora su

¹⁷ El término 'robustez' es entendida en un HAC como la capacidad de mantener sus propiedades frescas con uniformidad durante el amasado, transporte y colocación en obra, incluso con la presencia de pequeños errores de dosificación. El HAC es más susceptible a cambios e inestabilidades y, por tanto, cuenta con una menor robustez que los hormigones convencionales, principalmente por las dosificaciones más complejas y por su efecto tixotrópico.

¹⁸ Un hormigón fiable se considera aquel capaz de mantener sus características en estado fresco dentro de los rangos especificados, aun cuando se producen pequeñas variaciones en las propiedades o cantidades de los componentes, en la variación de la temperatura o una combinación de ellos (ACHE, 2008). Con variaciones de los constituyentes inferiores al 1% el hormigón se debe considerar robusto. Errores de pesaje, como un mayor contenido de cemento, adiciones minerales o árido grueso implican un menor diámetro de escurrimiento, una mayor viscosidad y una mayor resistencia, mientras que un exceso del contenido de agua o de áridos finos tiende a provocar el efecto inverso, hasta llega a la segregación de la mezcla (Gettu et al., 2008 y Ruiz et al., 2012).

¹⁹ La instrucción EHE-08 define el tiempo abierto de un hormigón como el que transcurre desde la fabricación hasta su puesta en obra y sin alterar las características de autocompactabilidad. Incorporación de un aditivo superplastificante o un aditivo retardador del fraguado pueden aumentar el tiempo abierto en un hormigón (ACHE, 2008). A partir de los 30 minutos después de finalizado el amasado las características de autocompactabilidad empiezan a verse afectadas. Las mejores respuestas reológicas de los HAC se produce en temperaturas del entorno de los 20°C, siendo los HAC más sensibles a temperaturas superiores a los 30°C (Zerbino, et al 2006). Los superplastificantes convencionales muestran limitaciones cuando se requieren tiempos abiertos superiores a 30 – 40 minutos (según temperatura y materiales). Para tiempos mayores (hasta 1,5 horas) solamente se consigue con aditivos SP de nueva generación (Borralleras, 2012).

trabajabilidad, pudiendo acarrear problemas de trabajabilidad con valores inferiores al 2%, siendo entre el 2 y 4% un valor óptimo (Borralleras, 2012).

El D.T. Institute (2010) delimito como zona de buena trabajabilidad a los HAC con viscosidades por debajo de $45 \text{ Pa}^* \text{ s}$, no limitando la tensión de corte (figura 2.17), aunque Zerbino et al. (2008a) indican que la pérdida de trabajabilidad con el paso del tiempo se traduce en cambios reológicos, sobre todo en la τ .

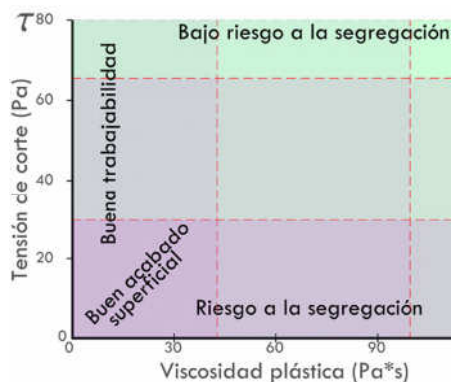


Figura 2.17. Comportamiento de los HAC. D.T. Institute (2010)

2.7.1. Influencia de los aditivos y adiciones

La reología y los áridos de un HAC están muy vinculados. La cantidad y forma de los áridos gruesos marcan las restricciones y fricciones internas del hormigón. La cantidad de árido fino, adiciones y cemento, forman el volumen de mortero y pasta que permiten mantener en suspensión a los áridos gruesos con una adecuada viscosidad.

El aumento de la robustez de los HAC se logra, por lo general, mediante el aumento de la viscosidad de la mezcla a través de la selección de los materiales y de la incorporación de agentes modificadores de viscosidad (AMV) y/o de finos. Con adiciones de filler calizo, metacaolín o polvo de cuarzo, entre otros, se consiguen aumentar la tensión de corte, mientras que el humo de sílice la disminuye.

Las adiciones, por lo general, actúan como rodamientos entre las partículas mayores, evitando rozamientos entre los áridos gruesos, pero hacen aumentar la fricción interna de la pasta de cemento, aumentando la viscosidad de ésta. Las fuerzas que actúan sobre los áridos gruesos son diferentes en reposo que en movimiento²⁰ del HAC.

Los AMV mejoran considerablemente la robustez al aumentar la resistencia al sangrado y segregación del HAC (Ruiz et al., 2012). Con cantidades de AMV a partir de 0,25% se puede mejorar sustancialmente la robustez de estos hormigones (Gettu et al., 2008).

2.7.2. Presión sobre los encofrados

La utilización del HAC produce presiones²¹ iniciales en los encofrados superiores a las de un HT, generalmente similar a la hidrostática, aumentando con la mayor altura de los encofrados y disminuyendo con el aumento de la τ y μ (figura 2.18). Además, el HAC, de acuerdo a la naturaleza de sus componentes, puede o no ofrecer una respuesta tixotrópica²² (Loureda et al., 2012), permitiendo que los hormigones en reposo adquieran tensiones internas que disminuyen la fluidez y, por tanto, la presión que ejercen sobre los encofrados, posibilitando desencofrar a edades más cortas. Contenidos altos de finos y una alta viscosidad generan una tixotropía mayor.

²⁰Es en reposo cuando más propenso es el hormigón para que aparezca la segregación. Durante el flujo horizontal las partículas de árido son sometidas a fuerzas adicionales como la de arrastre, que ayudan a mantener las partículas suspendidas en la mezcla.

²¹En la variación de las presiones ejercidas sobre el encofrado influye la reordenación de las partículas sólidas y se rige fundamentalmente por la matriz de la pasta, considerando a los áridos como inertes (Shah et al., 2008).

²²Esta característica permite que la viscosidad pueda ir cambiando aunque el esfuerzo aplicado sea constante, rompiéndose su estructura durante el movimiento y reconstruyéndose al volver al reposo (Loureda et al., 2012).

Con el paso del tiempo desde el amasado del HAC, la tensión de corte aumenta disminuyendo las presiones ejercidas sobre el encofrado (figura 2.18).

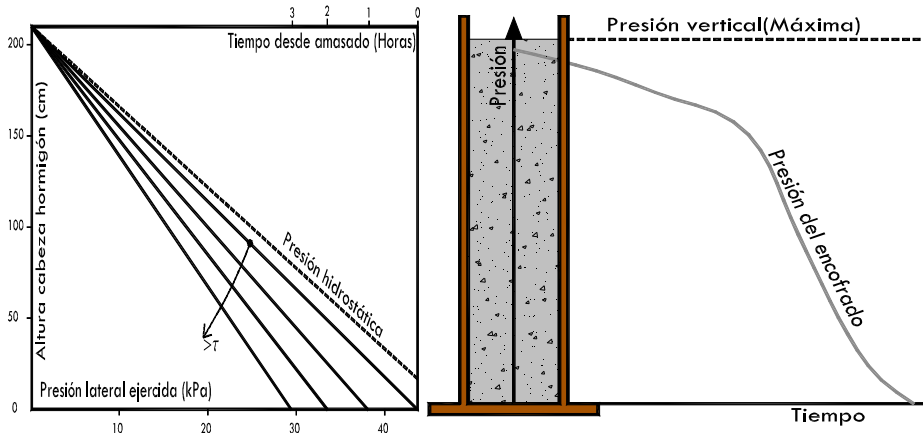


Figura 2.18. Izquierda, relación de reología y presión lateral. Derecha, evolución de presión

Aumentos del contenido de aditivo superplastificante o de la relación agua/cemento puede incrementar las presiones laterales iniciales debido a una reducción de la cohesión y de la viscosidad. El aumento del contenido de áridos en el HAC reduce las presiones iniciales y acelera su desaparición por la mayor fricción entre las partículas. Los HAC bombeados de abajo hacia arriba al evitar el efecto build-up²³ experimentan mayores presiones que los puestos en obra desde arriba (Ruiz et al., 2012).

Son tres los parámetros de trabajabilidad y calidad que debe cumplir un HAC; la capacidad de relleno, la capacidad de paso y la resistencia a la segregación. En general, las dos primeras se oponen a la última (Zerbino et al., 2008a). A continuación se profundiza en todas ellas.

²³El efecto build-up en los HAC permite adquirir fuerzas internas que disminuyen la presión sobre los encofrados. Con el movimiento del HAC se reduce el efecto.

2.7.3. Capacidad de relleno

La capacidad de relleno está relacionada con la movilidad y fluidez del hormigón. El HAC, en algunas ocasiones, debe fluir a través de pequeñas aberturas en el encofrado o a través de una gran congestión de armaduras, debiéndose garantizar el no bloqueo del mismo. En cercanías de la abertura se puede producir una colisión entre las partículas de los árido, que puede provocar lo que se denomina el “efecto arco”, bloqueando el paso del resto de las partículas (figura 2.19). Esto se ve potenciado por áridos de formas muy angulosas que producen mayores engranajes y puntos de fricción (Okamura, 1997). Una forma de mejorar la capacidad de paso es aumentar la viscosidad de la mezcla, reduciendo además el riesgo de segregación. Esto se obtiene disminuyendo la relación agua/finos y/o utilizando aditivos moduladores de la viscosidad.

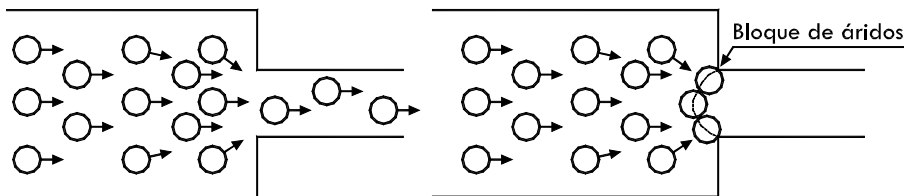


Figura 2.19. Mecanismo de bloqueo (Adaptado de Gomes y Barros, 2009)

2.7.4. Resistencia a la segregación

Para que el hormigón fluya a través de los obstáculos sin segregación, el esfuerzo de corte generado debe ser suficientemente pequeño para permitir el desplazamiento relativo y que no se produzca un grado de fricción e interferencia que evite el flujo y cause separación de los materiales, en especial los áridos gruesos del mortero (Okamura y Ouchi, 2003). Por tal motivo, debe existir una compatibilidad entre el tamaño y cantidad de partículas grandes en el HAC y el espacio libre entre barras de armaduras y aberturas de los encofrados a través de los cuales debe fluir el hormigón (figura 2.20).

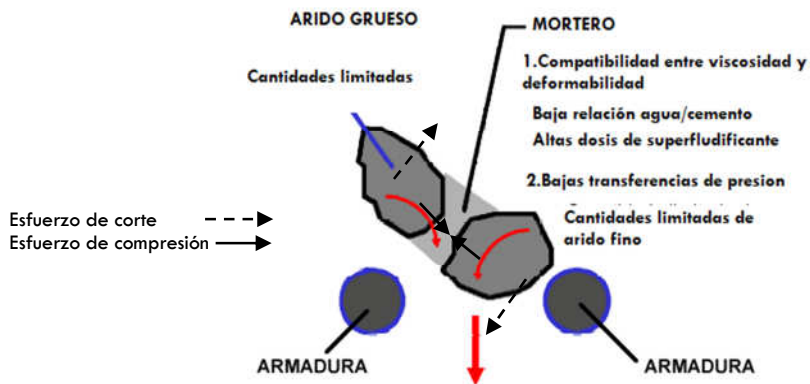


Figura 2.20. Generación de esfuerzos debido a desplazamiento relativo entre partículas de áridos gruesos. Mecanismo para la autocompactación (Okamura y Ouchi, 2003)

Reduciendo la cantidad de agua se aumenta la cohesión del hormigón (con riesgo de bloqueo), mientras que el aumento tiene el efecto opuesto, llegadon a la segregación y/o exudación. Esto puede ocurrir cuando los componentes del hormigón se separan, y su distribución no es homogénea. Puede manifestarse como exudación, separación del árido grueso, distribución no uniforme de los poros de aire o separación entre el

árido y la pasta, repercutiendo en el comportamiento mecánico y en la durabilidad del hormigón (Santos et al., 2012).

La tensión de corte, la viscosidad, el diámetro de los áridos, la densidad de la pasta y de los áridos son las variables más importantes a estudiar en la segregación. La adecuada viscosidad del HAC permite mantener los áridos en suspensión mientras la mezcla se desplaza de forma homogénea. Para evita la exudación es recomendable emplear la mínima cantidad de agua por m^3 de HAC, con una adecuada relación a/c y todo ello sin que disminuya significativamente la movilidad de la mezcla. Un aumento en la dosificación del SP conduce a un aumento de la fluidez y reduce la viscosidad de la mezcla y un exceso puede provocar segregación.

La segregación puede clasificarse en dinámica y estática, con las siguientes características:

-La dinámica es aquella que se produce durante el vertido o la colocación, cuando el HAC debe fluir dentro de los encofrados. Es fácilmente detectable mediante la realización de los ensayos en estado fresco y debe corregirse durante la etapa de diseño.

-La estática es más difícil de evaluar y está asociada a los fenómenos de sedimentación que pueden producirse una vez que el hormigón se encuentra en reposo dentro del encofrado. Es factible que mezclas que muestren un adecuado comportamiento frente a la segregación dinámica presenten segregación en estado de reposo.

En ambos tipos se puede mejorar la resistencia la segregación de la mezcla de las siguientes formas:

- Reduciendo el contenido de árido, sobre todo del grueso.
- Reduciendo el tamaño máximo del árido grueso.
- Reduciendo la relación agua/finos.
- Utilizando aditivos moduladores de la viscosidad.

Cuanto menor es la cantidad de árido grueso (implica mayor cantidad de árido fino y pasta), mayor es la capa de pasta que se forma entorno a los áridos grueso, permitiendo mantenerlos en suspensión, siempre que no se supere el umbral o punto crítico de máximo recubrimiento, donde un exceso impide mantener en suspensión a los áridos de mayor tamaño. A este respecto Okamura y Ouchi (2003) indican que un aumento en el espesor (mediante la disminución del contenido de agua) de la capa de pasta que se sitúa alrededor de los áridos puede conducir a la segregación. Bajos espesores de esta capa producen aumentos de fricción y por tanto aumenta la τ . Menor relación agua/finos implica mayor viscosidad en la pasta manteniendo constante la relación a/c , lo que repercute igualmente en una mayor flotabilidad de los áridos grueso.

Cuanto menor es el tamaño de las partículas menor es el riesgo de segregación. Además, se puede disminuir el riesgo con el uso de aditivos moduladores de la viscosidad que están basados en polímeros de alto peso molecular que en la mayoría de casos actúan reteniendo agua, mejorando la cohesión del hormigón y la resistencia a la segregación. El incremento del contenido de finos por la incorporación de cemento o adiciones (cenizas volantes, escorias de alto horno o filler calizo), por lo general, aumentan la viscosidad del hormigón y reducen el riesgo a la segregación (Valcuende et al., 2007).

Los ensayos de escurrimiento (Slump flow) y embudo (V-funnel) no son suficientemente sensibles para cuantificar la estabilidad de una mezcla, por lo que es necesario realizar ensayos específicos para poder obtener resultados concretos en el estudio de la segregación (Valcuende et al., 2007). Así lo constatan Santos et al. (2012), obteniendo buenos resultados en el ensayo de escurrimiento con áridos gruesos arrastrados hasta los extremos de la circunferencia formada por el hormigón, mientras obtienen segregación en la dirección vertical en casos de aplicaciones en altura. Estas diferencias son debidas a que en el ensayo de escurrimiento no se aprecia la segregación estática.

2.8. ENSAYOS DEL HAC EN ESTADO FRESCO

Los métodos convencionales de caracterización del hormigón en estado fresco no son aplicables, por lo que se han desarrollan nuevos procedimientos específicos de ensayo en función de la característica a analizar (tabla 2.6.). En la tabla 2.7 se exponen de manera esquemática los ensayos más comunes y las características que evalúan cada uno.

Tabla 2.6. Las cuatro características principales que definen el estado fresco de los HAC y métodos de ensayos que los analiza

CARACTERÍSTICA	MÉTODOS DE ENSAYO IDÓNEOS
Flujo.	Ensayo de asentamiento o escurrimiento.
Viscosidad	T500 , ensayo de asentamiento o ensayo del embudo en V.
Capacidad de paso.	Ensayo de la caja en L.
Segregación.	Ensayo de resistencia a la segregación.

Tabla 2.7. Métodos utilizados para evaluar las propiedades en fresco del HAC

Ensayo	Resultado	Unidad	Propiedad	Rangos admisibles
Escurrimiento	T_{500} $\varnothing F$ T_{final}	s mm s	Capacidad de fluidez Resistencia a la segregación.	$\leq 8 s^*$ 550 a 850 mm*
Embudo en V	T_V TV-5 min	s s	Capacidad de relleno Capacidad de paso Resistencia a la segreg.	$4 s \leq T_V \leq 20 s^*$
Escurrimiento con anillo J	D_{fJ} T_{J50} C_{bE} $D_f - D_{fJ}$	mm s - mm	Resistencia al bloqueo.	$\geq D_f - 50mm^*$ $0,75 \leq C_{bE} \leq 1,00$ $\leq 50 mm$
Caja en L	T_{60} C_{bL}	s -	Resistencia al bloqueo Resistencia a la segregación.	- $0,75 \leq C_{bL} \leq$
Caja en U	h	mm	Capacidad de relleno.	$\geq 30 cm$
Tubo en U	RS	0,90	Resistencia a la segregación Estabilidad del hormigón.	0,90

El ensayo de escurrimiento, la caja en L , el embudo en V y algún otro se describen con más detalle a continuación:

2.8.1. Ensayo de escurrimiento o Slump Flow

El ensayo de escurrimiento consiste en rellenar el cono de Abrams de una sola vez y sin ningún tipo de vibrado (figura 2.21). Tras retirar el molde se mide el tiempo que tarda el hormigón en alcanzar un diámetro medio de 500 mm, (T_{500} o T_{50}). Una vez que cesa el movimiento, se mide el diámetro final alcanzado por el hormigón ($\varnothing f$).

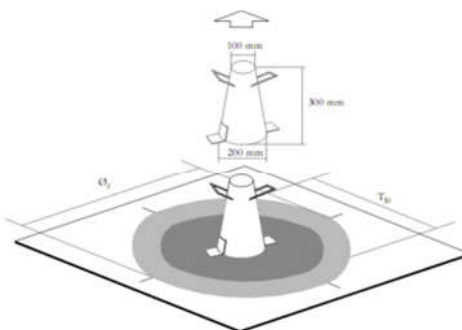


Figura 2.21. Esquema del Slump Flow (Parra, 2005)

El valor del ensayo de escurrimiento describe el flujo de una mezcla fresca y no confinada. Es un ensayo delicado que normalmente

será indicado como ensayo inicial para todos los HAC para verificar que la consistencia del hormigón cumple con las especificaciones. En el desarrollo del ensayo de escurrimiento no solamente se extraen los valores T_{500} y ϕ_f que caracterizan la fluidez y viscosidad del HAC, fenómenos negativos como la exudación o segregación también pueden detectarse (figura 2.22 y 2.23). Las principales propiedades que debe presentar un HAC en estado fresco son su fluidez²⁴ y su resistencia a la segregación²⁵.



Figura 2.22. Izquierda, buen reparto de árido en el avance del fluido.
Derecha ensayo de escurrimiento con síntomas de exudación



Figura 2.23. Izquierda, indicios de exudación en el llenado del cono.
Derecha ensayo de escurrimiento con síntomas de exudación

²⁴ Su alta fluidez es necesaria para asegurar el adecuado escurrimiento bajo su propio peso.

²⁵ Una adecuada resistencia a la segregación es necesaria para asegurar que sus componentes, en especial el árido grueso, se mantengan uniformemente distribuidos en el HAC cuando se encuentre en reposo o en movimiento, y sin que se produzcan bloqueos.

Los valores normales en el Slump Flow, para los distintos tipos de asentamiento, y su campo de aplicaciones se describen a continuación.

Tabla 2.8. Clasificación de autocompactabilidad (Instrucción EHE-08)

Clase	Criterio según UNE 83.361
AC-E1	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 650 \text{ mm}$
AC-E2	$650 \text{ mm} < d_f \leq 750 \text{ mm}$
AC-E3	$750 \text{ mm} < d_f \leq 850 \text{ mm}$

-AC-E1 (550 – 650 mm) es apropiado para:

- Estructuras en masa o de poca densidad de armaduras que sean llenadas desde la parte superior con desplazamiento libre desde el punto de entrega, (p.e. losas de cimentación o pavimentos).
- Hormigones de relleno por bombeo (p.e. encofrados de túneles).
- Elementos suficientemente pequeños que no precisen largos flujos horizontales (p.e. pilares y algunas cimentaciones profundas).

-AC-E2 (660– 750 mm) es adecuado para la mayoría de aplicaciones normales (p.e. muros y pilares).

-AC-E3 (760– 850 mm) se elabora normalmente con una limitación del tamaño máximo de los áridos (menor de 16 mm) y se usa para aplicaciones verticales en estructuras muy armadas o de formas complejas. El AC-E3 deja, por lo general, un mejor acabado superficial que el AC-E2 en aplicaciones verticales, pero la segregación es más difícil de controlar.

Valores mayores de 850 mm pueden especificarse en algunos casos especiales, pero deberán extremarse las precauciones para evitar la segregación. El tamaño máximo de los áridos será normalmente menor de 12 mm.

2.8.2. Embudo en V

El ensayo del embudo en V (figura 2.24), ha sido desarrollado especialmente para la prueba de HAC. Se mide la velocidad del flujo (tiempo necesario para vaciarse el embudo). Un rápido flujo inicial indica una baja viscosidad. Flujo continuo durante un largo tiempo indica alta viscosidad del fluido. Con el embudo en V se registra el tiempo (T_v) consumido por el hormigón en vaciar un embudo. En la tabla 2.9. se muestran los rangos indicados por la EHE-08.

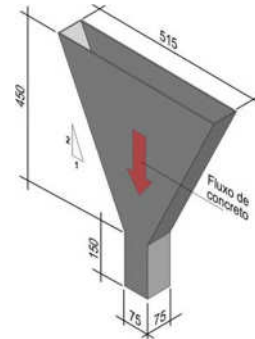


Figura 2.24. Ensayo de embudo en V

Tabla 2.9. Tipo de viscosidad y rango (EHE-08)

Clase	Escorrentamiento, UNE 83.361	Embudo en V, UNE 83.364
AC-V1	$2,5\text{seg} < T_{50} \leq 8\text{seg}$	$10\text{seg} \leq T_v \leq 20\text{seg}$
AC-V2	$2\text{seg} < T_{50} \leq 8\text{seg}$	$6\text{seg} \leq T_v \leq 10\text{seg}$
AC-V3	$T_{50} \leq 2\text{seg}$	$4\text{seg} \leq T_v \leq 6\text{seg}$

Los hormigones de clase AC-V2 y AC-V3 tienen una buena capacidad de llenado aún con alta densidad de armaduras. Suele tener mejor acabado superficial aunque son más propensos a presentar exudación y segregación. Los AC-V1 ejercen menos presión a los encofrados y tiene mayor resistencia a la segregación²⁶, pudiendo verse perjudicado el acabado superficial o el efecto de las juntas frías.

²⁶ El efecto de tixotropía puede contribuir a ello, no manteniéndose constante la relación entre el esfuerzo cortante y la viscosidad.

2.8.3. Caja en L

El ensayo de la caja en L (figura 2.25) consiste en hacer fluir una columna de HAC a través de un obstáculo de barras hacia una caja rectangular. Una vez que cesa el movimiento se miden las alturas de la masa de hormigón en ambos extremos de la caja y se define un coeficiente de bloqueo (CbL) como la relación entre ambas alturas. Diversos países, entre ellos España, han aceptado e incluido este ensayo en sus normas. En la tabla 2.10 se muestran los parámetros marcados por el Anejo 17 de la EHE-08.

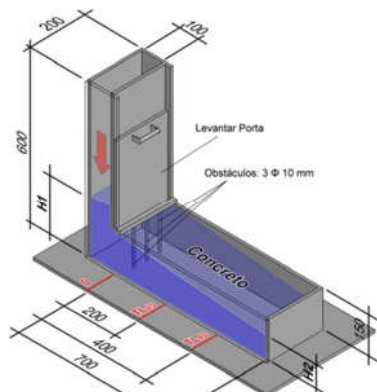


Figura 2.25. Ensayo de caja en L

Tabla 2.10. Clases de resistencia al bloqueo. (Anejo 17 EHE-08, 2008)

Clase	Exigencia	Anillo J, UNE 83.362	Caja en L, UNE 83.363
AC-RB1	Si $TM > 20\text{mm}$ ó $80 \leq \text{espesor(huecos)} \leq 100\text{mm}$	$dJf \geq df - 50\text{mm}$, con anillo de 12 barras	$\geq 0,80$, con 2 barras
AC-RB2	Si $TM < 20\text{mm}$ ó $60 \leq \text{espesor(huecos)} \leq 80\text{mm}$	$dJf \geq df - 50\text{mm}$, con anillo de 20 barras	$\geq 0,80$, con 3 barras

2.8.4. Anillo Japonés

Este ensayo evalúa la fluidez y la capacidad de paso del hormigón a través de las barras de acero. El anillo Japonés consiste en un anillo, por lo general, de 300mm de diámetro, compuesto de barras de acero²⁷ y puede ser utilizado en los ensayos de Ecurrimiento u Orimet (figura 2.26 y 2.27). En ambos casos el ensayo se desarrolla liberando una determinada masa de hormigón en el centro del anillo. El hormigón debe fluir a través de las barras de acero sin que el árido grueso se quede bloqueado entre las mismas.

Al igual que en el escurrimiento, se medirá el tiempo T_{500} y el diámetro final. Además se medirán las alturas H_1 y H_2 alcanzadas por el HAC en los bordes interior y exterior del anillo. En el anejo de la EHE se recomienda que los diámetros alcanzados por el hormigón en este ensayo no deben diferir más que 50 mm respecto al ensayo de escurrimiento del mismo hormigón.

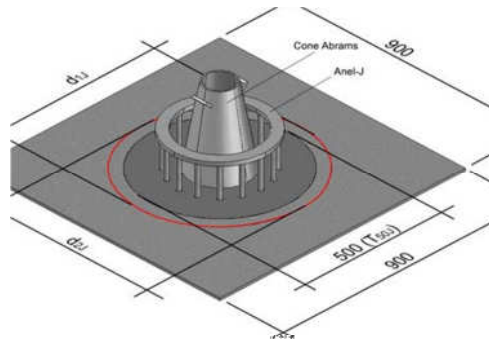


Figura 2.26. Ensayo de escurrimiento con anillo japonés

Aún no se ha desarrollado un único método de ensayo que pueda evaluar todas las propiedades relacionadas con la autocompactabilidad. Las combinaciones más frecuentes son el ensayo de escurrimiento y embudo en V o ensayo de escurrimiento y el anillo japonés (figura 2.27).

²⁷ El diámetro y el espacio entre barras varía en función del diámetro máximo del árido que se utilice o de la armadura que se desee simular. La UNE 83362 recomienda la utilización de 20 barras de 10 mm de diámetro sí el tamaño máximo del árido es menor o igual a 20 mm.

2.8.5. Otros ensayos

En la figura 2.27 se muestran algún otro ensayo utilizado para estudiar las propiedades de los HAC, como la caja en U, tubo en U, orimet y orimet con el anillo Japonés.

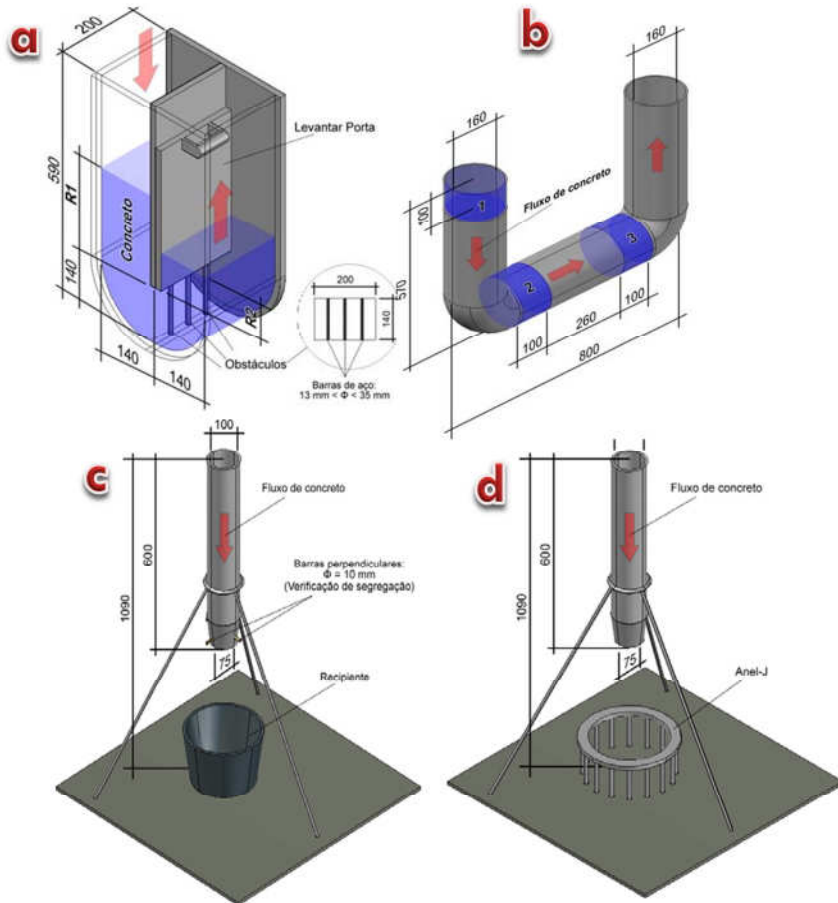


Figura 2.27. Ensayos del HAC en estado fresco, (a) caja en U, (b) tubo en U y (c) orimet, (d) orimet con anillo J. (Dimensiones en mm)

Como resumen, en la tabla 2.11, se muestran los ensayos a realizar según las características que se estudien, indicando sus rangos admisibles y su aplicación recomendada.

Tabla 2.11. Ensayos del HAC según característica a estudiar

Características	Método ensayo	Rango	Aplicación
Fluidez	Ensayo de escurrimiento	550 a 650mm 660 a 750mm 760 a 850mm	Losas Muros y columnas Muy armado o diseños complejos
Viscosidad	T ₅₀₀ Embudo en V T ₅₀₀ Embudo en V	≤ 2 s ≤ 8 s > 2 s 9 a 25 s	Muy armado o acabado de calidad Menor presión encofrado
Capacidad de paso	Caja en L	≥ 0.80 con 2 barras ≥ 0.80 con 3 barras	Viviendas Ingeniería civil
Segregación	Resistencia a segregación. Tamiz	≤ 20% ≤ 15%	Distancia <5 metros Distancia >5 metros Acabado de calidad

2.8.6. Reómetros

Los reómetros miden la resistencia a fluir de un hormigón al variar las fuerzas tangenciales aplicadas sobre él y en ensayos dinámicos. Existen números reómetros dependiendo de su finalidad y del fabricante. Los reómetros más comunes son los tipos BML, BTRHEOM IBB, Two-Point. Además existe una nueva generación de dispositivos digitales que en base a trabajos previos de calibración y junto a una base de datos son capaces de estimar la μ y τ con procedimientos automatizados del ensayo de escurrimiento. De los dispositivos digitales destacar el 4C-Rheometer, utilizado, entre otros organismo, por Sika, Aidico, Basf (Danish Technological Institute, 2010) y el DCA de la UPV (figura 2.28).

Los estudios reológicos de hormigones realizados con reómetros convencionales suelen ser poco precisos y de difícil interpretación entre diferentes investigaciones cuando se usan diferentes reómetros (Roncero et al., 2008, Loureda et al., 2012 y Banfill et. al 2001). Esto no suele ocurrir con los dispositivos digitales de nueva generación que utilizan modelos matemáticos que simula la evolución del ensayo de escurrimiento del HAC según estudios previos realizados, obteniendo resultados positivos en investigaciones recientes (Camacho et al., 2012 y Miñano et al., 2013).



Figura 2.28. Dispositivo 4C-Rheometer del DCA de la UPV

2.8.7. Ensayo de segregación

Son varios los ensayos propuestos por diferentes normativas e investigadores para detectar la segregación. Los más comunes y sencillos son los visuales, aunque no cuantifican la posible segregación. Los métodos que cuantifican la segregación suelen utilizar herramientas de procesamiento digital de imagen para agilizar los trabajos. A continuación se describe varios de los métodos más conocidos:

a) Índice de segregación y exudación visual, "VSI"

Según la ASTM C1611 M-05, en el ensayo de escurrimiento podemos clasificar los resultados por un índice visual de la segregación y exudación acontecidos. Existen 4 grupos de clasificación, identificados de 0 a 3 de la siguiente forma:

-VSI = 0 alta estabilidad; no hay indicios de exudación ni segregación (figura 2.29).



Figura 2.29. Izquierda y derecha HAC con VSI = 0 en el ensayo de escurrimiento

-VSI = 1 estable; no hay indicios de segregación, pero se puede observar una ligera exudación como un brillo en la masa del hormigón (figura 2.30.).



Figura 2.30. HAC con VSI = 1 en el ensayo de escurrimiento

-VSI = 2 inestable; se observa un pequeño halo de mortero (≤ 10 mm) o una concentración de áridos en el centro de la masa de hormigón. Ver dos ejemplos de HAC en figura 2.31, donde se aprecia el comentado halo y una concentración de áridos en el centro, marcado en



Figura 2.31. Izquierda y derecha HAC con VSI = 2 en el ensayo de escurrimiento, apreciando halo de exudación y acumulación de áridos en la parte central

-VSI = 3 alta inestabilidad; se observa una clara segregación con halo de mortero (> 10 mm) y/o una grande concentración de áridos en el centro de la masa de hormigón. Ver dos ejemplos en figura 2.32, a la izquierda se aprecia el comentado halo y una concentración de áridos en el centro. A la derecha, a diferencia del anterior, no se aprecia

acumulación de áridos en el centro, pero si una clara exudación.

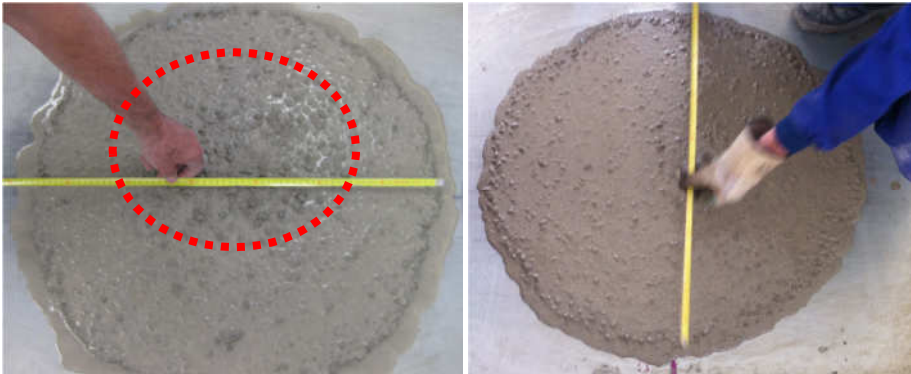


Figura 2.32. Izquierda y derecha HAC con VSI = 3

b) Índice estabilidad visual, “IEV”

El método visual IEV mantiene la clasificación ASTM C1611 M-05 descrita anteriormente pero añade valores intermedios entre 0 y 1 y entre 1 y 2. Además se incluye las burbujas de aire liberada como parámetro en la estabilidad de los HAC, ver tabla 2.12.





Tabla 2.12. Índice estabilidad visual “IEV” (Cuenca, 2008, según EHE-08)

IEV	
≤ 0	No hay segregación ni lechada bordeando el hormigón en el resultado final del ensayo de extensión de flujo
0,5	No hay mortero desprendido de la pasta, pero hay algo de segregación o burbujas de aire en la superficie
1	No hay segregación en la masa de hormigón, pero hay pequeño asentamiento o burbujas de aire
1,5	Empieza a aparecer una pequeña banda de mortero alrededor de la masa de hormigón
2	Dicha banda de mortero puede llegar a estar en el orden de 10 mm
3	Indica evidencia de segregación. La banda de mortero alrededor de la masa total puede superar los 10 mm

c) Índice de estabilidad visual “HVSÍ”

Este método, aplicado por la Universidad de Illinois, para hormigón endurecido, proporciona un índice de la resistencia estática a la segregación de los HAC. Se clasifican en 4 grupos, al igual que los descritos “VSI” y “IEV”. En este caso, las probetas se cortan longitudinalmente, se moja para aumentar el contraste de los áridos y se analiza utilizando los criterios de la tabla 2.13.

Tabla 2.13. HVSÍ de las muestras endurecidas (Fang y Labi, 2006)

0 (Estable)	1 (Estable)	2 (Inestable)	3 (Inestable)
			
<p>Ninguna capa de mortero en la parte superior del corte plano y sin variación en el tamaño y porcentaje de distribución de los áridos grueso de arriba a abajo.</p>	<p>Ninguna capa de mortero en la parte superior de la corte plano pero leve variación en el tamaño y porcentaje de distribución del árido grueso de arriba a abajo.</p>	<p>Leve capa de mortero de menos de 25 mm de altura, en la parte superior y diferente distribución en tamaño y porcentaje del árido grueso de arriba a abajo.</p>	<p>Claramente segregado con capa de mortero mayor de 25 mm o un considerable variación en tamaño y porcentaje de distribución del árido grueso de arriba a abajo.</p>

d) Sonda de segregación.

El método de la sonda de penetración (Shen et al. 2008) consiste en un anillo de diámetro 100 mm (variable dependiendo investigaciones) conectado con una varilla de 150 mm de alto y marcada con una escala (figura 2.33). La sonda está hecha de alambre de acero de diámetro de 1,6 mm y su peso total es de unos 18 g. Después de 2 minutos de reposo del HAC vertido la sonda se coloca en la superficie de hormigón durante 1 minuto y se mide lo que penetra²⁸ en él. Es un método rápido y eficaz para medir el espesor de capa de mortero en caso de segregación. Esta capa es menos estable y la sonda penetra todo su espesor. El grado de estabilidad se evalúa según tabla 2.14, utilizando la misma clasificación anterior de 0 a 3.

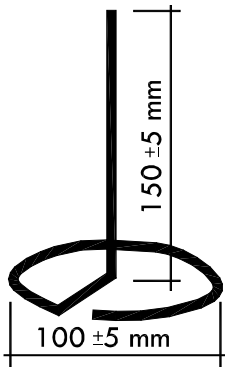


Tabla 2.14. Clasificación según penetración

Penetración (mm)	Clasificación (Igual HVSI)
<4	0 Estable
$4 \leq 7$	1 Estable
$7 \leq 25$	2 Inestable
>25	3 Inestable

Figura 2.33. Sonda de penetración
(Adaptado de Shen, et al 2008)

²⁸ La sonda experimenta dos fuerzas opuestas, fuerza de flotabilidad y atracción gravitacional. La sonda se detendrá cuando estas 2 fuerzas se igualen con la suma de la fricción del fluido y la fuerza de arrastre de éste.

e) Método de columna de segregación en estado fresco.

Este ensayo contemplado en la norma ASTM C1610 compara el peso del árido grueso lavados de la franja “superior” e “inferior”. El valor “S” es indicativo de la segregación y se calcula con la siguiente expresión:

$$S=2x \frac{(\text{Peso inferior}- \text{peso superior})}{(\text{Peso inferior}+ \text{peso superior})} \times 100$$

Se monta una torre con varios cilindros desmontables (figura 2.34) y antes del endurecimiento del hormigón se separan las secciones y se lavan con agua hasta quedar con los áridos gruesos, generalmente >8mm.

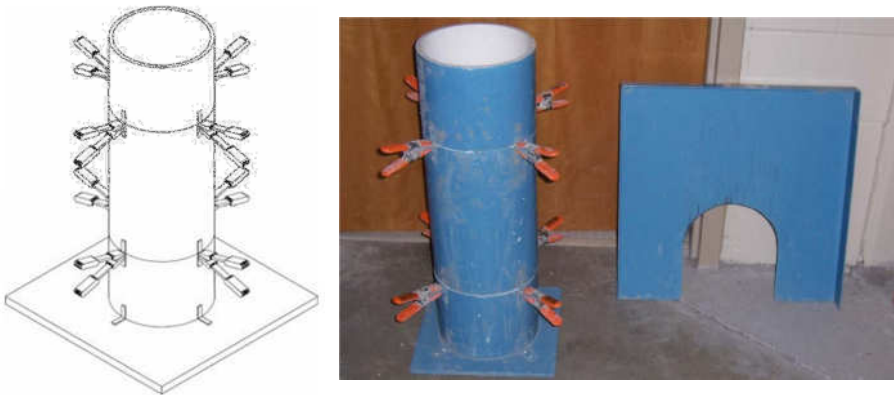


Figura 2.34. Columna para evaluar la segregación de un HAC

f) Ensayos de segregación GTM

Uno de los más utilizados es el GTM (Bartos, 2005). Se utiliza un recipiente de 200mm de diámetro y 500mm de altura, se llena con 10litros de hormigón y se sella. Trascurrido unos 15 minutos se comprueba la existencia de agua en la parte superior, síntoma de exudación. Se extraen y se pesan los 2 litros superiores de HAC. Estos se hacen pasar por un tamiz de 5 mm de luz de malla y 350 mm de diámetro y se pesan el HAC retenidos en dicho tamiz (figura 2.35).



Figura 2.35. Ensayo GTM (Bartos, 2005)

El cociente entre peso de la muestra que traspasa el tamiz y peso de la muestra vertida en el tamiz da un índice de segregación, “SR”. Los HAC se clasifican en los 3 siguientes grupos en función de SR²⁹:

SR1 para hormigones con resistencia a segregación <20%

SR2 para hormigones con resistencia a segregación <15%

SR2* para hormigones con resistencia a segregación <10%

Según los autores, para valores entre 5 y 15% la resistencia a la segregación es adecuada y la viscosidad del fluido impide que la parte

²⁹ Los HAC SR1 se aplican generalmente en losas delgadas o en aplicaciones verticales donde la distancia de flujo no alcanza los 5 m y el espacio de confinamiento es más elevado de 80 mm. Los HAC SR2 se utilizan preferencialmente en aplicaciones verticales, si la distancia de flujo supera los 5 m, con espacio de confinamiento superior a 80 mm evitando la segregación durante el flujo. Si la distancia de flujo es superior a los 5 m se requiere una mejor resistencia a segregación recomendando la clase SR2*.

liquida se separe de los árido grueso a pesar de la abertura de 5mm del tamiz. Valores inferiores no se recomienda por una alta viscosidad que repercutirán en un mal acabado superficial. Para valores superiores a 15% implica que en elemento de gran altura se pueda concentrar los áridos grueso en la parte inferior.

Bui et al. (2002), consideran satisfactorio la resistencia a la segregación de un HAC cuando la variación de árido grueso a lo largo de la altura, es inferior al 10% según la siguiente expresión:

$$R_v (\%) = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \right)^2}{n}}$$

siendo:

n → número de partes en que se subdivide la probeta de hormigón.

x_i → relación entre el peso de árido grueso de más de 8 mm y el peso de hormigón de cada parte.

\bar{x} → relación entre el peso total de árido grueso de más de 8 mm y el peso total de hormigón.

Se puede considerar que una mezcla es estable si la variación del contenido de árido grueso (de más de 8 mm) en la parte superior de la pieza respecto del contenido medio de árido en toda la pieza es inferior al 20% (Lowke et al., 2003; Valcuende et al., 2013) , obtenida mediante la siguiente expresión:

$$\Delta(\%) = \left(\frac{\text{Cantidad de árido superior}}{\text{Cantidad de árido medio}} - 1 \right) \times 100$$

2.9. CARACTERÍSTICAS Y ENSAYOS DEL HAC EN EL ESTADO ENDURECIDO

Las propiedades en estado endurecido de los HAC se presentan como primordiales para las estructuras (Domone, 2007). Un aspecto que justifica esta importancia se asocia con la composición de la mezcla de la HAC que es diferente del hormigón convencional (Klug et. al., 2003). Según Gomes et al. (2006) las mejoras de las propiedades en estado endurecido de los HAC, frente a los HT, son discutibles. A continuación se analizan diversas propiedades del HAC en estado endurecido.

2.9.1. Resistencia a compresión

La alta demanda de finos en el hormigón autocompactante y el uso de aditivos SP da lugar a relaciones de a/c bajas, propiciando altas resistencias a compresión, siendo ésta una de las propiedades mecánicas más importantes del HAC. Utilizando la misma relación a/c muchos investigadores indican que la resistencia a compresión de los HT son ligeramente menores (figura 2.36) que los HAC (Buron et al, 2006; Agranati, 2008; Vilanova, 2009 y Coppola et al, 2004).

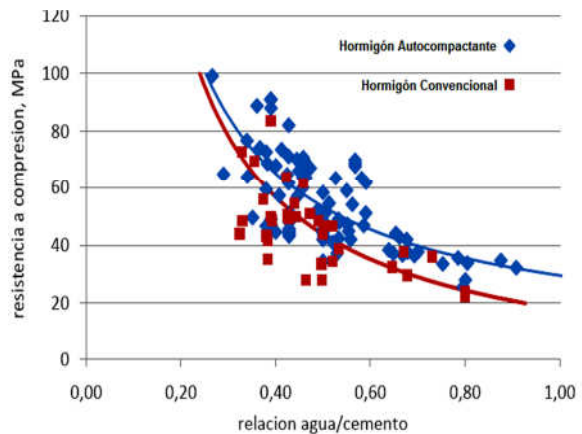


Figura 2.36. Relación entre la resistencia a compresión y la relación a/c en HAC y HT (Agranati, 2008)

Otros investigadores como Parra (2005), Leemann y Hoffman (2005), Marti et al., (2006) y Ambroise y Perea (2001) constatan resistencias similares para la misma relación a/c ³⁰. Además, éstos argumentan una mayor durabilidad de los HAC.

El mayor volumen de pasta en los HAC puede hacer variar la resistencia, disminuyendo éstas por la menor cantidad de árido grueso frente a los HT. La gran variabilidad de parámetros que afectan a la resistencia hacen complicado la generalización de conclusiones. Además, en los HAC, la ausencia de vibración mejora la adherencia entre el árido y la pasta, y el uso de aditivos permite una mayor dispersión de las partículas de cemento en la pasta, consiguiendo por ambos fenómenos mayor resistencia (EFNARC, 2005). Esto, junto a la baja relación agua/finos y el uso de adiciones activas influyen en la mejora de la resistencia mecánica de los HAC (Skarendahl y Petersson, 2000; Klug et al., 2003; Georgiadis et al., 2007; Bermejo et al, 2008).

Por lo general, la porosidad y la microfisuración de la zona de la interfaz es menor en el HAC, independientemente de las adiciones utilizadas, obteniendo una microestructuras más densa (Coppola et al, 2004; Skarendahl y Petersson, 2000).

Los finos, presentes en mayor cantidad en los HAC, aceleran las reacciones de hidratación a edades tempranas, actuando como puntos de nucleación en la hidratación del cemento. La relación arena/áridos afecta a la resistencia a compresión (Parra, 2005). Los HAC con mayor cantidad

³⁰La relación a/c define la porosidad de la matriz del hormigón. Cuanta más agua esté presente en la mezcla más partículas de cemento se alejan y, consecuentemente, después de la hidratación del cemento mayor serán los vacíos existentes. Para la EHE- 2008, los HAC, frente a los HT con una mismas relación agua/cemento y los mismos componentes, ven mejorada ligeramente la resistencia a compresión.

de arena y menor árido grueso para conseguir la autocompactabilidad propician una disminución de la resistencia a compresión, obteniendo las mayores resistencias para relaciones fino/árido total del orden de 0,40 (Vilanova et al. 2011).

Al igual que en los HT, en los HAC el tipo de cemento (Mata, 2004), el uso de aditivos, la cantidad de aire ocluido en la mezcla y las condiciones de curado³¹ (Mehta y Monteiro, 2008) son determinantes en las resistencias a compresión.

La evolución de la resistencia a compresión es similar en los HT y en los HAC (Arganati, 2008), aunque la presencia de adiciones activas o finos afecta a esta evolución (Parra, 2005). Así, por ejemplo, se pueden registrar diferencias en torno al 10% debido a la utilización de fino calizo como adición en los HAC (Parra, 2008).

El uso de adiciones activas afecta a la resistencia al influir en la fase hidratada del cemento. Se obtienen mayores resistencias a edades tempranas con la escoria de alto horno frente a las cenizas volantes para una misma relación agua/cemento (Borsoi et al. 2007).

Ambos efectos, tanto actuando como puntos de nucleación como participar en la hidratación del cemento, pueden acelerar la evolución de la resistencia a compresión a temprana edad en HAC (Persson, 2005; Druta, 2003). En HAC con sustitución de parte del cemento Portland por adiciones puzolánicas ven retrasado el desarrollo de la resistencia de

³¹El curado es el proceso de mantener un contenido de humedad satisfactorio y una temperatura favorable en el hormigón durante la hidratación de los materiales cementantes de manera que se desarrollen las propiedades deseadas (ACI 308R).

los hormigones con respecto a los que no se utilizan sustituciones (Song, 2001).

El tipo y cantidad de aditivo también afecta a la resistencia a compresión y a su evolución. Superplastificantes de tipo policarboxilatos aceleran la hidratación del cemento, mejorando la resistencia a compresión sobre las obtenidas con otro tipo de aditivos en los HAC (ACI, 2007). Khatib (2008) obtuvo que la cantidad óptima de superplastificante fue del 0,7% del peso del cemento. Con mayores cantidades se generó mayor cantidad de poros y con menores se produce segregación, con la consecuente disminución de resistencia a compresión en ambos casos.

2.9.2. Resistencia a tracción

La resistencia a tracción está muy relacionada con la fisuración del hormigón y es indicativa de la adherencia entre éste y las armaduras. Es proporcional a las tensiones a compresión soportadas y con ella se puede estimar la carga a la que se inicia la formación de fisuras en el hormigón.

La forma, naturaleza y tamaño máximo de los áridos, así como el contenido de cemento y la edad del hormigón son parámetros influyentes en la resistencia a tracción, y más en detalle las características de la microestructura de la matriz de cemento y de la zona de interfase entre el árido y la pasta (Holschemacher, 2004).

En los HAC se utilizan, por lo general, áridos de menor diámetro y mayores cantidades de material cementante. Estos factores, sumados a la

mayor homogeneidad, la mayor densidad de la microestructura y la menor porosidad en la zona de interfase entre el árido y la pasta de cemento los hacen más susceptibles de obtener mayores resistencias a tracción que los HT. En este sentido, 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 los HT (Köning et al. 2001; Fava et al. 2003; Klug y Holschmacher 2003; Coppola et al. 2004). Ahora bien, en casi todas las investigaciones se han utilizado HAC que incorporan, a diferencia de los HT 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 HT. Köning et al. (2001), Hauke (2001) y Dinakar (2007) registran un incremento de resistencia en SCC fabricados con cenizas volantes del 13,5 %, 9,1 % y 11%, respectivamente y Fava et al. (2003) en HAC con escoria granulada de alto horno obtiene un incremento del 10,5%. Similares mejoras en el HAC obtuvieron Holschmacher (2004) y Sagoe et al. (2001) con el uso de adiciones minerales y SP. No obstante, Parra et al. (2007) y Valcuende et al. (2011) estudiaron HAC con filler calizo, obteniendo menores resistencias a tracción indirecta (18%) que con los HT de equivalente resistencias a compresión. En el mismo sentido, Fava et al. (2003), Daoud et al. (2003) y Valcuende et al. (2011b) obtiene descensos en las resistencias a tracción de los HAC de un 11,15%, 7,9 % y 15,5% respectivamente.

Por otro lado, el contenido de finos repercute en la retracción de los hormigones, cuanto mayor es éste mayor es la retracción (Hammer et al., 2001; Song et al., 2001; Turcry y Loukili, 2003; Chopin et al., 2003; Valcuende et al., 2013), dando lugar a la aparición de un mayor número

de microfisuras en la interfaz árido-pasta que reducen también la resistencia a tracción.

Otra diferencia significativa entre los HAC y los HT es la utilización de superplastificantes de tipo policarboxilato. Estos contribuyen a la formación de grandes cristales de CH y de etringita (Roncero y Gettu, 2002) que debilitan la zona de transición árido-pasta y, en consecuencia, merman la resistencia a tracción del hormigón al disminuir la adherencia árido-pasta (Valcuende et al., 2011b).

2.9.3. Módulo de deformación

El módulo de deformación está ligado con la capacidad del hormigón de deformarse en estado elástico (Myers y Yang, 2003). Es una de las propiedades mecánicas más importantes del hormigón junto a la resistencia a compresión y a tracción. Está relacionado con la resistencia a compresión.

Las propiedades mecánicas de los hormigones, como material compuesto y heterogéneo, dependen de la matriz de pasta de cemento, del árido y de la zona de transición. Los áridos gruesos suelen tener un módulo de elasticidad entre 70 y 140 GPa, entre 7 y 28 GPa para la pasta de cemento y entre 14 y 42 GPa para los hormigones (Mindess, 1985 citado por Agranati, 2008). Las características de los áridos más determinantes en el módulo de deformación del hormigón son la porosidad, la composición, la densidad, el tamaño máximo, la forma y la granulometría. La zona de transición entre la pasta y el árido también es determinante por ser una zona de gran debilidad mecánica, donde se

acumula gran cantidad de poros capilares y donde comienza la formación de las fisuras.

El mayor volumen de pasta, junto con el menor contenido de árido grueso en los HAC propician disminuciones en los valores del módulo de deformación frente a los HT, dado que la rigidez de los hormigones la aumentan la cantidad de los áridos y la disminuyen la pasta. En la figura 2.38 se muestra que a menor cantidad de áridos, menor es la pendiente de la recta que define a los diferentes materiales mostrados y, por tanto, menor es su rigidez.

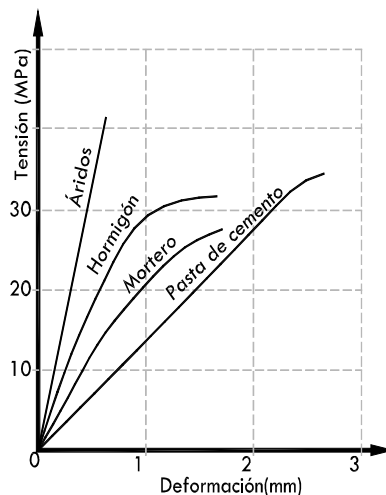


Figura 2.38. Relación tensión-deformación de la pasta de cemento, mortero, árido y hormigón (Adaptado de Neville, 1995)

Las adiciones de la pasta aumentan su módulo de deformación por aumentar su resistencia, pero con el aumento de la pasta se disminuye la rigidez por la disminución de la cantidad de árido.

Los resultados obtenidos al comparar el módulo de deformación de los HAC y HT son dispares entre los diferentes autores consultados. Algunos indican que a pesar de conseguir resistencias a compresión en el HAC mayores que en el HT, se obtiene módulos de deformación ligeramente menores (5%) en los HAC, con respecto al HT para iguales resistencias a compresión y mismo tipo de árido (Mata, 2004; Persson, 2001; Holschemacher y Klug, 2002, Domone, 2007 y Assie et al. 2006), llegando a un 15% menor en las investigaciones de Leeman y Hoffmann, (2005). Dackzo et al. (2002) afirman que el módulo de

deformación del HAC está en el mismo orden que el del hormigón convencional a iguales relaciones agua/finos. Algunos autores también obtienen los mismos resultados cuando se comparan HAC con HT de iguales resistencias a compresión (Horst y Dusseldorf, 1999; Tviksta, 2000; Persson, 2001; Gomes, 2002 y Poon y Ho, 2004). Hameed (2005) indicó que HAC y HT producidos con los mismos áridos presentan iguales módulos de deformación por el empaquetamiento que estos generan a pesar de existir un mayor volumen de pasta en el HAC.

Valcuende et al. (2011b) obtienen que el módulo de deformación del hormigón tiende a ser del orden de un 2% menor en los HAC, como consecuencia de la mayor cantidad de pasta que hay en estos hormigones, frente a los HT. A pesar de ello, observan que el módulo de elasticidad de la pasta cementante es mayor en los HAC debido a que la adición de finos calizos genera una menor porosidad y una microestructura más fina.

La zona de transición árido-pasta, por lo general, es más densa y más rígida en los HAC³² y dado que el módulo de elasticidad de la pasta son mayores en los HAC, la menor rigidez de los HAC puede explicarse por el mayor contenido de pasta que hay en este tipo de hormigones, pues al ser la deformabilidad de la pasta muy superior a la de los áridos, un mayor contenido de ésta se traduce en una menor rigidez del hormigón (Valcuende et al., 2011b).

Los hormigones con áridos reciclados registran, por lo general, una bajada de la rigidez con el aumento de la cantidad de árido reciclado utilizado (Orna y Salesa, 2012).

³² Esto fue comprobado por Zhu y Bartos, (2005) con ensayos de nano-indentación.

Capítulo 3. Sostenibilidad de los hormigones. La escoria granulada de alto horno

3.1. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción, como gran consumidor de energía y emisor de CO₂, se enfrenta a un reto de sostenibilidad global. La construcción consume grandes cantidades de recursos naturales, debiéndose concienciar con el cambio climático mediante la fabricación de materiales sostenibles más duraderos y respetuosos con el medio ambiente. La necesidad de orientar la economía hacia un desarrollo sostenible implica valorar los recursos naturales, usándolos sin exceder su capacidad de regeneración, por lo que cada vez es más necesario incrementar el reciclaje de los materiales.

La EHE-08 incluye un índice de sostenibilidad de las estructuras de hormigón armado, cuantificando la contribución de las estructuras a la sostenibilidad. Para ello, es de gran importancia el estudio del ciclo de vida completo de los edificios y el uso de residuos como los áridos reciclados, por lo que investigaciones al respecto son de gran importancia para un desarrollo más sostenible y en línea con lo indicado por la EHE-08 (Liébana et al., 2011).

A nivel mundial se emplean aproximadamente 10 billones de toneladas de arena y roca natural, a la vez que se genera más de 1 billón de toneladas de residuos de construcción y demolición cada año (Mehta, 2002). Este sector se ve obligado, por motivos de sostenibilidad,

a la utilización de áridos reciclados procedentes de la construcción o residuos metalúrgicos, como escorias de alto horno, de acería, de cobre, etc., como adiciones o áridos en la fabricación de hormigones que minimicen los efectos medioambientales del sector (Mehta y Monteiro, 2008).

En España, como en muchos otros países, en los últimos años el sector de la construcción ha sufrido una verdadera crisis. Así, el consumo de cemento en enero de 2013 fue de 892.783 toneladas, 245.000 toneladas menos que el año anterior, y un 80% menos de lo que se consumió en enero de 2007 (Oficemen, 2013). Esta reducción en la producción de cementos hace bajar la demanda de las materias que lo componen, por ejemplo la escoria granulada de alto horno. Su menor utilización como adición hace necesaria la búsqueda de nuevos usos que permitan su uso a un bajo coste y que evite su acumulación en vertedero. Se están estudiando usos alternativos como áridos en firmes de carreteras, áridos en hormigones, etc. (Numata et al., 1986; Scandiuzzi y Battagin, 1990; Antonina, 2002; Kosmatka et al., 2004; Yüksel et al., 2007; Berridi, 2008; Lauber, 2009). Si además, con estos usos, se consiguen mejoras técnicas, el beneficio es doble, pudiendo conseguir un triple beneficio si con las mejoras, tanto mecánicas como de durabilidad, se consigue alargar la vida útil del edificio. El aumento de la vida útil de las edificaciones reduce la huella de carbono¹ que estos producen.

La industria del cemento genera aproximadamente el 5% de las emisiones de CO₂ en el mundo. Estimaciones sobre el uso del hormigón, llegan a cuantificarlo hasta en 30 millones de toneladas por año,

¹La huella de carbono es la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto de un producto, industria, etc. Se mide en masa de CO₂ equivalente.

considerándolo como la mayor producción de productos manufacturados (Gettu et al., 2012).

Parte de la escoria granulada de altos hornos (EGAH) es usada desde hace años como adición en el cemento, sustituyendo parte del mismo. Sustituir parte de éste, por subproductos como ceniza volante, escoria de alto horno y humo de sílice contribuyen a mejorar las propiedades en estado fresco y endurecido de los hormigones, principalmente en lo que se refiere a su durabilidad en ambientes agresivos (Mendez, 2008).

3.1.1. Residuos, reciclaje y valorización en los hormigones

El desarrollo sostenible debe de permitir satisfacer las necesidades básicas de la sociedad en la que vivimos, sin comprometer las aspiraciones de generaciones futuras. Valorización, tratamiento y reciclaje son esenciales para ello.

Se debe, por tanto, mejorar la sostenibilidad de los procesos constructivos. Para ello, numerosos estudios utilizan otros materiales cementíceos en sustitución del cemento portland, en distintas proporciones y de distintos orígenes (Payá et al., 2003; Escalante, et al., 2001; Escalante, 2002; Ehrenberg y Geisel, 2000; etc.). Otros varían los procedimientos de fabricación del hormigón para hacerlos más sostenibles (Latorre, 2009).

La industria de la construcción, y sobre todo la cementera, consumen grandes cantidades de recursos no renovables, además de la contaminación que generan. Por cada tonelada de clínker producido se

genera más de una tonelada de CO₂ (Escalante, 2002 y Gettu et al., 2012).

Ehrenberg y Geisel (2000) estudiaron la influencia que sobre el impacto ambiental tiene la utilización de EGAH para la fabricación de cemento. Las escorias contribuyen, tanto a un ahorro económico a través del ahorro de energía, como a una reducción de las emisiones de CO₂ (figura 3.1).

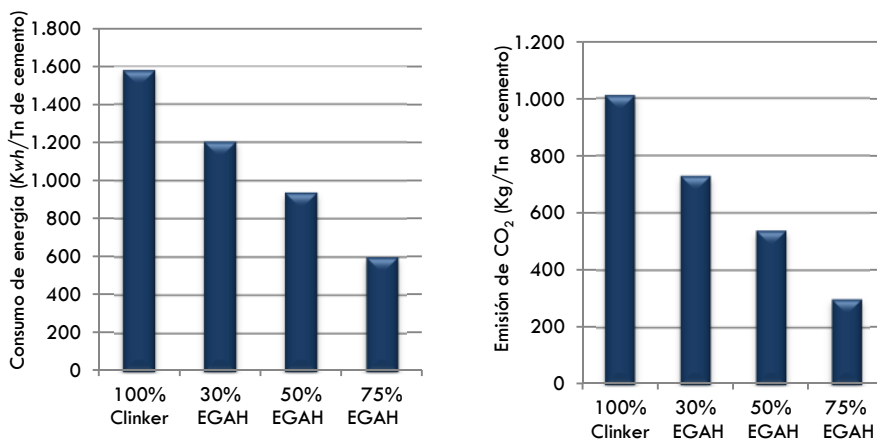


Figura 3.1. Izquierda, energía demandada por tonelada de cemento producido (Kwh) con diferentes cantidades de EGAH. A la derecha, las emisión de CO₂ por tonelada de cemento producido (Adaptado de Ehrenberg y Geiseler, 2000)

La producción industrial de hierro, acero, fundición de minerales naturales e incluso chatarras ha continuado creciendo en los últimos años, aunque en menor medida, generando un crecimiento de los residuos siderúrgicos acumulados debido a una bajada de la demanda para su uso como sustitutivo del clínker. Ésta sustitución puede llegar a ser hasta de un 90% (Escalante, 2002). A estos cementos, además de la disminución significativa en los costes de elaboración del cemento y de las indudables mejoras medioambientales hay que sumarle las mejoras técnicas que se consiguen en los morteros y hormigones. Así, por ejemplo, se alcanza una

mayor durabilidad frente a ambientes químicamente agresivos, debido a la disminución de la porosidad por un refinamiento de los poros.

En una estructura de 3.100 m³ de hormigón, con sustitución del 75% de clínker y del 75% de árido de cantera por EGAH (molida y en estado natural respectivamente), se puede evitar la emisión de 672.706 kg de CO₂. Cantidad nada despreciable teniendo en cuenta que, como media, un árbol absorbe 6 kg de CO₂ en un año (Miñano et al., 2012b).

3.1.2. Hormigones sostenibles

Durante los últimos años se está implantando una mayor concienciación medioambiental, lo que facilita el desarrollo y empleo de hormigones especiales con materiales de desecho o reciclaje. Uno de los hormigones más interesantes es el HAC ecológico (Eco-HAC), con bajos contenidos de clínker, altos contenidos de adiciones de desechos industriales y parte de los áridos reciclados (Miñano et al., 2012). A este respecto, Gettu et al. (2012) indican que hormigones con menos clínker y más material de desecho (con propiedades puzolánicas) aumenta la vida útil del edificio, al mejorar la durabilidad de los hormigones.

La EHE-08 permite la sustitución de árido grueso natural por árido reciclado en un 20%. Sustituciones del árido fino deben estudiarse con detalle, abriendo nuevas expectativas de fabricación de hormigones mucho más sostenibles.

La valorización y/o reciclaje de la EGAH, como árido en los HAC, permite disminuir el consumo de combustibles fósiles en la extracción del árido natural, disminuyendo, además, la necesidad de vertederos para depósito del residuo industrial (Miñano et al., 2012d). Se hace

imprescindible estudiar el comportamiento de la EGHA, en estado natural y sin moler como sustitución del árido de cantera en el hormigón.

Con el propósito de lograr vincular la tecnología del hormigón con el desarrollo sostenible, el American Concrete Institute (ACI) creó en el año 2000 un grupo de trabajo cuyo objetivo era fomentar el desarrollo y la aplicación de materiales sostenibles de manera que resulten ambientalmente aceptables (Malhotra, 2002).

A continuación se profundiza en cómo afecta diferentes compuestos del HAC en la sostenibilidad de los mismos:

a) Clinker

Cada tonelada de clinker producido genera más de una tonelada de CO₂ (Escalante, 2002) por lo que remplazos generalizados de pequeñas cantidades de clinker suponen una reducción importante de emisiones de CO₂ (Portillo et al., 2012).

Numerosos trabajos han demostrado que sustituciones de clinker por adiciones, por lo general, producen mejoras en la durabilidad de los hormigones fabricados. Un refinamiento de la red capilar, una menor permeabilidad y una disminución de los hidróxido cálcicos son efectos generados por las adiciones puzolánicas de los cementos, lo que repercute en una mayor durabilidad de las estructuras (Rodríguez y González, 2008a; Miñano y Benito, 2012; Parra et al., 2008).

Barluenga et al. (2012) obtuvieron mejoras más acentuadas en reducción del tamaño medio de poro y en la porosidad total en las muestras selladas o protegidas de la evaporación, donde todos los poros están colmatados de agua y los productos de la reacción pueden cristalizar dentro.

b) Materiales cementantes sustitutorios

Numerosas son las investigaciones sobre las variadas adiciones cementantes y puzolánicas existentes, y su utilización tanto en el cemento como directamente en los hormigones. Generalmente el tamaño de las partículas de las adiciones determinan la mayor o menor participación en la fase hidratada del cemento. En la hidratación de los compuestos cementantes se mejora, por lo general, la interfaz árido-pasta debido a que los silicatos de calcio hidratado generados a edades posteriores a la del cemento portland rellenan parte de los poros que se generan junto a la interfaz en la hidratación del cemento portland (Miñano et al., 2012b). A continuación se describen algunas de ellas:

b1) La EGHA en contacto con agua forma una capa de gel impermeable, la cual acaba reaccionando con la cal liberada (u otro activador químico) en la hidratación del C_3S y C_2S para formar CSH de mayor resistencia que la portlandita consumida (Aïtcin, 2008). La incorporación de la EGHA en el cemento u hormigón beneficia, por lo general, la zona de transición pasta-árido y proporciona un aumento de la resistencia a compresión (Aris et al., 2008 y Miñano et al., 2012b). Además, la mayor capacidad del HAC para retener agua facilita a las adiciones puzolánicas que prolonguen su actividad, permitiendo seguir adquiriendo resistencia a mayores edades en los HAC, frente a los HT (Parra et al., 2008).

En la hidratación de la EGHA y formación de nuevos silicatos cálcicos hidratados se consume $Ca(OH)_2$, disminuyendo la alcalinidad de la pasta de cemento y, por tanto, baja la capacidad de fijar CO_2 por el hormigón (menos carbonatación al contar con menos portlandita para formar carbonato cálcico). Este efecto de menor carbonatación se ve potenciado con una matriz más densa e impermeable, por el refinado de

los poros al utilizar las EGAH en los HAC (Miñano et al., 2012b). Altos descensos de alcalinidad debe ser analizadas para evitar la despasivación de las armaduras metálicas en las estructuras.

b2) Los carbonatos cálcicos micronizados fueron estudiados en polvo y en slurry (partículas en agua), en los HAC, por Barragán et al. (2008). Se obtuvo mejoras en la fluidez, en los acabados y en la resistencia. Se obtuvieron mayor resistencia en los HAC con menor tamaño de partícula, acelerándose la hidratación de las adiciones por su mayor superficie específica de contacto, con un mayor relleno de microporos y, por tanto, una mayor compacidad.

b3) El metacaolín adicionado en bajas proporciones permite obtener mezclas cohesivas sin segregación, pudiendo aumentar en gran medida la viscosidad de los HAC. Son una alternativa válida a los filleres habitualmente utilizados (Rodríguez y González, 2008a).

b4) Las cenizas volantes, como sustitución de parte del cemento portland, permiten obtener mejoras en la microestructura por un refinamiento de los poros y un aumento de la compacidad. Además, por su forma esférica, mejora el comportamiento en estado fresco de los HAC.

c) Áridos

Sustituciones del árido natural por materiales reciclados o residuos permiten reducir la emisión de CO_2e^2 (huella de carbono) en la fabricación de los hormigones. Además, si se consigue alargar la vida útil de las estructuras, sobre todo por una mayor durabilidad de éstas, se obtienen mejoras ambientales significativas (limitación de demanda energética del Código Técnico de la Edificación (HE1), 2009 y Guía

² El nivel CO_2 equivalente, es la cantidad de CO_2 resultante de incluir los efectos de otros gases minoritarios como CH_4 y N_2O de una manera sencilla.

técnica IECA, 2012). Este uso de materiales reciclados o residuos, como árido en los hormigones, permite reducir la acumulación de los mismos en vertederos (Miñano et al., 2012b).

d) Finos

Los finos adicionados en la composición del hormigón aumentan su sostenibilidad, mejorando, por lo general, la durabilidad de los mismos, generalmente gracias a una microestructura más densa y una menor permeabilidad (García et al., 2012). Las adiciones inertes a utilizar, para una mayor sostenibilidad, deben adaptarse a su disponibilidad en cada zona de fabricación y siempre en cumplimiento de lo establecido en la norma UNE-EN 12620 para fillers. La cantidad a utilizar es variable, dependiendo del tipo de filler y de las características de los HAC a fabricar (Girbés et al., 2008; Viacava et al., 2012). Cada tipo de filler adicionado hace variar, de forma diferente, la demanda de aditivo a utilizar, así como la compacidad del hormigón (Gonnon et al., 2012).

El filler calizo, por su relación coste/efectividad, es adecuado para la fabricación industrial de los hormigones autocompactantes. Otros como los residuos o lodos de la industria del mármol se están estudiando para su uso en HAC, con resultados mecánicos similares al filler calizo (Valdez, et al., 2011).

e) Superplastificantes

Los superplastificantes mejoran la sostenibilidad de los HAC con la reducción de la relación a/c , con la consecuente disminución de la porosidad y aumento de la durabilidad y de la vida útil de la estructura. Además permite el uso de materiales de desecho como cenizas volantes, polvo de cantera, EGAH, etc. (Gettu et al., 2012).

3.2. LAS ESCORIAS Y SU CLASIFICACIÓN.

Durante el proceso de fusión de los metales una cierta cantidad de material no metálico se acumula en la parte superior de la colada, y ésta es conocida con el nombre de escoria. Las cenizas del coque, los productos de oxidación, los materiales refractarios consumidos y otros contribuyen a la formación de escoria (Siegel, 1982). La escoria se obtiene en la fabricación de hierro, acero, níquel, manganeso, cromo, cobre, etc, variando sus propiedades físicas y químicas en función del mineral empleado. Amaral de Lima (1999) define la escoria siderúrgica como el material fundido obtenido tras las reacciones químicas entre la materia prima, los materiales añadidos al horno y las impurezas oxidadas durante el refinado del metal. Las más utilizadas en el campo de la construcción son las obtenidas en la fabricación del hierro, siendo éstas las utilizadas en este trabajo.

En términos de porcentaje, la proporción de escoria generada respecto de la materia prima utilizada es muy variable, entre un 4,5% y un 24%, dependiente del tipo de horno de fusión utilizado y de la calidad de la materia prima (CNPL, 2006).

En general, el uso principal de las escorias depende de su composición y sobre de su fase vítrea que es donde reside el componente hidráulicamente activo, pudiendo considerarse la fase cristalina prácticamente como un inerte. La opinión generalizada es que cuanto más desordenada es la estructura del vidrio mayor es su reactividad (Puertas, 1993). Por tanto, dependiendo de la capacidad hidráulica de la escoria se puede destinar a la industria cementera, en mezclas bituminosas, a la agricultura, etc. (Miñano et al., 2012). A continuación se detalla la clasificación de las escorias en función de su enfriamiento (determinante en la formación de la fase vítrea), tras salir del horno.

3.2.1. Clasificación de las escorias según enfriamiento

Escorias con una misma composición química pueden presentar diferente actividad hidráulica dependiendo del proceso de enfriamiento utilizado que determinará el contenido de fase vítrea.

Como resultado del enfriamiento se pueden encontrar dos tipos de partículas de escoria³ (figura 3.2): partículas vítreas reactivas con enfriamiento rápido, conocidas como “escorias granuladas”, y “escorias cristalizadas” no reactivas de enfriamiento lento (Battagin y Esper, 1988; Elias, 2000). La cantidad de fase vítrea en la escoria depende de los procesos térmicos experimentados por la misma (Puertas, 2004).



Figura 3.2. Escoria granulada arriba, cristalizada abajo (www.cedexmateriales.vsf.es)

Berridi (2008) describe que si el enfriamiento es lento se obtiene una mezcla sólida y estable compuesta de silicoaluminatos cálcicos y magnésicos, y si es rápido es mayoritariamente vítrea, siendo las principales fases cristalinas la gehlanita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), la aquermanita ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) y el silicato bicálcico (Ca_2SiO_4).

³ Algunos autores (Battagin y Esper, 1988), definen un tercer tipo de partícula de escoria con partícula vítrea que contienen cristales de varias formas, mas reactivas que las vítreas puras, que denominan “escorias dilatada”.

Si el enfriamiento es lento (Elias, 2000) (escoria cristalizada) se obtienen productos con estructura esencialmente cristalina (ver figura 3.3), formados por silicatos (Ca-Mg-Al) que no tienen propiedades hidráulicas. Pueden ser molidas para obtener granos con dureza muy elevada y resistente, lo que permite su uso como árido de primera calidad. Las propiedades del árido van a depender de la composición y de la velocidad de enfriamiento.

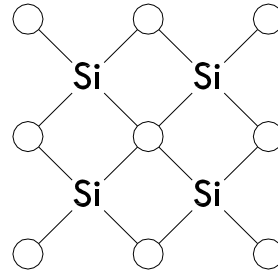


Figura 3.3. Representación esquemática de las escorias con estructura cristalina (Adaptado de Magalhães, 2002)

Aitcin (2008) indica que las escorias enfriadas lentamente pueden utilizarse como árido en hormigón y asfalto, pero no tiene prácticamente ningún valor hidráulico, y no pueden ser utilizadas como material complementario de cemento. A este respecto Mehta y Monteiro (2008) comparten lo indicado anteriormente, atribuyéndole al enfriamiento lento de la escoria de alto horno unas bajas propiedades cementicias, pero siendo adecuadas para ser fragmentadas y clasificadas para obtener partículas densas y resistentes para su uso como áridos en el hormigón. En el caso de las escorias ácidas⁴ generalmente producen un árido más denso que las escorias básicas que producen una estructura vesicular o celular con masa específica aparente menor (2000-2800kg/m³) (Edgar, 2001).

Por lo que respecta al uso de escoria siderúrgica, como árido para la fabricación de hormigones, la Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-08) permite la utilización de las escorias siderúrgicas enfriadas por aire según UNE-EN 12620, siempre y cuando se

⁴ Las escorias de alto horno ácidas son aquellas cuya relación CaO/SiO₂ es inferior a 1, y se obtienen en procesos siderúrgicos de minerales pobres en Fe. Las escorias básicas están constituidas principalmente de melilita y merwinita mientras que las ácidas están formadas de melilita y diópsido (Puertas, 1993).

compruebe previamente que son estables, es decir, que no contienen silicatos inestables ni compuestos ferrosos.

Si el enfriamiento es rápido (escoria granulada) con agua (ver figura 3.4) o con combinación de agua-aire, su composición química es idéntica a la de la escoria cristalizada, si bien, los iones no tienen tiempo de ordenarse según una red cristalina y solidifican en estado vítreo y amorfo de granulometría más gruesa, con cierto contenido de humedad (Puertas, 1993 y Valcuende et al., 2014). Poseen una actividad hidráulica latente o potencial y en función de su tamaño de grano y de su superficie específica contarán con mayores o menores propiedades cementicias⁵, que amasadas con agua y un agente activador⁶ son capaces de fraguar y endurecerse (Mehta y Monteiro, 2008). La granulometría de las partículas, en su mayor parte y para su uso como material cementante, deben de ser menores de 45 μm , o que corresponden aproximadamente a 500 m^2/kg de área específica de Blaine (Mehta y Monteiro, 2008).



Figura 3.4. Enfriado rápido de la EGAH (Magalhães, 2002)

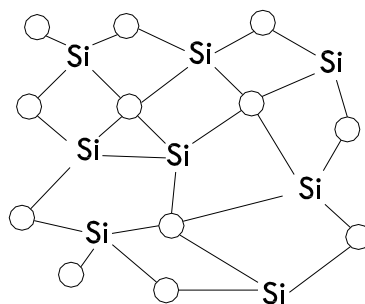


Figura 3.5. Representación esquemática de las escorias con estructura vítreo (Magalhães, 2002)

⁵ La reacción cementicia de estos materiales se debe a la sílice reactiva que reacciona con el hidróxido de calcio (portlandita) producida por la hidratación del cemento, formando hidratos de silicato de calcio (tobermorita) adicionales. Ésta reduce la porosidad de la pasta y aumenta la resistencia del hormigón (Mehta, 1993). Para conseguir propiedades cementicias en las escorias se requiere un activador álcali para iniciar la reacción química con la portlandita (Agranati, 2008).

⁶ Un agente activador puede ser el propio cemento Pórtland por su alcalinidad, el yeso, el silicato de sodio u otros álcalis que permita continuar la reacción de hidratación de la EGAH (González, 2011).

La hidratación de la escoria granulada de alto horno (vítrea y amorfa), sin la presencia de un agente activador, es muy lenta⁷ o prácticamente nula. Los productos de hidratación se pueden generar después de muchos meses. La EGAH después de estar algunos minutos en contacto con el agua forma una capa impermeable de aluminosilicato sobre la superficie de los granos de escoria que inhibe la reacción de hidratación. Esto sucede a menos que un activador químico como el cemento Pórtland o la cal se encuentre presentes para deshacer esta capa y continuar la reacción de hidratación. Dada la importancia de la escoria granulada de alto horno (EGAH) en esta investigación, a continuación se profundiza en ella.

3.3. ESCORIA GRANULADA DE ALTO HORNO

La escoria granulada de alto horno⁸ es un subproducto derivado de la producción de hierro. Se origina como resultado de la fusión y la combinación, a temperatura del orden de 1600°C, de los constituyentes arcillosos del mineral de hierro, las cenizas de azufre del coque y la cal, y la magnesia procedente de las rocas carbonatadas usadas como fundentes en el proceso siderúrgico. Tras el posterior enfriamiento se obtiene la escoria (Rodríguez et al., 1996).

⁷ Escalante et al. 2003, estudiaron los productos de hidratación y la reactividad de la escoria de alto horno activada por varios álcalis. Utilizó como activadores Na_2SiO_3 , NaOH, y mezclas de carbonato, sulfato e hidróxido. Sus estudios comprobaron que el mayor productor de hidratación encontrado con todos los agentes activantes fue el gel CSH. Para los tres activadores alcalinos, los estudios de rayos X identificaron la presencia de hidrotalcita $[\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}(\text{CO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$, y también concluyó que la escoria que reacciona con más intensidad es la que se activó con NaOH.

⁸ El alto horno es una gran cuba en el que se introduce un gas reductor a presión (generalmente CO) por la parte inferior, y una carga de materia constituida por minerales de hierro, coque y fundentes por la parte superior, separándose dos productos: el hierro y las impurezas con los fundentes (escoria primaria), que van evolucionando en su composición hasta llegar a la parte baja del horno (crisol), formándose los dos productos finales: arrabio y escoria. Estos productos fluyen juntos en estado líquido, a través de un orificio situado en la parte baja del crisol denominado piqueta, a una especie de balsa, produciéndose la separación definitiva del arrabio y la escoria por diferencia de densidad. Catálogo de residuos utilizables en construcción, <http://www.cedexmateriales.vsf.es>

La cantidad de escoria producida por el acero equivale a unos 300-330Kg de escoria, por cada tonelada de acero producido (Silva, 1998; Neville, 2010).

En España, el volumen total de escorias de alto horno generadas durante el año 2005 se estimó en 1.283.000 t, de las cuales 614.000 t fueron granuladas y 669.000 t cristalizadas (catálogo de residuos utilizables en construcción, <http://www.cedexmateriales.vsf.es>).

3.3.1. Composición química de la escoria

La composición química de la escoria está vinculada a la eficiencia del horno y al tipo de mineral empleado. Posee una composición similar a la del clinker del cemento portland, pero con una menor cantidad de CaO (Alonso, 2011), y con partículas de geometría angular y subangular (ver figura 3.6).



Figura 3.6. Imagen ampliada (x20) de EG AH

Mehta y Monteiro (2008) indican que químicamente la EGAH se considera un producto no metálico, constituido esencialmente de silicatos y aluminio-silicatos de calcio y otras bases. Su composición química, para una adecuada actividad cementante, debe cumplir que la relación $(CaO+MgO+Al_2O_3)/SiO_2$ sea mayor que 1. Estos autores también mencionan que la escoria puede presentar falta de estabilidad dimensional debido a un contenido demasiado alto de magnesia (MgO) en forma de periclasa, cuyos cristales reaccionan con el agua a temperatura ambiente en un período a medio y largo plazo, dando lugar a tensiones internas en el material endurecido. Por tanto, puede decirse que la escoria de alto horno son rocas metamórficas tipo síliceas levemente ácidas, con significativo contenido en óxido de calcio y magnesio. En líneas generales, cuanto más básica son las escorias más hidráulicas son (Marques, 1994). Las EGAH aportan resistencia mecánica a largo plazo y además dan compuestos hidratados menos vulnerables a los ataques químicos (SO_4^{2-} y Mg^{2+}) (Iborra, 2011).

La composición química de la escoria admite diversas posiciones en el diagrama $SiO_2-Al_2O_3-CaO$ (figura 3.7). Se puede apreciar que las puzolanas y cenizas volantes están sobre la línea $SiO_2-Al_2O_3$, en el primer tercio, partiendo de SiO_2 . La recta que atraviesa el área de las puzolanas hasta el polo CaO cruza una zona común para las escorias de alto horno (escorias ácidas y escorias básicas), los

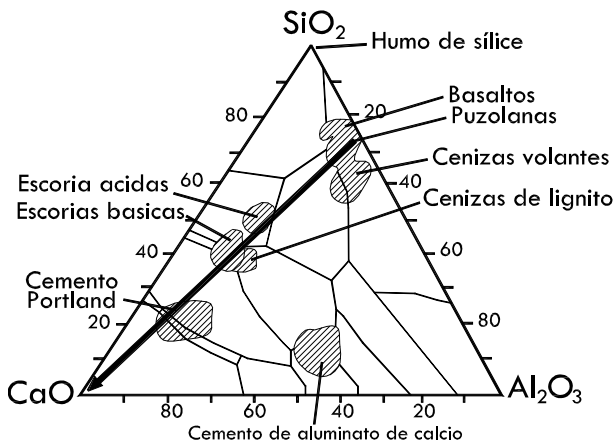


Figura 3.7. Diagrama $SiO_2-Al_2O_3-CaO$ (Alonso, 2011)

clínker del cemento portland y las cales hidráulicas para terminar en el polo representativo CaO.

Según la norma UNE-EN 197-1, las escorias de alto horno deben cumplir las siguientes condiciones para ser usadas como adición en el cemento (Cedex, 2014):

- Deben estar constituidas, al menos, en dos tercios de su masa, por fase vítrea.
- Deben estar compuestas, al menos en dos tercios de su masa, por CaO, MgO y SiO₂. El resto debe estar formado por compuestos de óxido aluminico (Al₂O₃) y pequeñas cantidades de otros óxidos.
- La relación (CaO% + MgO%) / SiO₂% debe ser mayor que 1.

La utilización de los cementos que incorporan escorias de alto horno, en hormigón estructural, se regula según la Instrucción EHE-08. Las escorias granuladas de alto horno molidas no están permitidas como adición al hormigón por la EHE-08.

Mineralógicamente, casi el 70% de escoria es vítrea y se compone principalmente de minerales como merwinita ($C_3MS_2 = 3CaO MgO 2SiO_2$), akermanita ($C_2MS_2 = 2CaO MgO 2SiO_2$), gelenita ($C_2AS = 2CaO Al_2O_3 SiO_2$) y cuarzo (SiO₂) (figura 3.8).

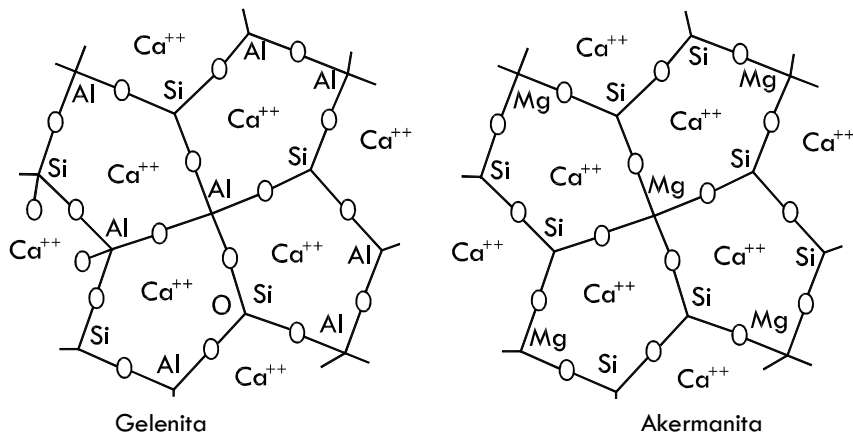


Figura 3.8. Esquema de gelenita y akermanita (Adaptado de Magalhães, 2002)

3.3.2. Reactividad de la escoria

La capacidad hidráulica de las escorias está muy atenuada y se manifiesta con lentitud, existiendo tres vías para acelerar sus reacciones de hidratación: utilización de activantes químicos, aumento de la superficie específica y aumento de la temperatura (Valcuende et al., 2014 y Puertas, 1993). Además, el grado de vitrificación, composición química, composición mineralógica son las características que determinaran su reactividad⁹ (ver figura 3.11) (Fu et al, 2000; Murgier et al, 2004; Ceccato et al, 2009).

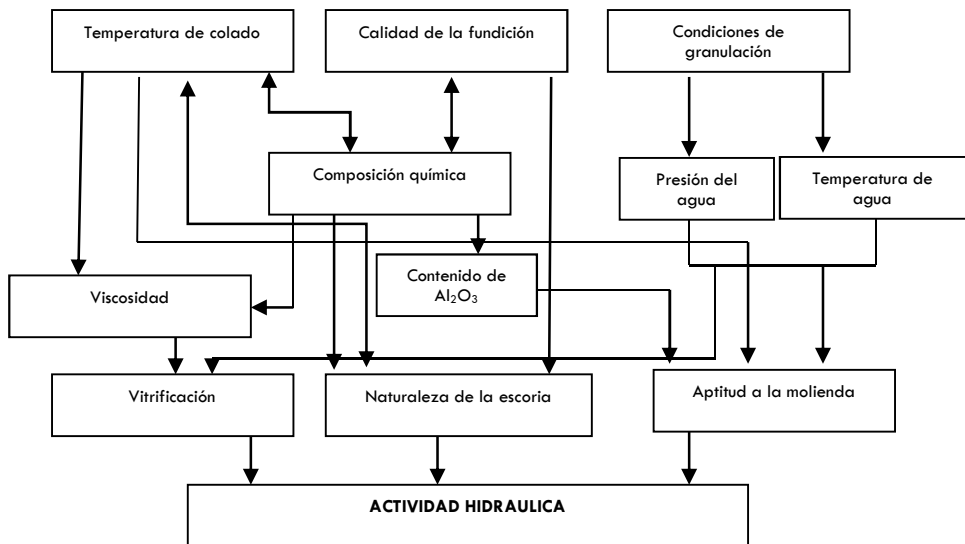


Figura 3.9. Reactividad de la EGAH (Miñano y Benito, 2012)

La alcalinidad del hormigón y sobre todo el grado de cristalización de la escoria determinaran la velocidad de hidratación de ésta. Será más rápida cuando más vítrea y amorfa sea la estructura del mineral (desorden en los enlaces de oxígeno y sílice). Para la sílice bien cristalizada el ataque será superficial. Para la sílice amorfa los iones

⁹ La reactividad hidráulica es la propiedad que presenta una sustancia para reaccionar con el agua en grado suficiente y para producir sólidos de muy baja solubilidad.

hidroxilos y sodio o potasio (para el caso de la reacción álcali-silíce) entrarán en el interior y producirán una mayor cantidad de geles de silicato (Segarra, 2005). En la figura 3.10 (arriba) se muestra un esquema de la activación superficial de la escoria cristalizada. Abajo el mismo efecto para una escoria amorfa.

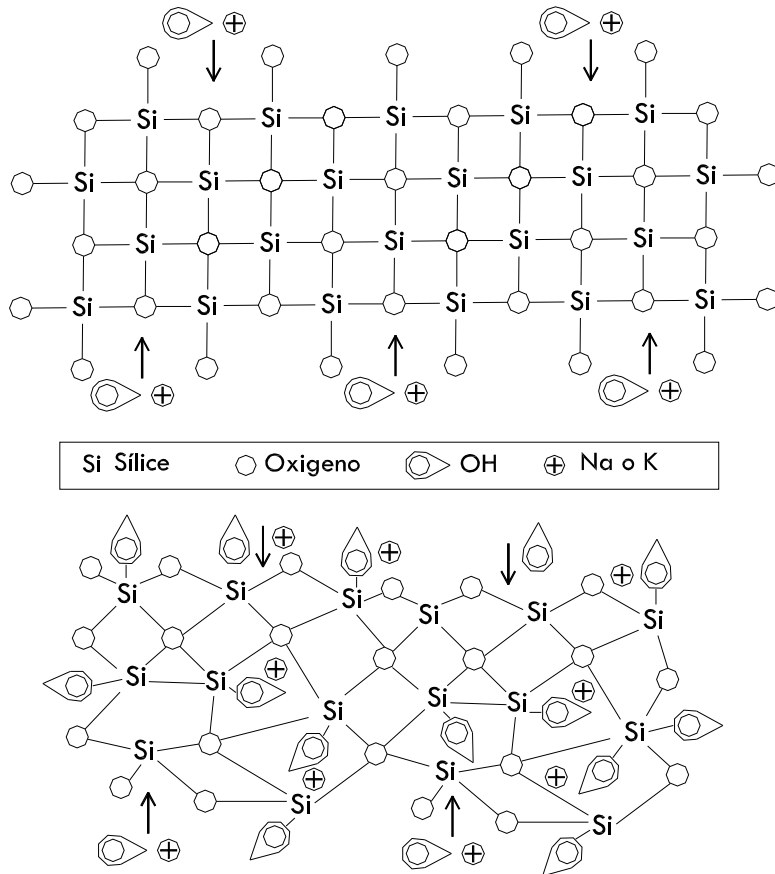


Figura 3.10. Ataque de álcalis en sílice bien cristalizada (arriba) y en sílice amorfa (Adaptado de Dent Glasser et al.(1980), publicado por Segarra, 2005)

El cemento portland es un buen catalizador para la activación de la escoria porque aporta los tres principales compuestos que activan la escoria, como son la cal, álcalis y sulfato de calcio (Aïtcin, 2008). La escoria, al mezclarse con pasta de cemento portland consume hidróxido

cálcico liberado en la hidratación del cemento y propicia la activación en cadena de la escoria. Ésta, participa en la fase de hidratación con nuevos compuestos similares a los del cemento portland, por lo que puede mejorar en gran medida la interfaz de unión entre el propio árido y la pasta de cemento.

Según Zhang et al. (1988), la solubilidad de la escoria y, por lo tanto, su reactividad frente al agua u otras sustancias de activación depende del grado de polimerización de los tetraedros (SiO_2) y de la combinación del Al y del Mg en la fase vítrea de la escoria. Cuanto mayor es el grado de polimerización en la fase vítrea menor es su actividad hidráulica.

La composición química de la escoria está ligada a la eficiencia del horno y a la homogeneidad de la escoria líquida¹⁰.

Las escorias de naturaleza básica, es decir, aquellas con relación $\text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2 > 1$, tienen mayor potencial hidráulico. El contenido de cal en la escoria controla la activación de la misma. La EG AH se puede considerar, de acuerdo a su composición química, como una escoria con una buena actividad hidráulica si cumple con los parámetros establecidos en la tabla 3.1 (Puertas, 2004).

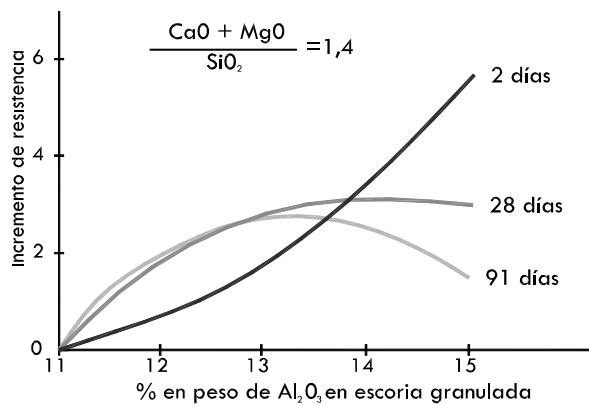


Figura 3.11. Resistencias de las escorias (Castells, 2000)

¹⁰ La baja viscosidad de ésta puede verse afectada por el contenido de alúmina o por el valor de la relación CaO/SiO_2 , pues para valores mayores de 1,4 la composición de la escoria es más reactiva. Cuanto mayor sea el contenido de alúmina mayor será la viscosidad de la escoria (Cincotto et al., 1992). Este valor debe estar comprendido entre el 20-25%.

Tabla 3.1. Fórmulas de actividad hidráulica de la EGAH (Pal et al., 2005)

Nº	Formula	Relación de composición necesaria para un buen funcionamiento
1	CaO/SiO_2	1,3-1,4
2	$(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$	$>1,4$
3	$(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$	1,0-1,3
4	$(\text{CaO}+1,4\text{MgO}+0,56\text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2$	$\geq 1,65$
5	$(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2$	$\geq 1,0$

La finura de la escoria es un parámetro fundamental para la hidratación de ésta, debiendo ser mayor que la del cemento (Pal et al., 2005). Como en todos los materiales cementantes, la reactividad de la escoria se determina por la superficie específica de ésta, afectando sobre la velocidad e intensidad de sus reacciones de hidratación y expresada como el área total de las partículas en relación con su masa, en cm^2/g . Para Gjorv (1989) el rango adecuado se sitúa entre 4.200-6.000 cm^2/g . Öner (2003) correlaciona el área superficial y tiempo de molienda del clínker y la escoria, permitiendo estimar el tiempo de molienda requerido para cierto valor de superficie específica. Wang et al. (1994) indican que el rango óptimo de superficie específica debe de ser determinado atendiendo a factores no solamente resistentes sino también tecnológicos y económicos. A partir de sus resultados comprueban que la superficie específica óptima de la escoria depende de la naturaleza de la misma, de los activadores y de las condiciones de curado. Así, indican que la superficie específica óptima para las escorias ácidas ó neutras es de 4.500 - 6.500 cm^2/g , mientras que en las escorias básicas esa superficie debería de estar entre 4.000-5.500 cm^2/g . Si las condiciones de curado son aceleradas la efectividad del incremento de la finura de la escoria puede ser reducida.

Mehta y Monteiro (2008) indican que el uso de cemento de escoria está muy consolidado, llegando en Alemania a un cuarto de la producción total de cemento, debiendo contener una fase vítrea de al menos el 95%, (Calleja, 1982). Soares (2003) y Neville (1997), entre otros, indican que los cementos con escoria de alto horno son a menudo más ventajosos desde el punto de vista de la resistencia al ataque químico (especialmente con respecto a los iones cloruro), al reducirse el tamaño de los poros de la pasta, haciéndola más compactos e impermeables. Además se reduce el ataque sulfático, disminuyendo la posible reacción álcali-árido al bajar la alcalinidad del hormigón (Mehta, 1989). Además se reduce la posible lixiviación de la cal libre al reducirse la cantidad de ésta al participar en la formación de CSH (ver figura 3.12), responsable de la resistencia mecánica del hormigón (Montgomery y Wang, 1991). Escalante (2002) indica que estas mejoras al ataque químico se aprecian a partir de los 28 días, por la lenta hidratación de la EGAH. A edades inferiores, la EGAH no ha formado nuevos CSH, penalizando las resistencias mecánicas iniciales por la sustitución de clínker por EGAH (figura 3.12).

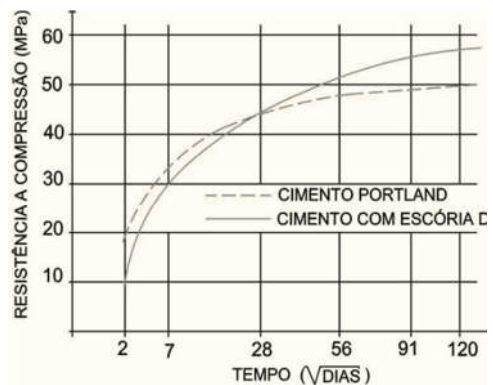
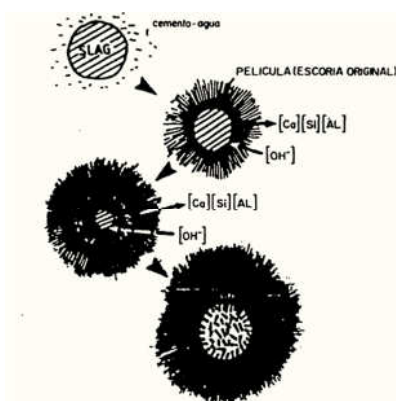


Figura 3.12. Izquierda, representación esquemática de la hidratación de la escoria (Puertas 1993). Derecha, evolución de resistencias de cementos con EGAH (Magalhães, 2002)

Las escorias al igual que las puzolanas interactúan con los productos de hidratación del cemento, diferenciándose de éstas por la gran proporción de calcio en la composición química de la EGAH (Escalante, 2002). Existen dos efectos físicos de la reacción química entre las partículas de escoria y del hidróxido de calcio. Por un lado, la disminución del tamaño de los poros debida a la formación de productos secundarios de hidratación (principalmente silicato de calcio hidratado) alrededor de las partículas de escoria que tiende a llenar los vacíos capilares con un material de baja densidad y que contiene microporos, disminuyendo el tamaño de los poros iniciales (Ver figura 3.13). Por otro lado, los hidróxidos de calcio, que se posicionan junto a las partículas de escoria, reaccionan con ésta y disminuyen de tamaño (Latorre, 2009). Ambos procesos fortalecen la pasta según Mehta y Monteiro (2008).

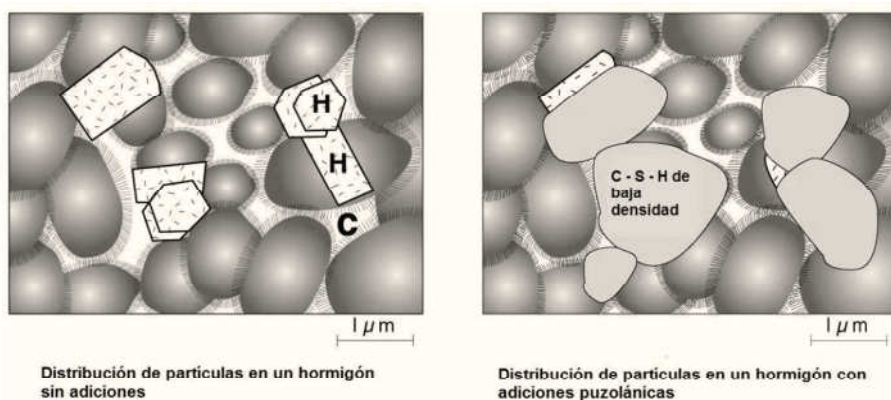


Figura 3.13. Distribución de partículas en la pasta cementicia (Mehta y Monteiro, 2008)

Los cristales de hidróxido cálcico constituyen el 20 - 25 % del volumen de sólidos en la pasta hidratada. En contraste con el CSH, el hidróxido cálcico es un compuesto con una estequiometría definida, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sus cristales se presentan muy definidos con formas planas y hexagonales, pudiendo variar su morfología en función del curado y relación a/c . Debido al gran tamaño de estos cristales cuentan con una baja superficie específica, disminuyendo las fuerzas de enlace entre ellos

o con otros sólidos, haciendo que su contribución en la resistencia total sea mínima frente al CSH. Además, presentan un problema de durabilidad debido a su elevada solubilidad en medios acuosos (Latorre, 2009).

A edades tempranas la zona de transición árido-pasta es la más débil por el volumen y tamaño de los poros de la zona, debido a una mayor concentración de agua inicial junto al árido. Esta agua cuando reacciona con otros productos o se evapora deja una interfaz más porosa y débil que el resto de la pasta. Con la hidratación de los compuestos de la escoria a tiempos posteriores mejora, por lo general, la interfaz debido a que los nuevos compuestos ocupan parte de los poros iniciales. En la figura 3.14 se muestra, de forma esquemática, la morfología de la interfaz árido-pasta de cemento, observándose la gran cantidad de cristales de hidróxido cálcico (hexágonos) presentes en la zona.

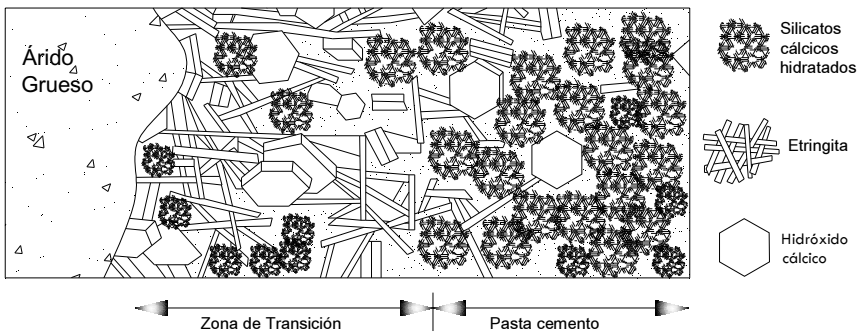


Figura 3.14. Interfaz árido – pasta de cemento (Parra et al., 2013)

En general, se observa que las propiedades mecánicas empeoran cuando se utilizan escorias de naturaleza ácida y tienden a mejorar cuando son de naturaleza básica. Orna et al. (2010) utilizan escorias ácidas de baja hidraulicidad y registran pérdidas de resistencia importantes, tanto mayores cuanto mayor es el porcentaje de árido sustituido. Así, por ejemplo, para sustituciones del 75% estas pérdidas son del orden del 50%, si la sustitución es de arena, y del 65%, si la sustitución es de grava. Saito et al. (2010) registran igualmente una menor resistencia a compresión a los 7 días, pero señalan que los resultados tienden a igualarse tanto a 28 como a 91 días debido a la hidraulicidad latente de las escorias utilizadas como árido fino. Por el contrario, en los ensayos realizados por Demirboğa y Gül (2006) con escorias de naturaleza básica y buena actividad hidráulica, se observa que sustituciones del árido grueso del 70% dan lugar a mejoras de resistencia a compresión hasta del 87% para diferentes relaciones a/c, incluso a los 7 días de edad. Estos hormigones presentan además una mayor resistencia a tracción, una menor absorción y un mayor módulo de deformación. Igualmente, Krishnasami y Malathy (2013) y Scandiuzzi y Battagin (1990) obtienen mayores resistencias a largo plazo debido a la actividad hidráulica tardía de las escorias.

Escalante y Espinoza (2008) trabajaron con hormigones con sustituciones del cemento portland (CPO) por EGAH en un 30, 50 y 70 % (CE). No obtuvieron mejoras a compresión a 28 días, por su lenta hidratación, debido a la formación de una capa ácida rica en sílice que impide la penetración del agua hacia el interior de la escoria (Moranville, 1998). En la figura 3.15 se muestra (arriba) los resultados a diferentes edades para los diferentes hormigones fabricados. En el centro se muestra la microestructura del hormigón con 100 % de cemento portland y abajo la microestructura del hormigón con un 50 % del cemento sustituido por EGAH. En las dos últimas imágenes se ha señalado con flechas las zonas de la matriz de los productos de reacción, observándose mayor densidad de ésta en la del 100% de cemento, frente al sustituido por EGAH, donde los granos de EGAH se encuentran prácticamente sin contribuir en el desarrollo de la matriz a los 28 días.

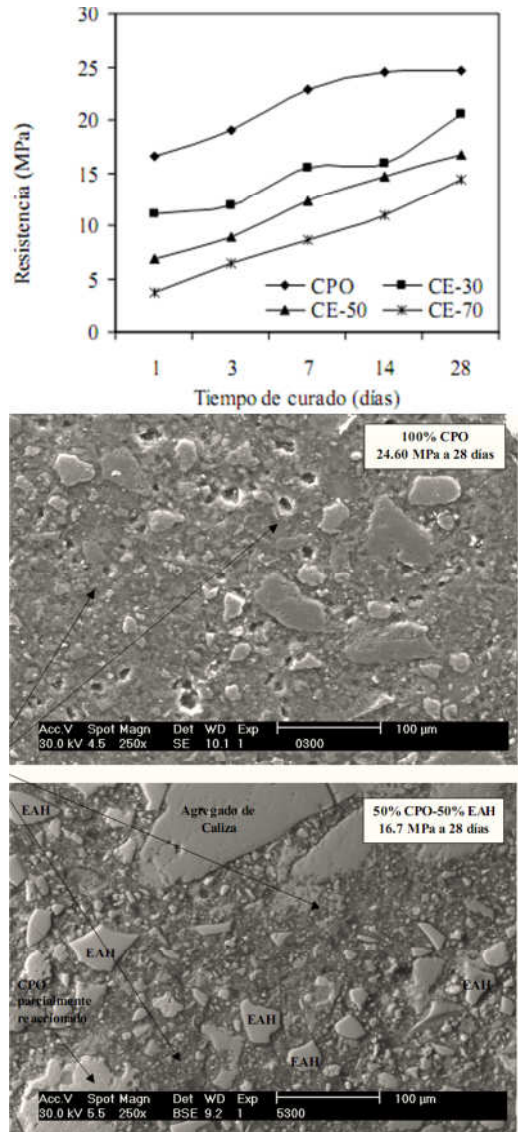


Figura 3.15. Arriba, resultado a compresión. Centro, microestructura del hormigón con 100 % de cemento Portland. Abajo con un 50 % sustituido por EGAH (Escalante y Espinoza, 2008)

En la misma investigación, los autores, estudiaron la activación de la escoria con silicato de sodio en diferentes porcentajes. Esta activación química provoca la rotura de la estructura vítrea de la escoria, acelerando la hidratación y precipitando los productos cementosos (Wang y Scrivener, 1994). En la figura 3.16 se muestran los resultados de resistencia mecánica a compresión de estos hormigones con un 100 % de

EGAH activada con diferentes cantidades de álcalis, y comparando los resultados con un hormigón de control CPO. En este caso, a partir del tercer día, los hormigones con EGAH activados químicamente adquieren más

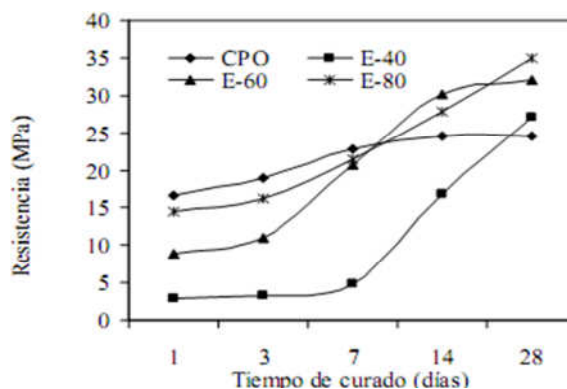


Figura 3.16. Resultados a compresión (Escalante y Espinoza, 2008)

rápidamente la resistencia a compresión. Entre el día 7 y el 22 todas las probetas activadas (E) superan a la de control (CPO). El desarrollo de resistencia es mayor cuando la EGAH se activa con la mayor cantidad de Na_2O (8%, E-80). La figura 3.17, izquierda y derecha, muestran la microestructura de los hormigones con EGAH activados con 4% y 8% de Na_2O (respectivamente), observándose claramente la mayor densidad de la matriz para el 8%. Tanto en casos de activación acelerada de la EGAH como en la que se usan con cementos portland (aporte de hidróxido cálcico) se obtiene un material estable y con mejoras de la interfaz árido-pasta (Gonzalez, 2011).

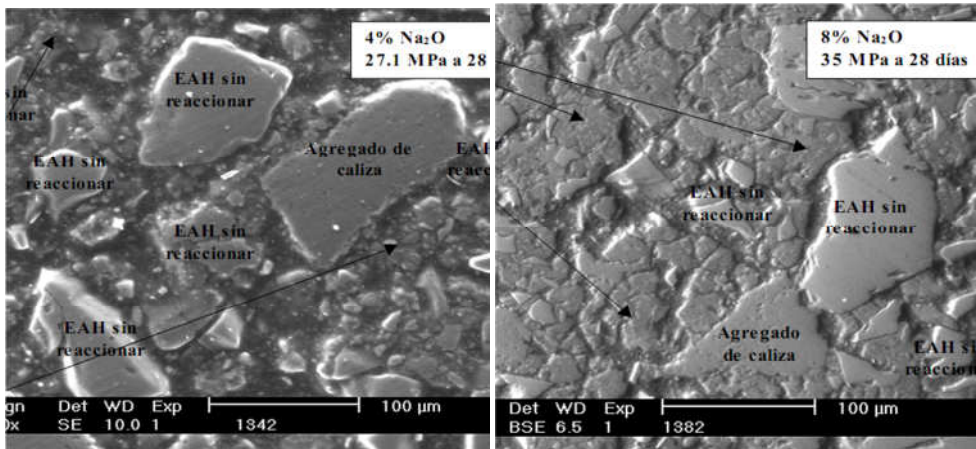


Figura 3.17. Microestructura del hormigón con 100 % EGAH, con 4% de Na_2O (derecha) y con 8% de Na_2O (izquierda) (Escalante y Espinoza, 2008)

Como resumen de lo indicado, todos los autores coinciden en que con el uso de la EGAH como material cementante¹¹, se consiguen mejores resistencias mecánicas y mayor durabilidad a edades avanzadas, por la formación de nuevos producto hidratados (CSH), que para su formación consumen hidróxidos de cálcico, reduciendo la posible lixiviación de este compuesto y evitando el aumento de la porosidad por este efecto. Además, los nuevos productos hidratados rellenan y disminuyen de diámetro los poros cercanos, mejorando significativamente la zona más porosa de la interfaz árido-pasta.

¹¹ Material cementante conjuntamente con cemento pòrtland (sobre todo por su alcalinidad) u otro agente activador.

3.3.3. Propiedades de la EGAH como árido en los hormigones.

a) Como árido fino

En general son pocas o casi nulas las referencias existentes relacionadas con el uso o estudio de la EGAH como árido en los hormigones, en especial en el HAC.

La incorporación de la EGAH como árido puede mejorar algunas propiedades del hormigón (Numata et al., 1986), de forma similar a las mejoras obtenidas como sustituciones de parte del cemento portland, como un aumento de resistencia frente al ataque de sulfatos, protección con la reacción álcali-árido, mejora de la trabajabilidad y aumento de la resistencia mecánica (Kosmatka et al., 2004). En este sentido, Numata et al. (1986) observaron a través del microscopio de barrido una capa hidratada de C-S-H en la interfaz de los granos de escoria. Además, concluyeron que los hormigones fabricados con EGAH como árido fino presentaban una mayor resistencia frente al ataque de ácidos que los fabricados con árido de río, justificando sus resultados porque los hormigones con escorias presentaban una mejor interfaz. Las investigaciones de Yüksel et al. (2006) y Numata et al. (1986) muestran cómo la EGAH utilizada como árido fino mejora la durabilidad del hormigón. En cuanto a la resistencia a compresión, en la investigación llevada por Scandiuzzi y Battagin (1990) se observa que los morteros con escorias granuladas de alto horno como árido fino presentan mejores resistencias a compresión a los 91 días (15% superiores) en comparación con morteros con arena natural, mientras que a 28 días la resistencia a compresión era mayor en los morteros con arena natural. Dichos resultados justifican la actividad hidráulica tardía de la EGAH.

La EGAH utilizada como árido fino afecta a las propiedades del hormigón en estado fresco, debido a su granulometría discontinua (contenido insuficiente de finos) y a su forma angulosa (Magalhães, 2002 y Antonina, 2002).

De modo análogo a la incorporación de adiciones al cemento, la sustitución de áridos naturales por materiales reciclados produce una mejora medioambiental, reduciendo la energía y las emisiones de CO₂ necesaria para su extracción de los áridos de cantera.

b) Como árido grueso

Berridi (2008) y Lauber (2009) estudiaron una serie de hormigones con empleo de diferentes residuos metalúrgicos como árido grueso, entre los que se encuentran la EGAH en fracción 4/20. Lauber (2009) obtuvo mejores resultados a compresión a 28 días (entre un 15% y un 30%) en los hormigones con el 100% del árido EGAH, indicando que la interfaz es mucho mejor que en los hormigones sin EGAH (figura 3.14). Berridi (2008) obtiene a los 28 días que los hormigones con EGAH como árido adquieren resistencias a compresión mayores que el hormigón de referencia (0% de EGAH), llegando hasta un 21% superior para el 100% de EGAH (ver figura 3.19).

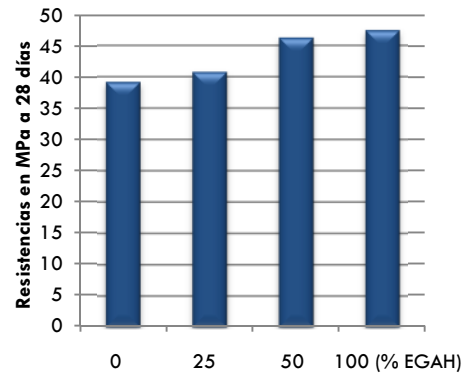


Figura 3.18. Resistencias de hormigones con EGAH como áridos (Berridi, 2008)

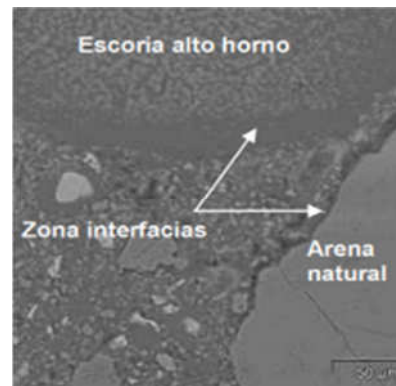


Figura 3.19. Interfase (Lauber, 2009)

Berridi (2008) y Lamber (2009) llegan a la conclusión de que es viable el uso de la escoria granulada de alto horno como árido en los hormigones. Además, los resultados de ambos van en línea con lo descrito por la amplia bibliográfica consultada sobre la hidratación de la EGAH como sustitución del cemento portland, consiguiendo un refinamiento de los poros del hormigón, mejoras mecánicas y de durabilidad. La EGAH sin moler, en su hidratación, se combina con parte de los hidróxidos cálcicos liberados en la hidratación del cemento portland y forman nuevos productos CSH.

A las posibles mejoras mecánicas y de durabilidad por la sustitución de parte del árido por escoria con capacidad hidráulica se contraponen que se pueden obtener hormigones teóricamente susceptibles de tener mayor retracción, ya que ésta se debe en parte a la reducción de volumen que experimentan los materiales cementantes durante su hidratación (retracción química). Esta retracción es mayor cuanto menor es la relación a/c , siendo especialmente importante cuando la relación a/c es inferior a 0,4 (Aitcin, 2008; Ambrosia et al., 2005). Según Seddik y Tagnit-Hamou (2009) el radio medio del poro, el radio umbral del poro y el refinamiento de la estructura porosa son buenos indicadores de la magnitud de la contracción autógena. No obstante, tal y como se observa en algún trabajo (Saito, 2010), la utilización de escoria no necesariamente tiene que provocar una mayor retracción. Las reacciones de la escoria forman fases C-S-H adicionales, lo que trae consigo que la red de poros sea cada vez más compacta. De hecho, Demirboğa y Gül (2006) registran un incremento de la densidad del hormigón del orden del 10% y Arellano et al. (2010) señalan que como resultado de la participación de EGAH en las reacciones observó una zona interfacial densa y fuerte con los granos de arena EGAH. El aumento de la

resistencia o de la densidad de la matriz reduce la deformabilidad del material (Chopin, 2003) y, por lo tanto, van a coartar la retracción.

Capítulo 4. Retracción del hormigón

4.1. INTRODUCCIÓN

El hormigón, como la mayoría de materiales, presenta variaciones dimensionales debidas a numerosos fenómenos, siendo los principales por cambios de humedad y aplicación de cargas. El tipo de ligante y de áridos utilizados, junto con la relación de a/c influyen en la magnitud de las deformaciones de los hormigones (Rodríguez y González, 2008b). Éstas pueden dividirse en reversibles e irreversibles y por su dependencia ante la tensión aplicada (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Clasificación de las deformaciones

Deformaciones	Dependientes de la tensión		Independientes de la tensión
	Instantáneas	Diferidas (fluencia)	
Reversibles	Elásticas	Elásticas diferidas	Termohigrométricas Retracción
Irreversibles	Remanentes	Plásticas diferidas	

La deformación instantánea del hormigón se compone de la “deformación elástica”, o deformación totalmente reversible, y la “deformación remanente”, o deformación irreversible.

Si se aplica una tensión a una pieza de hormigón, ésta experimenta una deformación denominada “deformación elástica” o “deformación elástica instantánea”. Si se mantiene la tensión constante a lo largo de un intervalo de tiempo las deformaciones aumentan paulatinamente, éstas son las llamadas “deformaciones diferidas”. Si posteriormente se retira

totalmente la carga, se produce una recuperación instantánea de la "deformación elástica instantánea". Si se prolonga la descargada de la pieza durante un cierto tiempo, se recupera, además, parte de la deformación diferida (deformación elástica diferida). La "deformación plástica diferida" es la deformación que no se recuperará nunca. A la suma de las deformaciones diferidas, tanto elástica como plástica, se la denomina "fluencia".

La retracción total es la suma de diversos tipos de retracción: química, autógena, por carbonatación y de secado. Sobre ellas interviene dos fenómenos complejos: pérdida de agua¹ y transformaciones de tipo químico².

La retracción depende de factores que influyen sobre la pérdida de agua como temperatura, humedad relativa (HR), viento y grado de exposición (relación superficie/volumen). Por otro lado, también influyen en la retracción parámetros que afectan a la estructura de la pasta de cemento como el tipo y contenido de cemento, relación a/c, grado de hidratación y porosidad. Por lo que de la combinación de todos ellos y sobre todo de la dosificación del hormigón condiciona su estructura porosa y ésta determina principalmente el fenómeno de la retracción. La EHE-08 en su modelo propuesto para calcular la retracción de un hormigón establece como parámetros de cálculo la resistencia característica a compresión (fck) del hormigón, edad de curado, geometría de la pieza, la superficie de la pieza expuesta al aire y HR durante el ensayo. En la figura 4.1 se puede ver un ejemplo de ello. Con

¹Con la pérdida de agua en los poros capilares, el espesor de la capa de agua adsorbida tiende a disminuir y provocando la retracción de la pasta. Al reducirse la capa de agua adsorbida, la retracción de la pasta es ocasionada por las fuerzas de atracción molecular entre partículas de agua (fuerzas de cohesión) y hace que los granos de árido se aproximen entre sí.

²En la hidratación del cemento, los productos resultantes ocupan un volumen menor que el volumen inicial ocupado por el agua y el cemento anhidro. Esta disminución de volumen se le denomina "retracción química".

el aumento de la resistencia del hormigón la retracción disminuye claramente y de forma lineal, y la pendiente de esta relación depende del periodo de estudio $t-t_s$ (ver anexo 11).

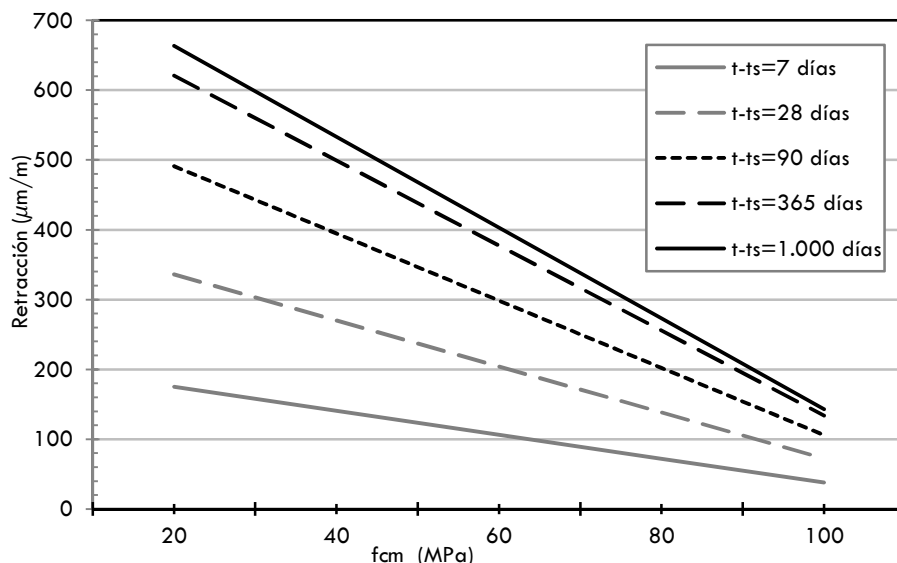


Figura 4.1. Evolución de la retracción de secado de un hormigón según EHE-08, en función de la resistencia media, f_{cm} , para probeta prismática de $100 \times 100 \times 400$ cm, HR 50% y diferentes periodos de secado ($t-t_s$)

4.1.1. Los áridos en la retracción

La retracción se produce en la pasta, quedando inalterado el volumen de los áridos, actuando éstos como elementos de restricción de la retracción. Variaciones en las características físicas, en la cantidad o en la forma de los áridos hacen que la retracción varíe de magnitud. Pickett (1956) desarrolló un modelo del efecto de coacción de los áridos sobre la pasta de cemento:

$$S = S_0(1-g)^\alpha \quad \Rightarrow \quad \log\left(\frac{S_0}{S}\right) = \alpha \cdot \log\left(\frac{1}{1-g}\right)$$

donde

S es la retracción lineal del hormigón

S_0 es la retracción lineal de la matriz cementicia

g es el volumen relativo de árido

α es una constante que representa el efecto de coacción, con valores entre 1,6 y 2,3 dependiendo el tipo de árido utilizado

En la misma dirección, años después, Newman y Choo (2003) cuantificaron la influencia del árido sobre la retracción según la expresión 4.2, donde se constata la dependencia de la retracción a la cantidad de árido de un hormigón. Según esta expresión la retracción es proporcional a la cantidad del árido. En la figura 4.2 se muestra un ejemplo de este modelo propuesto variando la cantidad de árido utilizado. Para ello, se ha adoptado la hipótesis de que la retracción del hormigón es la mitad que la de la pasta, en línea con lo indicado por Mindess (1985, citado por Agranati, 2008)(módulo de elasticidad 7-28 GPa para la pasta de cemento y 14-42 GPa para los hormigones). Para el caso de un contenido de áridos del 40%, la retracción es el triple que para un hormigón con un 80% de áridos. Además, en la misma figura, se incluye el modelo propuesto por el ACI 209R-92 con $\gamma_\psi=1,02$ (30% de árido fino, ver anexo 10).

$$S_c = S_p (1-\alpha)^n$$

donde:

S_c es la retracción del hormigón.

S_p es la retracción de la pasta.

α es el contenido de árido en la mezcla del hormigón.

n es un valor experimental. Los valores de n varían entre 1,2 y 1,7.

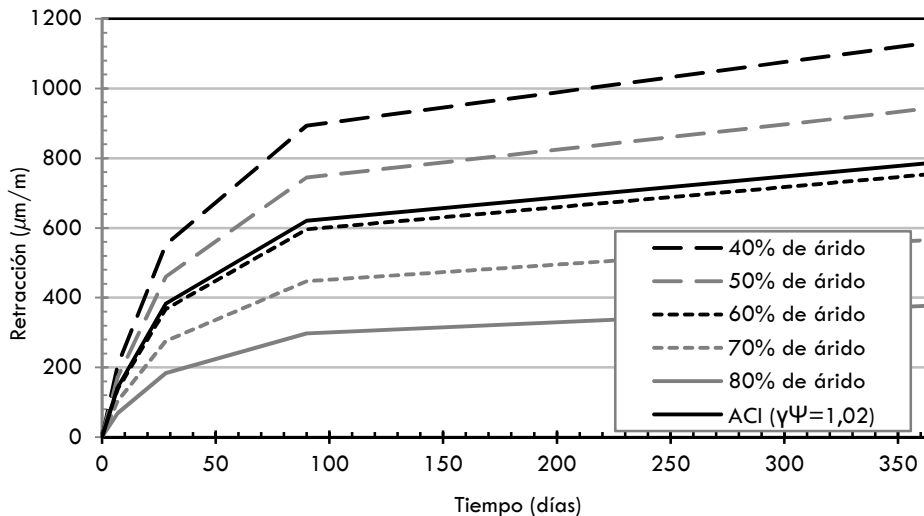


Figura 4.2. Evolución de la retracción de un hormigón variado la cantidad de árido según la expresión 4.2 y el ACI 209R-92

Con el aumento del tamaño del árido la retracción se reduce notablemente al ampliar el efecto restrictivo de estos (Furnas, 1997 y Mindess, 2003). Andrade (1997) indica que el tamaño del árido, por sí mismo, no tiene influencia directa en la retracción de los hormigones pero permite utilizar mezclas con menos cantidad de cemento y agua, repercutiendo, ahora sí, en una menor retracción. Además del tamaño, su composición mineralógica determina una mayor o menor contribución a la reducción de las deformaciones diferidas. Áridos menos rígidos opondrán menor esfuerzo a la deformación y las deformaciones serán mayores. A este respecto Neville (1970) y Moon (2005) indican que la rigidez de los áridos determinara en mayor o menor cantidad la retracción de los hormigones. Además de su rigidez, la dureza, la densidad, la absorción, o el coeficiente de Poisson son parámetros de los áridos determinantes en la retracción de los hormigones (figura 4.3 izquierda).

Cuanto menor es el módulo de elasticidad de los áridos menos coacción ejercen a los esfuerzos y mayor será su deformación (figura 4.4). La relación a/c determina el agua libre, afectando ésta a la retracción (figura 4.5) (Neville, 1996 en Newman y Choo, 2003). Un aumento del volumen de árido implica una disminución de la cantidad de pasta, lo que por un lado aumenta la coacción y, por otro, disminuye la parte de material que retrae, permitiendo reducir significativamente la retracción. Por ejemplo, tal y como se observa en la figura 4.5, para un volumen de árido del 80% son tantas las restricciones que se producen y la poca cantidad de pasta existente que el aumento de la relación a/c varía muy poco la retracción y todo lo contrario para el 50% del árido que dada la gran cantidad de pasta dispara la retracción con el aumento de la relación a/c.

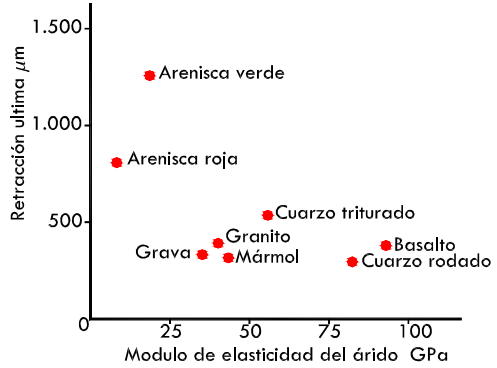


Figura 4.3. Relación entre la retracción ultima del hormigón y el modulo elástico de los áridos (Neville, 1970)

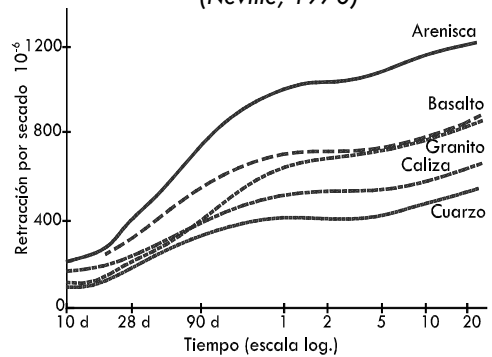


Figura 4.4 Influencia del tipo de árido en la evolución de la retracción de secado (Adaptado de Mehta y Monteiro, 2008)

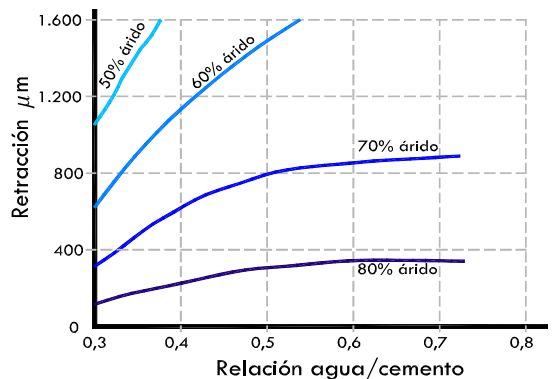


Figura 4.5. Relación a/c y el volumen de árido sobre la retracción (Adaptado de Neville 1996 de Newman y Choo, 2003)

Los áridos con superficie rugosa resisten mejor las deformaciones, creando mayores puntos de fricción en la interfaz árido-pasta. La mayor porosidad y absorción de los áridos junto con una menor densidad hace disminuir su módulo de deformación, lo que repercute en el hormigón con una bajada de su módulo de deformación, aumentando las deformaciones diferidas. Esto suele ocurrir en los hormigones con áridos reciclados por su alta porosidad. Las deformaciones obtenidas suelen aumentar proporcionalmente a la cantidad de áridos naturales remplazados (Gómez, 2003). En la figura 4.6 se muestra la retracción de un hormigón con áridos de distinta porosidad. El Model Code 2010 CEB-FIB (CM-2010) indica que el valor final de la retracción de secado es dependiente del contenido de humedad y absorción de los áridos y puede aumentar hasta en un 50% para áridos de gran absorción.

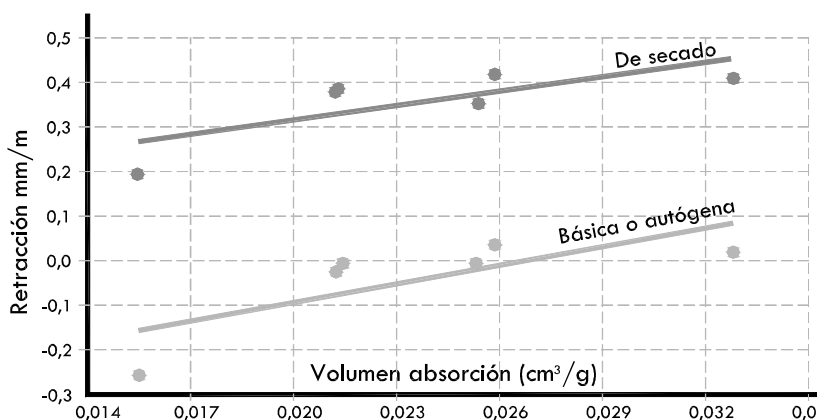


Figura 4.6. Deformaciones en hormigones con árido reciclado en función de la porosidad. (Adaptado de Gómez, 2003)

La reducción del tamaño de los áridos y el aporte de mayor cantidad de finos en los HAC, frente a los HT, los hacen precisar de mayor cantidad del cemento en la mezcla y esto hace aumentar la retracción del hormigón. En la figura 4.7 se muestran dichas variaciones

según el ACI 209R-92 para diferentes cantidades de cemento (300, 400 y 550 kg/m³) y a diferentes edades.

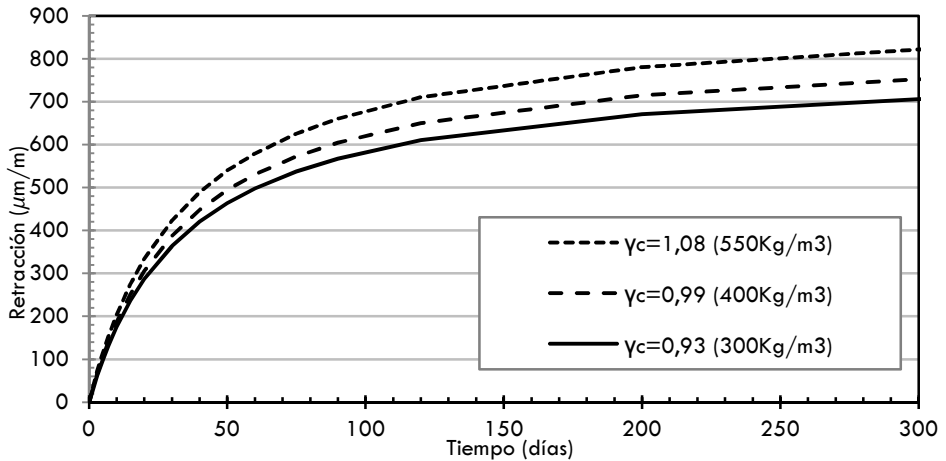


Figura 4.7. Evolución de la retracción de un hormigón variado la cantidad de cemento (γ_c), con HR 50% y según ACI 209R-92

4.1.2. La humedad relativa en la retracción

Una vez concluido el amasado y vertido de los hormigones en los encofrados se produce la pérdida de parte del agua libre del hormigón, bien al combinarse con otros compuestos o bien por evaporación. Esto genera variaciones dimensionales del material de cierta importancia cuando la libre deformación de los elementos está coaccionada, pudiendo producir fisuras generalizadas o localizadas (Rodríguez y González, 2008b). La variación de la humedad del hormigón afecta significativamente a la retracción del mismo, siendo la humedad relativa un parámetro a tener en cuenta en el curado del hormigón. La HR alta ralentizan el secado del hormigón y HR muy bajas lo aceleran y, por

tanto, aumenta la retracción de los hormigones (figura 4.8)³.

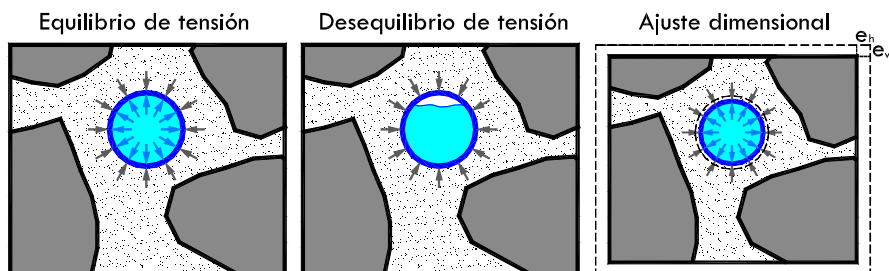


Figura 4.8. Esquema de la retracción del hormigón con la pérdida de humedad

En la figura 4.9 se muestran las diferencias de fluencia y retracción entre hormigones curados en laboratorio, a HR constante (50%), y en el exterior, con HR variable. Se observa para este último caso la variabilidad de resultados en ambos fenómenos.

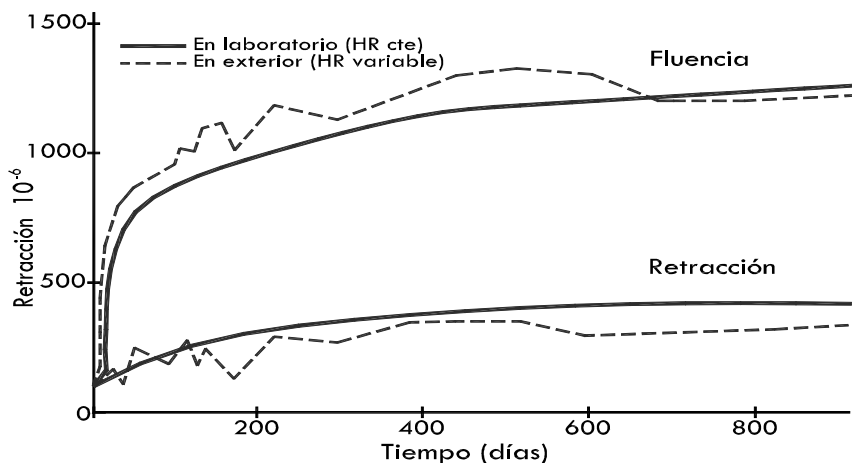


Figura 4.9. Fluencia y retracción con HR variable y constante (Neville 1970)

³En la figura 4.8 se muestra el esquema del proceso principal de la retracción motivada por la pérdida de agua del hormigón, representado los 3 pasos fundamentales. A la izquierda, el hormigón se encuentra en un hipotético equilibrio de tensiones, con los poros llenos de agua. En este primer paso, el agua que rellena el poro y por su condición de incompresibilidad transmite los esfuerzos internos de forma tangencial a su contorno, consiguiendo un equilibrio en la pasta. Con la pérdida de humedad (independientemente del motivo que lo ocasiona) deja descompensados los esfuerzos. Las tensiones exteriores de la pasta provocan la compresibilidad del poro y su disminución de volumen hasta conseguir un nuevo equilibrio. Tras disminuir el volumen del poro, la pasta de cemento también disminuye de volumen, generándose la retracción de la pieza. Los 3 pasos idealizados en la figura 4.8 se repiten continuamente en bucle mientras exista pérdida de humedad en el hormigón. Estas retracciones producen una disminución de volumen del elemento, expresados como un acortamiento lineal en cada eje (e_v y e_h).

Además, la pérdida de humedad de los hormigones afecta a la resistencia mecánica, y ésta repercute a su vez en la retracción. Rocco et al. (2008) con hormigones envueltos con film aislante (para evita la evaporación del agua) obtuvieron a edad avanzada una mayor resistencia a compresión y mayor módulo de elasticidad (hasta un 15% en ambos casos), frente a los hormigones sin sellar. En la misma investigación, los valores de retracción a la edad de 2 años en los hormigones expuestos al aire varió entre 350 y 465 $\mu\text{m}/\text{m}$, mientras que en los hormigones aislados varió entre 250 y 350 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Las principales normativas (EHE-08, Código modelo 2010, Eurocodigo2, etc) tiene en cuenta la HR en sus modelos de retracción.

La retracción, como ya se ha indicado, se prolonga mientras exista perdida de humedad del hormigón, y crece con el incremento del contenido de agua, del contenido de cemento y de la relación a/c (figura 4.10).

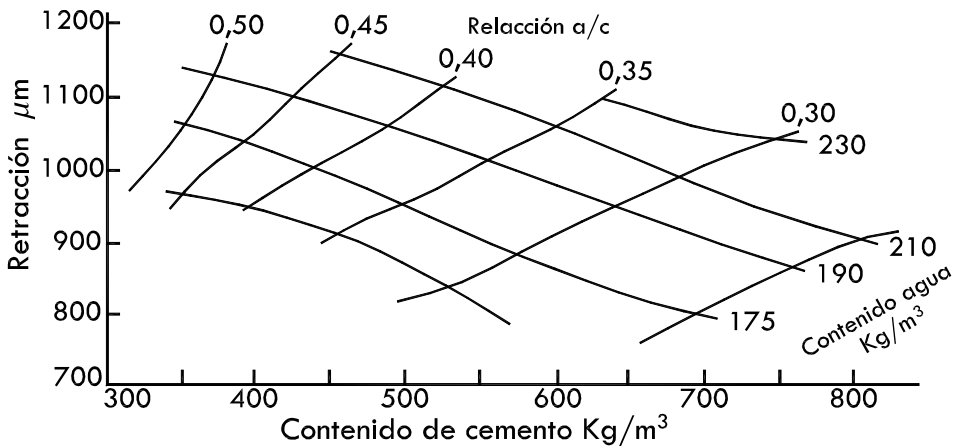


Figura 4.10. Relación entre la retracción del hormigón a 465 días y el contenido de agua, el contenido de cemento y la relación a/c (Neville, 1995)

4.1.3. Microestructura

La microestructura del hormigón es compleja y heterogénea con poros de diferentes tamaños y más o menos interconectados. Cada rango de poros influye, en mayor o menor medida, sobre diferentes parámetros del hormigón y sobre todo en la retracción.

Los poros se suelen clasificar en; microporos o poros de gel, mesoporos o capilares y macroporos o poros de aire. Una descripción general de los poros que puede contener la pasta de cemento es la siguiente (Aligizaki, 2006):

-Los poros de gel o microporos son espacios intersticiales interconectados y presentes entre las partículas de gel. Son los más pequeños y pueden contener gran cantidad de agua adherida mediante enlaces de puentes de hidrogeno. Ocupan aproximadamente un 28 % del volumen total de gel independientemente de la relación a/c y del grado de hidratación del cemento.

-Los poros capilares constituyen el volumen ocupado por el agua y que no ha sido rellenado por los productos de hidratación. La cantidad de estos poros depende principalmente de la relación a/c y del curado. El agua libre tiende a evaporarse, acelerándose este proceso con la bajada de la HR del exterior. Estos poros determinan la permeabilidad del hormigón por su mayor interconexión, creando una gran red de poros capilares. En la figura 4.11 se muestra la influencia de la permeabilidad, la relación a/c y el tiempo de curado, destacando el aumento de la permeabilidad con el aumento de la relación a/c cuando se realiza un curado corto. Las 48 primeras horas son las más influyentes en la permeabilidad del hormigón. Para curados de más de 7 días las

diferencias disminuyen significativamente.

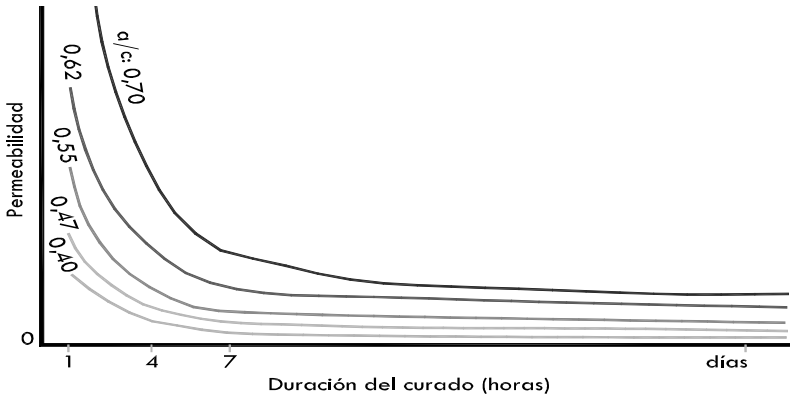


Figura 4.11. Influencia en la permeabilidad en función de la relación a/c y el tiempo de curado. (Moron, 2009)

-Los macroporos incluyen a los poros de aire atrapado en el interior del hormigón. Éstos pueden haber sido introducidos durante el amasado o, de forma intencionada, con aditivos. Con respecto a los poros de aire o aire ocluido, el modelo de retracción propuesto por el ACI-92 incluye el coeficiente γ_{α} para su consideración. En la figura 4.12 se muestra un ejemplo de la variación de la retracción en función de la cantidad de aire ocluido del hormigón. Se constata que hay un aumento de la retracción al aumentar la cantidad de aire ocluido presente en el hormigón. Este modelo no contempla la f_{cm} del hormigón y cuantifica la retracción según la dosificación utilizada. Altas cantidades de aire ocluido implican menores f_{cm} , aumentando la retracción como en el resto de modelos analizados.

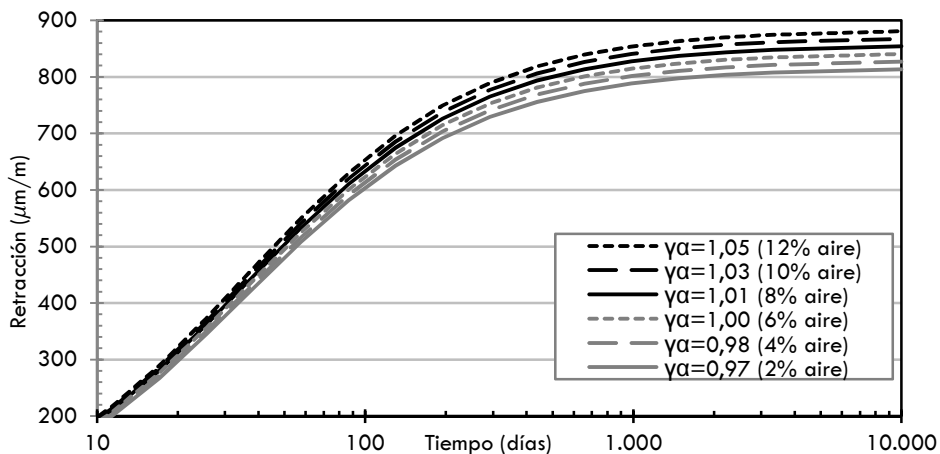


Figura 4.12. Evolución de la retracción de un hormigón variando la cantidad de aire ocluido (γ_a), con HR 50% y según ACI 209R-92

4.1.4. Agua

Como ya se ha indicado, el agua del hormigón es la responsable de gran parte de la retracción. El agua se puede encontrar de diferente forma en la matriz de cemento, con mayor o menor dificultad de evaporación o desplazamiento (Latorre, 2007). En la figura 4.13 se muestra un esquema de distintos tipos de agua en el cemento hidratado según Metha y Monteiro (2008).

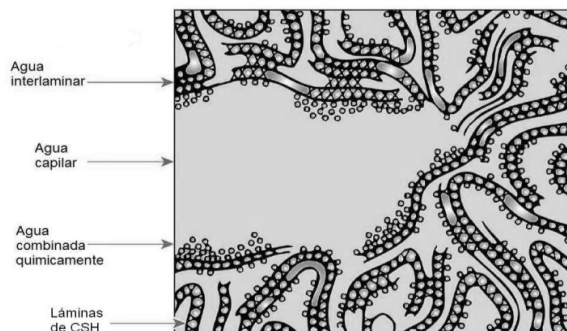


Figura 4.13. Distintos tipos de agua en el cemento hidratado (Metha y Monteiro, 2008)

El agua capilar se encuentra presente en los poros de tamaño superior a 50 Å, pudiendo subdividirse en el agua que contienen los poros de 5 - 50 nm y que está ligada por la tensión capilar y el agua contenida en los poros superiores a 50 nm. La primera afecta al volumen de la matriz y, por tanto, a la retracción del hormigón y la segunda se considera como agua libre y afecta en menor medida a la retracción del hormigón (Latorre, 2007).

El agua interlaminar está asociada a la estructura del gel de CSH y ésta sólo se pierde por un secado muy intenso (por debajo de un 11% de humedad relativa). Cuando esto ocurre la estructura del CSH se retrae considerablemente con reducciones significativas de las propiedades mecánicas del hormigón (Latorre, 2007).

El agua combinada químicamente en el hormigón no se encuentra libremente en la matriz. Ésta forma parte de los compuestos hidratados del cemento y no se puede evaporar, por lo que no produce retracción. La única forma de eliminarla sería con la descomposición de los productos hidratados.

El agua adsorbida se encuentra en la superficie de los sólidos y atraída por fuerzas moleculares. Su eliminación provoca cambios volumétricos de la pieza y, por tanto, retracción.

4.2. LA RETRACCIÓN DE LOS HORMIGONES

Las deformaciones por retracción en el hormigón, tanto en estado fresco como endurecido, pueden clasificarse por su efecto, causa u origen. La clasificación más usada es:

- Retracción plástica
- Retracción térmica
- Retracción química o de hidratación:
- Retracción por autodesecación
- Retracción autógena
- Retracción por secado
- Retracción por carbonatación

La figura 4.14 muestra la contribución de las retracciones más significativas con el paso del tiempo y su importancia. A continuación, se profundiza en cada una de ellas.

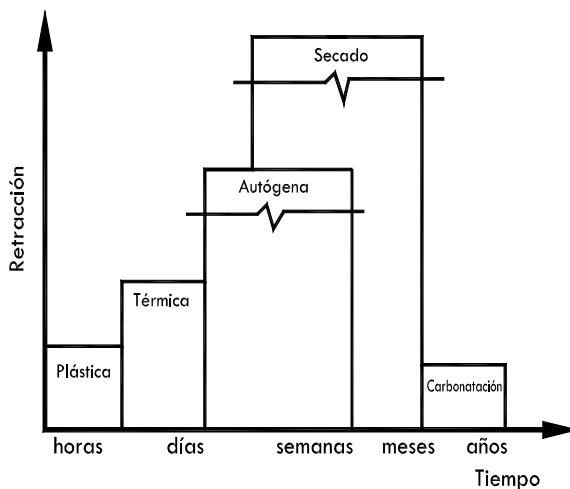


Figura 4.14. Tipos de retracción e importancia (Adaptado de Gettu, 2000)

4.2.1. Retracción plástica

La retracción plástica actúa durante las primeras horas después de verter el hormigón. Se produce por un asentamiento plástico en estado fresco del hormigón (Metha y Montero, 2008). El espacio libre entre las partículas del hormigón está lleno de agua. Este agua, libre y sin combinar, tiende a salir al exterior y evaporarse, disminuyendo el volumen inicial del hormigón antes de fraguar. No suelen generarse daños en el hormigón, dado que éste todavía no presenta rigidez y se acomoda rápidamente con el nuevo volumen. Si el hormigón cuenta con obstrucciones o restricciones de movimiento, como puede ser un armado muy superficial o complicados encofrados, pueden aparecer fisuras (figura 4.15).

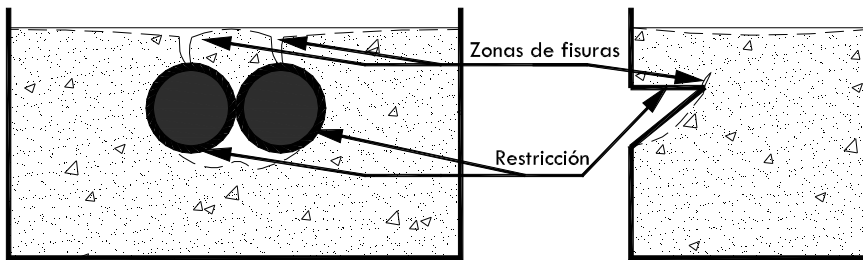


Figura 4.15. Fisura por asentamiento con restricción (por refuerzo y encofrado o moldura)

La evaporación del agua superficial del hormigón provoca que éste se contraiga en mayor magnitud en la capa superficial y desarrolle tensiones de tracción que provocan fisuras poco profundas. En la figura 4.16 (izquierda) se muestra una losa con alto fisuramiento superficial y en la figura 4.16 (derecha) se muestra una fisuración siguiendo el patrón geométrico de la posición de la armadura de refuerzo. La mayores fisuras se encuentran en forjados con la menor relación agua/cemento (0,45 correspondiente con la probeta nº3 de la

figura 4.16 centro, en lugar de 0,55 para el resto). La utilización de filler calizo hizo disminuir el sangrado, lo que aumento la evaporación (Peterson, 2008). Cuando se genera exudación o sangrado en los hormigones se reduce en gran medida el secado del hormigón y, por lo tanto, la retracción plástica puede ser ligeramente reducida.



Figura 4.16. Retracción plástica elevada en losas de hormigón (Peterson, 2008)

Barlo (1993) indica que cuanto mayor es el tamaño de las barras de refuerzo, mayor es el asentamiento del hormigón y menor es el recubrimiento de las barras, mayor es la fisuración del hormigón (figura 4.17).

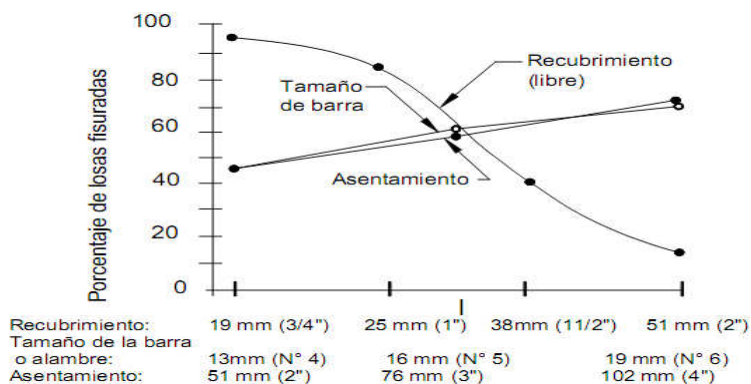


Figura 4.17. Fisuración por asentamiento en función del tamaño de la barra, del asentamiento del hormigón y del recubrimiento (Dakhil et al., 1975)

El agua, antes de comenzar la hidratación del cemento, es propensa a desplazarse por gradientes de humedad entre la masa del hormigón y el ambiente. Esto produce la retracción plástica y varía en gran medida en función de parámetros como la relación a/c , temperatura ambiental y del hormigón, humedad exterior e interior, velocidad del viento e incluso por la absorción del agua por el encofrado. En función de cada uno de los anteriores parámetros y de su simultaneidad podrán afectar, en menor o mayor importancia, a la evaporación superficial del hormigón, tanto en clima caluroso como en clima frío (Barlow y Darwin, 1993). Hormigonados con presencia de lluvia o nieve durante las primeras horas reducen la retracción plástica al evitar la evaporación (Peterson, 2008).

Por lo tanto, es muy importante la relación a/c adoptada y sobre todo el agua libre dado que ésta, al circular hacia el exterior y al evaporarse, provoca la retracción del hormigón y deja un camino de poros interconectados, perjudicando la impermeabilidad y resistencia del hormigón. Existe una relación inversa entre la porosidad y la resistencia. Es en la parte sólida del material donde se soportan los esfuerzos mecánicos (Latorre, 2009). En la figura 4.18 se muestra la influencia de la parte sólida ($1-Porosidad$) en la resistencia a compresión y permeabilidad de la pasta según Mehta et al. (2006).

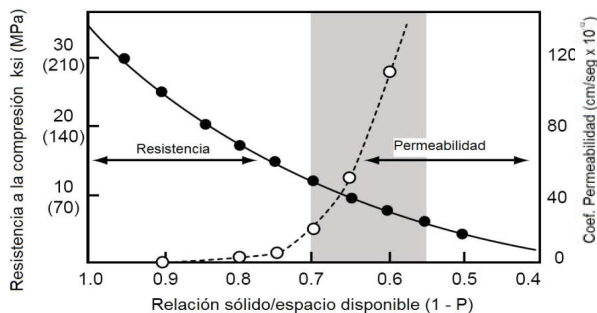


Figura 4.18. Influencia de la parte sólida ($1-Porosidad$) en las resistencias a compresión y permeabilidad de la pasta (Mehta et al., 2006)

4.2.2. Retracción térmica

Durante la hidratación del cemento se producen reacciones exotérmicas, aumentando la temperatura del hormigón durante la primera etapa de hidratación y haciendo que la pasta se dilate. Con el paso del tiempo, con el hormigón ya endurecido, la temperatura se regulariza con el exterior y se produce una contracción conocida como retracción térmica.

La hidratación de los diferentes compuestos del cemento es lo que marca la energía liberada, siendo bastante representativo en el caso de los silicatos. El C_3S y C_2S tienen similares procesos de hidratación, distinguiéndose por el calor liberado durante la reacción. El primero puede liberar 1.114KJ/mol mientras que el segundo solo 43 KJ/mol. El flujo de calor en C_3S es proporcional a la velocidad de la reacción y de gran importancia en la hidratación de la pasta dado que es el compuesto más importante del cemento (entre un 40 - 70 % de su peso).

Otro compuesto del cemento que afecta a la retracción térmica es el aluminato tricálcico (C_3A). Es el compuesto del cemento más reactivo con el agua. Tiene una influencia significativa sobre la temprana hidratación y la reología de los morteros y hormigones. En este caso la energía liberada es de 340 KJ/mol.

En la figura 4.19 se muestra la curva de evolución de calor y la secuencia de hidratación del C_3A . Existe una reactividad inicial alta seguida de un período de baja reactividad.

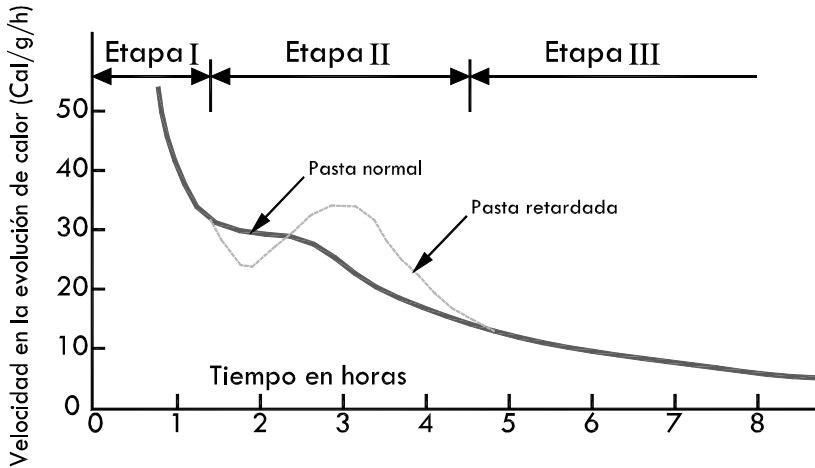


Figura 4.19. Hidratación del C_3A sin yeso. Secuencia y curva calorimétrica

El yeso, utilizado en el cemento portland, permite ralentizar la hidratación del aluminato tricálcico. En la figura 4.20, se muestra un diagrama cinético simplificado de las reacciones del aluminato tricálcico en presencia de yeso.

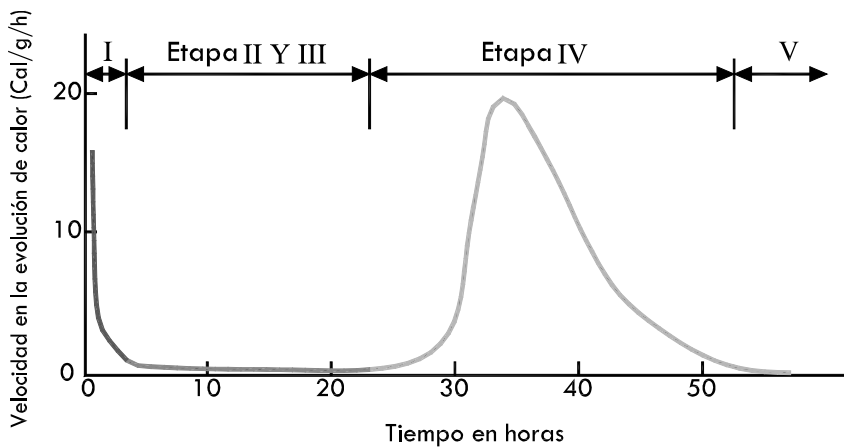


Figura 4.20. Cinética de las reacciones de hidratación del C_3A con yeso

El primer pico de calor formado durante los primeros minutos se debe principalmente a la formación de etringita. El segundo coincide con

la conversión de etringita a monosulfato, que depende de la cantidad de sulfato disponible (figura 4.21).

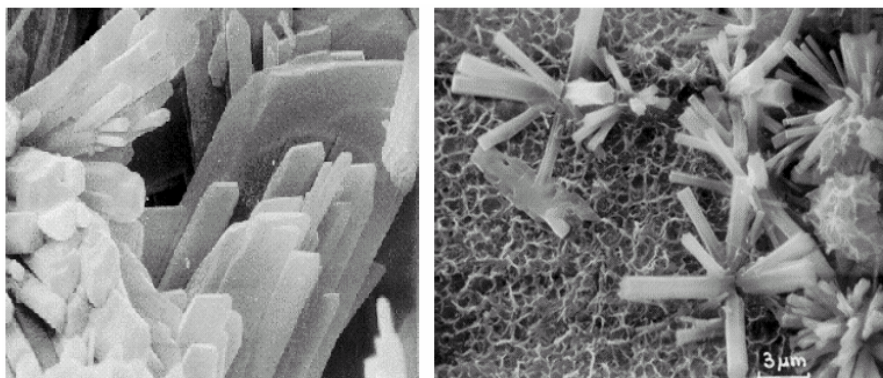


Figura 4.21. Micrografías de los productos de hidratación. C_3A en presencia de yeso

En la figura 4.22 se puede ver una curva calorimétrica típica del cemento portland. Los picos secundarios de hidratación del C_3S y del C_3A normalmente se pueden distinguir con facilidad, aunque su secuencia puede ser invertida.

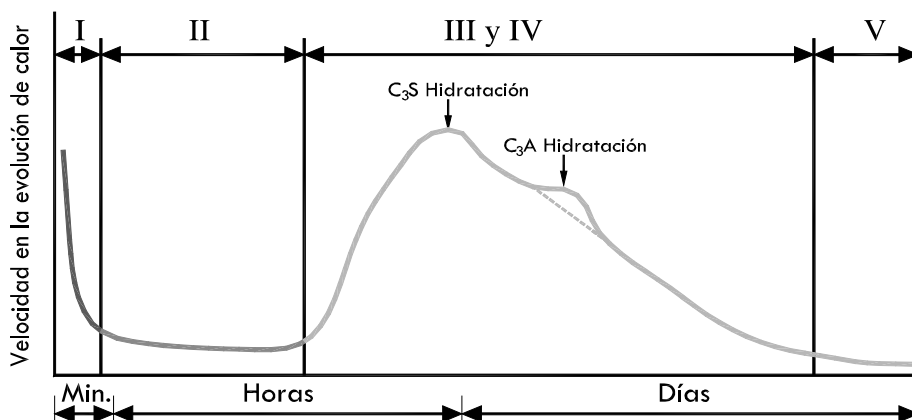


Figura 4.22. Evolución del calor de hidratación del cemento portland

La retracción térmica puede reducirse con un buen diseño del encofrado, con cemento de bajo calor de hidratación (bajo contenido de C_3A y C_4AF) o con adiciones que ralentizan el proceso de hidratación y disminuyen la temperatura máxima alcanzada. Latorre (2007) indica que las reacciones de hidratación del cemento pueden llegar a ser incluso violentas a tiempos iniciales, produciendo cambios dimensionales iniciales del elemento, disminuyendo su actividad en un corto período de tiempo para más tarde retomarse la velocidad de hidratación en la fase de formación del CSH.

4.2.3. Retracción química o de hidratación

En algunas fases de la hidratación del cemento los productos resultantes ocupan menos volumen que los productos iniciales, provocando la retracción de la pasta hidratada del cemento y consecuentemente del hormigón. Esta deformación también es conocida como contracción de Le Chatelier.

En la molienda del cemento se adiciona yeso para corregir sobre todo el rápido fraguado del C_3A . El yeso, además, reduce o compensa la retracción química de los morteros y hormigones a un valor mínimo. La cantidad de SO_3 presente en el cemento está limitada por normativa (4%, UNE-EN 197-1:2011), no pudiendo reducir el 100% de la retracción de este tipo.

4.2.4. Retracción por autodesecación

En hormigones con baja relación a/c y con una microestructura densa e impermeable, como en algunos HAC, el proceso de hidratación del cemento hace que disminuya el agua libre de la pasta, pudiéndose provocar una retracción significativa.

4.2.5. Retracción autógena

La retracción autógena, por su difícil separación, incluye la suma de la retracción de autosecado y la química⁴. Esta disminución de volumen es debida al consumo del agua durante la hidratación del cemento. Se da en las primeras edades del hormigón y se prolonga mientras se desarrollen los procesos de hidratación que consumen agua. El volumen de los productos hidratados resultantes es menor que el volumen original del cemento anhidro y del agua, provocando la retracción de la pasta y consecuentemente del hormigón (Bibm et al, 2005). En un hormigón de baja relación a/c puede ocurrir que no haya suficiente agua para completar el proceso de hidratación, agotando el agua libre que se encuentra en los poros capilares. Este fenómeno de consumo interno de agua también llamado autosecado es la causa, en parte, de la retracción autógena del hormigón (figura 4.23)⁵.

⁴La retracción por autodesecación y la química están muy ligadas y de difícil separación para su estudio, pueden considerarse globalmente en la retracción autógena (Gettu, 2000).

⁵En la figura 4.23 se esquematiza el proceso de la retracción autógena, donde se muestra el avance de la hidratación de granos de cemento en una pasta. Con el paso de las horas los granos de cemento comienza a hidratarse y a consumir agua, creando espacios (poros) sin agua. Con el paso de los días este consumo de agua aumenta con el desarrollo de la hidratación del cemento. Estos poro vacíos descompensan las tensiones internas y hacen disminuir de volumen a la pasta de cemento hasta conseguir un nuevo equilibrio tensional.

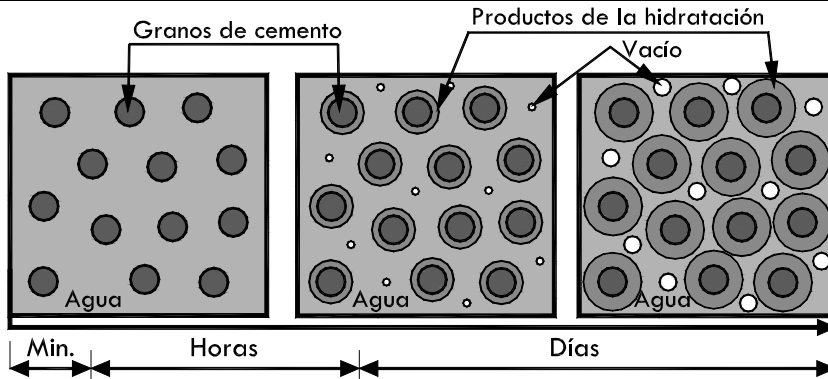


Figura 4.23. Evolución de los productos de hidratación y consumo del agua interna

En hormigones vibrados con resistencias normales, por una mayor relación a/c , la retracción autógena suele ser pequeña (valores inferiores a $100 \mu\text{m}/\text{m}$) (Newman y Choo, 2003). En el caso de hormigones de alta resistencia, con una menor agua disponible por una relación a/c menor, la retracción autógena pueden ser significativa, con valores de hasta $700 \mu\text{m}/\text{m}$ (Neville, 1995). La retracción autógena tiende a incrementarse con altas temperaturas, alto contenido de cemento y con la finura y altos contenido de C_3A y C_4AF . Todos estos factores también aceleran el proceso de hidratación.

El efecto de las adiciones es variable en la retracción autógena. Neville (1995) indica que la utilización de ceniza volante, escoria, o humo de sílice aumenta la retracción. Con el aumento de la finura de esta escoria la retracción aumenta debido a una mayor superficie de reacción, acelerando la reacción de hidratación y el consumo de agua (Song, 2001). Aguado y Gettu (1993) obtienen resultado contrarios a los anteriores, utilizando humo de sílice reducen la retracción. Brooks (2001) indica que, en general, la ceniza volante no influye de forma significativa sobre la retracción pero cuando los niveles de sustitución son altos la variabilidad de los resultados es alta. Vieira y Bettencourt (2003) obtuvieron retracción autógena similar ($100 \mu\text{m}/\text{m}$ después de seis meses)

en hormigones con adiciones de ceniza volante y caliza. El uso de humo sílice, como con otras adiciones, causa el refinamiento de la estructura de poro, disminuyendo la permeabilidad y la cantidad de secado, por lo que la retracción de secado disminuye. Por otro lado, la tensión capilar aumenta con la finura del poro, potenciando el aumento de la retracción autógena del hormigón (De Larrard y Sedran, 1994).

Generalmente el desequilibrio tensional, y por tanto la retracción autógena, se prolonga en el tiempo hasta el consumo total del agua o hasta la finalización de la hidratación de los compuestos del cemento (figura 4.24).

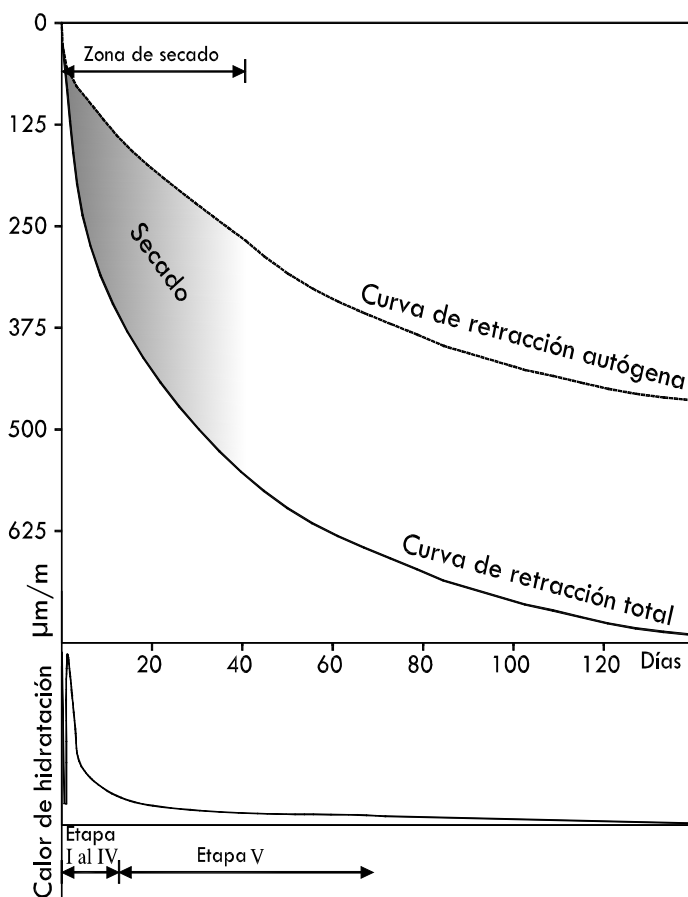


Figura 4.24. Evolución de retracción con respecto a la hidratación del cemento

En la parte superior de la figura 4.24 se muestra la retracción autógena y total de un HAC con las diferentes etapas de hidratación del cemento en la parte inferior, destacando que la gran retracción se corresponde con las primeras etapas de hidratación del cemento portland. Con el paso de los días, el hormigón tiende a igualar su humedad con la del exterior. Cuando esto sucede la retracción de secado no se incrementa, por lo que la retracción total, que es la suma de la autógena y la de secado, aumenta en la misma proporción que la retracción autógena, por lo que ambas rectas se mantienen prácticamente paralelas.

4.2.6. Retracción de secado

La retracción de secado es la más importante de todas las retracciones del hormigón. Es parte de la retracción total y por su importancia se suele tener en cuenta en el cálculo estructural. Se produce a largo plazo debido a la pérdida de agua absorbida en el C-S-H ($C = \text{CaO}$; $S = \text{SiO}_2$; $H = \text{H}_2\text{O}$) por evaporación. Se da en el hormigón endurecido y tiene que ver con la pérdida de humedad ante la existencia de un gradiente de humedad entre el interior del hormigón y el ambiente al que está expuesto. Este fenómeno de retracción es complejo al intervenir diferentes mecanismos, siendo los principales el de capilaridad y el de la tensión superficial del agua contenida en los poros de la pasta (Rodríguez y González, 2008). Las variables que más influyen en este fenómeno son la HR, el espesor y dimensión de la pieza, composición y edad del hormigón, cantidad de armaduras y sobre todo la relación a/c.

Cuando el poro se encuentra lleno de agua existe un equilibrio de fuerzas en su entorno, debido a la baja compresibilidad del agua. Si el poro pierde agua se produce un desequilibrio tensional en la microestructura y ésta retrae hasta equilibrar nuevamente las tensiones de la zona (figura 4.25).

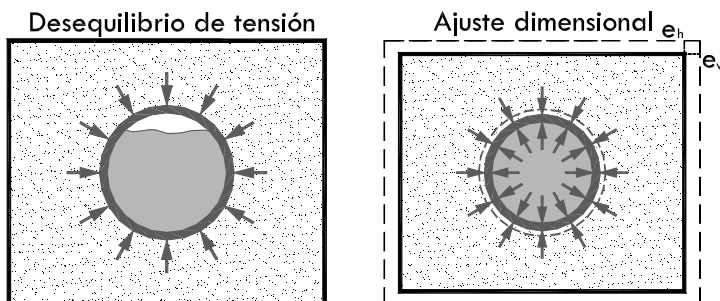


Figura 4.25. Esquema de la retracción del hormigón con la pérdida de humedad

Barlow y Darwin (1993) indican que este fenómeno puede ocasionar en la pasta de cemento una disminución de hasta un 1%. En el hormigón los áridos reducen estas deformaciones a valores cercanos a un 0,06%.

Si durante la hidratación no se garantiza un mínimo curado el hormigón se retrae y microfisura, aumentando la conexión entre los poros capilares. Estas nuevas microfisuras interconectadas favorecen la difusión del agua del interior de la pieza, acelerando el proceso de secado y en consecuencia el aumento de retracción y nuevas microfisuras, y así sucesivamente. La fisuración inducida por el secado se produce, inicialmente, de forma perpendicular a la superficie de secado, surgiendo además microfisuras radiales y tangenciales a los áridos de mayor tamaño en el hormigón (Shiotani et al., 2003). Barlow y Darwin (1993) indican que los cambios de volumen inducidos por las variaciones de

humedad son una característica propia del hormigón. Si la retracción de éste se produce de manera no restringida, el hormigón no se fisura. Es la combinación de la retracción y la restricción lo que provoca el desarrollo de tensiones de tracción. Cuando se supera la resistencia a la tracción del hormigón éste se fisura.

Cuando la HR ambiente es más baja que la que existe en el interior del material se produce el secado del mismo por un equilibrio higrométrico, comenzado por la desecación de las capas exteriores del hormigón y avanzando el frente de secado hacia el interior, debido a un gradiente de humedad (segunda ley de Fick⁶).

La magnitud de la retracción de secado depende principalmente de la cantidad y tipo de árido, y sobre todo del contenido de agua de la mezcla. Cuanto mayor es la cantidad de áridos y su calidad, menor es la retracción (Pickett, 1956). En este sentido la rigidez del árido hace disminuir la retracción, pudiendo ser el doble la retracción en un hormigón con arenisca que en un hormigón con granito, basalto o caliza (Carlson, 1938).

⁶En una zona determinada de un sólido, el flujo y el gradiente de difusión varían con el tiempo, generando acumulación o agotamiento de las sustancias que difunden.

4.2.7. Retracción por carbonatación

La pasta del cemento hidratado en contacto con el CO_2 del ambiente, y durante la vida de la estructura, se carbonata. Con esta reacción el volumen de los nuevos compuestos es menor que los originales. Afecta sólo a la capa superficial de los hormigones y no resulta significativa en hormigones con baja permeabilidad a los gases.

Barlow y Darwin (1993) indican que debido a que el carbonato de calcio formado en la carbonatación del hormigón tiene menor volumen que el hidróxido de calcio que lo origina puede provocar un importante grado de fisuración irregular en las superficies del hormigón.

El proceso de carbonatación depende fundamentalmente de la velocidad de penetración del CO_2 , además de otros factores, como la estructura de poros, la humedad, el tipo de cemento y el tipo y cantidad de adiciones. Esta retracción se ve potenciada por el resto de retracciones descritas, ya que dejan a su paso una red de microfisuras que junto con la red capilar propia del hormigón facilitan la penetración del CO_2 , provocando el avance del frente de carbonatación.

Bermejo (2009) indica que la carbonatación (y la retracción que causa) en un HAC es similar o menor a la de un HT, reduciéndose esta retracción con la disminución de la permeabilidad del hormigón. Además, la retracción térmica y por carbonatación se puede reducir sustituyendo el cemento por adiciones. Éstas reducen la cantidad y concentración de hidróxido cálcico disminuyendo la posible combinación con el CO_2 .

4.3. LA RETRACCIÓN DE LOS HAC

Los HAC, frente a los HT, se dosifican en general con relaciones agua/cemento más bajas, por lo que no cuentan con un exceso de agua significativa. En condiciones adversas de calor o viento pueden perder parte del agua destinada a la hidratación del cemento, produciéndose fisuras en la superficie expuesta a la intemperie.

La dosificación de los HAC afecta significativamente a la retracción plástica. Mayor cantidad de finos y mayor molienda del cemento incrementan la tendencia del hormigón a tener fisuras por retracción plástica (Mauricio, 2007). Además, esta retracción aumenta con el aumento de la cantidad de cemento y la pasta o al disminuir la relación agua/cemento. Según algunas investigaciones (Hammer, 2003 y Turcry y Loukili, 2003) la retracción plástica también aumenta con el aumento de la cantidad de superplastificante utilizado. Turcry et al., (2002) detectaron que la retracción plástica del HAC puede llegar a ser 4 veces mayor que en HT, con valores de 1250 $\mu\text{m}/\text{m}$ para el HAC, frente a 270 $\mu\text{m}/\text{m}$ para el HT, debido a la baja relación agua/finos y el retraso en el fraguado del HAC por el alto contenido de superplastificante, provocando un mayor tiempo de exposición al ambiente del agua libre existente en los poros del hormigón antes de la hidratación.

Leemann y Hoffmann (2005) estudiaron HAC y HT de equivalente resistencia a compresión, obteniendo un 30% de retracción plástica mayor en el HAC (370 a 470 $\mu\text{m}/\text{m}$) frente al HT (260 a 330 $\mu\text{m}/\text{m}$). Los HAC contenían entre 299-360 l/m^3 de pasta frente a los 242-261 l/m^3 para el HT, siendo esta diferencia, según los autores, la responsable de las diferencias de retracción.

Hans-Erik y Pentti (1999) estudiaron la retracción en mezclas de HAC con filler calizo. El volumen de pasta era mayor (376 y 415 l/m³) para el HAC con respecto al HT de referencia (335 y 297 l/m³), llegando a obtener diferencias de retracción plástica muy significativas, 660 $\mu\text{m}/\text{m}$ para el HAC y 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ para el HT. Sin embargo a los 63 días la retracción total era similar, entre los 500 y 580 $\mu\text{m}/\text{m}$.

El HAC cuenta, por lo general, con más cantidad de cemento por m³ de hormigón, por lo que desarrolla una mayor retracción química que los HT. Otros factores, como adiciones o aditivos, hacen más compleja la hidratación del cemento y su interrelación con la pasta y no siempre se obtienen los mismos resultados. Así por ejemplo, los aditivos SP pueden aumentar la retracción plástica y hacer disminuir la de secado al permitir disminuir el agua libre de la mezcla, evitando su posterior evaporación (Rodríguez y González, 2008).

La menor relación a/c y la microestructura más densa e impermeable de los HAC los hace más propensos, por lo general, que los HT a sufrir retracción por autodesecación o autógena al consumirse el agua libre en el proceso de hidratación del cemento. Esto hace disminuir la humedad en los poros y crea presiones internas negativas, que generan esfuerzos a tracción (figura 4.25). Cuando las fisuras son visibles es síntoma de grandes retracciones, con la consecuente pérdida de propiedades mecánicas y de durabilidad de los hormigones.

La retracción de secado en los HAC, por lo general, es mayor que en los HT, en parte, por su mayor contenido de finos y pasta, salvo en el caso de HAC fabricados con AMV y sin finos adicionales. En el estudio llevado por Valcuende et al., (2011) se observó que la utilización de un

AMV como sustitutivo del filler calizo permite obtener HAC con menor retracción de secado (un 33% menor). Estas diferencias se justifican por la mayor finura de la estructura porosa en los HAC fabricados con filler, ya que cuanto más finos son los capilares y mayor es la superficie específica total de los poros, mayor es la presión capilar y por tanto la retracción.

La retracción de secado se acentúa a edades cortas con estructuras porosas poco densas y permeables, facilitando la pérdida del agua libre del interior del elemento. Ambientes secos, altas temperaturas o vientos de elevada velocidad acentúan la retracción. A este respecto, Chan et al. (2000) citado por Agranati (2008), dejaron curar en 2 puntos geográficos diferentes unas muestras de HAC con escorias (como adición) y HT. En la zona montañosa, con HR media entre 80-90%, la retracción del HAC y HT fueron 376 y 364 $\mu\text{m}/\text{m}$, respectivamente, mientras que en la zona de menor humedad relativa media, 75%, la retracción fueron de 878 y 848 $\mu\text{m}/\text{m}$, respectivamente. Obteniendo unas similares retracciones en un mismo ambiente entre los HAC y HT (variaciones de 3,2% para la zona húmeda y 3,5% para el ambiente más seco). Resultando una variación del 233% entre la retracción de los hormigones situados en la montaña y los otros.

El tamaño de las partículas afecta a la retención de agua y por tanto a su evaporación. Investigadores como Valcuende et al., (2013a) indican que a mayor finura del filler o de la fracción fina de las arenas, mayor es la superficie específica de las misma y por tanto mayor cantidad de agua retienen, oponiendo mayor resistencia a su evaporación. Por el contrario, Puentes et al., (2012) indican que las mezclas de menor granulometría (ellos emplean nanoadiciones) producen mayor evaporación durante el proceso de hidratación, muy similar a lo

obtenido por Barluenga et al. (2012) que utilizan pequeñas cantidades de metacaolín y nanosilíce con filler calizo en el HAC, obteniendo a edades tempranas un aumento de la temperatura, la tasa de evaporación y la retracción de secado. Las diferencias entre las investigaciones descritas podrían explicarse si las nanoadiciones de estos últimos son muy reactivas y elevan la temperatura del HAC.

Poppe y De Schutter (2005) trabajaron con HAC con $600\text{kg}/\text{m}^3$ de finos (cemento + filler calizo), variando únicamente la relación entre el cemento y el filler, obteniendo retracciones de 375 hasta $550\ \mu\text{m}/\text{m}$, correspondiendo los valores más bajos para el HAC con menor cantidad de cemento. Diferencias producidas por el mayor consumo de agua por el cemento y quizás por la mayor temperatura alcanzada.

El árido grueso, como elemento de coacción, es un gran diferenciador en la retracción entre el HAC y HT. El contenido de arena es mucho mayor en los HAC (menor cantidad de árido grueso), frente a los HT, para garantizar una adecuada reología del mismo. La relación árido fino/árido total está en torno a 0,5 en los HAC frente al 0,3 - 0,4 en los HT (AFGC, 2002). La norma ACI 209R-92 incluye en su modelo de retracción la variable γ_ψ que depende de la proporción de árido fino/árido total (ψ). Utilizando este modelo queda constada la variación de la retracción con el aumento de ψ . Altos valores de ψ suelen corresponder a los HAC. En la figura 4.26 se muestra un ejemplo de ello, utilizando los intervalos indicados de ψ (0,3, 0,4 y 0,5).

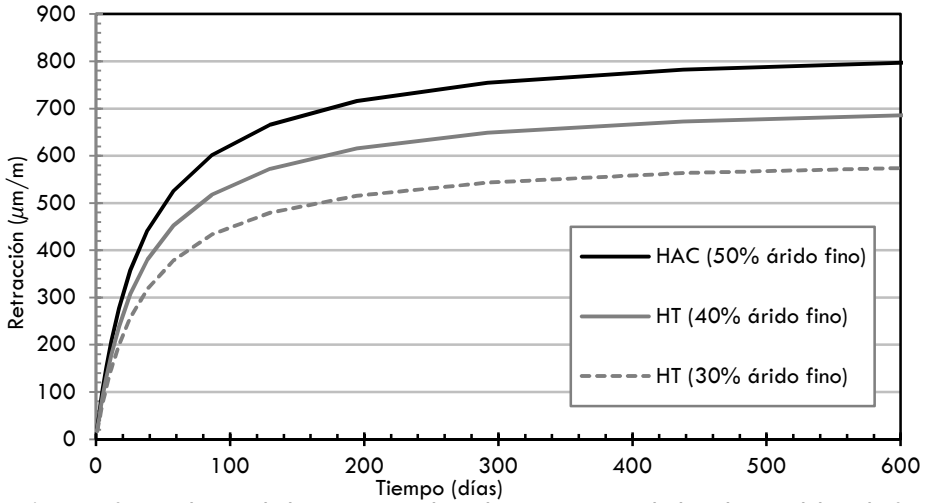


Figura 4.26. Evolución de la retracción de un hormigón variando la relación del árido fino sobre la total (γ_ψ) según ACI 209R-92

Xie et al. (2005) estudiaron la influencia de la relación del volumen de áridos gruesos y el volumen de mortero (V_g/V_m) en los HAC, manteniendo constante la suma de ambos. La retracción a los 90 días disminuyó con el incremento en la relación V_g/V_m , desde $400\mu\text{m}/\text{m}$ para $V_g/V_m = 0,36$, hasta los $320\mu\text{m}/\text{m}$ para $V_g/V_m = 0,52$, actuando el árido grueso como acodalamiento o empaquetamiento del mortero y restringiendo a la retracción.

4.4. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LA RETRACCIÓN.

4.4.1. Introducción

Los modelos de cálculo recogidos en los diferentes códigos y normativas varían en complejidad y en precisión. En este trabajo se ha estudiado los modelos del CEB-FIB Model Code 2010 (CM-2010), el ACI 209R-92 (ACI-92), el Eurocódigo 2(EC-2) y la EHE-08. A continuación se realiza una descripción de todos ellos, indicándose las expresiones a utilizar. Además, se comparan y analizan los cuatro modelos.

4.4.2. CEB-FIB Model Code 2010

El CEB-FIB Model Code 2010 (CM-2010) sustituye al CEB-FIP 90⁷. Entre otras diferencias con su antecesora CEB-FIP 90, el CM-2010 hace diferenciación entre la retracción autógena y la de secado. La retracción total es la suma de ambas. Los parámetros necesarios para el cálculo de la retracción según el modelo propuesto por CM-2010 son:

- La edad del hormigón al comienzo de la retracción, t_s .
- Edad del hormigón en el momento de evaluación, t .
- Humedad relativa, en %, HR.
- Resistencia media a compresión del hormigón a la edad de 28 días, MPa, f_{cm} .
- Espesor medio, mm, e .
- Tipo de cemento

En el modelo de cálculo del CM-2010, la retracción autógena (ϵ_{as}),

⁷El modelo del CEB-FIP 90 ha sido uno de los más utilizados y considerado como referencia para otros códigos nacionales, entre ellos la EHE y el Eurocódigo.

la de secado (ϵ_{Cds}) y la total (ϵ_{cs}) se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cas}(t) + \epsilon_{cds}(t - t_s)$$

$$\epsilon_{cas}(t) = \epsilon_{cas0}(f_{cm}) \cdot \beta_{cas}(t)$$

$$\epsilon_{cds}(t, t_s) = \epsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{HR}(HR) \cdot \beta_{ds}(t - t_s)$$

$$\epsilon_{cds0}(f_{cm}) = [(220 + 110\alpha_{ds1}) \exp(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm})] \cdot 10^{-6}$$

$$\beta_{HR} = -1,55[1 - (HR/100)^3] \text{ para } 40 \leq HR < 99\% \cdot \beta_{s1}$$

$$\beta_{HR} = 0,25 \text{ para } HR > 99\% \cdot \beta_{s1}$$

$$\beta_{s1} = (35/f_{cm})^{0,1} \leq 1$$

$$\epsilon_{cas0}(f_{cm}) = -\alpha_{cas} [(f_{cm}/10)/(6 + f_{cm}/10)]^{2,5} \cdot 10^{-6}$$

$$\beta_{cas}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot \sqrt{t})$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = [(t - t_s)/(0,035 \cdot h^2 + (t - t_s))]^{0,5}$$

donde:

- f_{cm} es la resistencia media a compresión a 28 días, en MPa.
- h es el espesor medio en mm. $h = 2 A_c / u$
- A_c es la área de la sección transversal, mm².
- u es el perímetro en contacto con el aire, mm.
- HR es la humedad relativa en tanto por ciento.
- t es la edad del hormigón en días
- t_s es la edad de comienzo del secado en días
- α_{ds1} , α_{ds2} y α_{cas} son coeficientes dependientes de la velocidad de hidratación del cemento (ver tabla 4.2)

Tabla 4.2. Valores de los α para los diferentes velocidades del cemento

Clase cemento	Lento	Normal	Rápido
α_{ds1}	3	4	6
α_{ds2}	0,013	0,012	0,012
α_{cas}	800	700	600

El CM-2010 para los HAC, por su alto contenido de pasta, indica que la retracción será aproximadamente 20% mayor que el del HT, de igual fuerza. Para hormigones con alto contenido de cenizas volantes, indica que se incluyan en la cantidad de cemento y se considere, éste, de lento endurecimiento.

Para hormigones con áridos ligeros (alta porosidad) resultaran unas retracciones mayores (entre un 20% y un 50%) por la evaporación y el agua retenidas en los áridos.

4.4.3. ACI 209R-92

Es modelo incluido en el ACI 209R-92 (ACI-92) es utilizado como referencia para hormigones en EEUU, Canadá, Australia y parte de América Latina. Es empírico y se basa en resultados experimentales.

Los parámetros necesarios para este modelo son:

- Edad cuando comienza la retracción.
- Método de curado.
- Humedad Relativa.
- Relación Volumen/Superficie, o espesor medio, mm.
- Diversos factores correctores como del contenido de árido fino, el contenido de aire y contenido de cemento.

En el modelo de cálculo del ACI-92, la retracción de un hormigón, $\epsilon_{sh,t}$, se determina utilizando las siguientes expresiones:

$$(\epsilon_{sh})_t = (t / (35+t)) \cdot (\epsilon_{sh})_u \text{ (para 7 días de curado húmedo)}$$

$$(\varepsilon_{sh})_t = (t / (55+t)) \cdot (\varepsilon_{sh})_u \text{ (para 1 a 3 días de curado al vapor)}$$

$$(\varepsilon_{sh})_u = 780 \gamma_{sh} \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$$

$$\gamma_{sh} = \gamma_{cp} \cdot \gamma_{\lambda} \cdot \gamma_{vs} \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{\psi} \cdot \gamma_c \cdot \gamma_{\alpha}$$

donde

t = edad del hormigón después del curado inicial del hormigón

γ_{sh} es el producto de todos los factores de corrección

γ_{cp} = factor corrector para curado húmedo diferentes a los 7 días

γ_{λ} = factor corrector para la HR.

γ_{vs} = factor corrector para el tamaño de la pieza.

γ_s = factor corrector para la consistencia del hormigón.

γ_{ψ} = factor corrector para el contenido de árido fino.

γ_c = factor corrector para el contenido de cemento.

γ_{α} = factor corrector para el contenido de aire.

Estos valores, en su mayoría se determinan por tablas y formulas incluidas en el ACI-92. Los parámetros correctores con valores=1 no modifican el resultado final. Estos pueden ser o no utilizados, según la información con la que se cuente, permitiendo una gran flexibilidad. El modelo considera $\gamma_{sh}=1$ cuando las variables correctoras no afectan al valor, es decir cuenta con un valor de 1, para ello las variables deben de ser; 40%HR, curado húmedo de 7 días, $V/S = 38\text{mm}$, contenido de cemento=410 kg/m^3 , 50% de árido fino y 6,25% de aire.

4.4.4. EUROCODIGO 2

El Eurocódigo 2 EN 1992-1-1:2004(EC-2) pretende dar lugar a normativas nacionales en Europa.

El modelo de retracción del EC-2 es el primero que plantea la separación de retracción por secado y de la autógena. Posteriormente, la EHE-08 y el CM-2010 mantienen este criterio y casi la totalidad de la estructura y nomenclaturas del modelo del EC-2. Se le considerará un coeficiente de variación del 30% para la retracción calculada con este modelo.

Los parámetros necesarios para este modelo son:

- La edad del hormigón al comienzo de la retracción, t_s .
- Edad del hormigón en el momento de evaluación, t .
- Humedad relativa, en %, HR.
- Resistencia media a compresión del hormigón a la edad de 28 días, MPa, f_{cm} .
- Espesor medio, mm, e .
- Tipo de cemento

La retracción, tanto autógena (ϵ_{as}), la de secado (ϵ_{cd}) como la total (ϵ_{cs}), se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cas} + \epsilon_{cds}$$

$$\epsilon_{ca\infty}(t) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$

$$\epsilon_{cd}(t, t_s) = \epsilon_{cd,0} \cdot \beta_{ds}(t - t_s) \cdot K_h$$

$$\epsilon_{cd\infty}(t) = \epsilon_{cd,0} \cdot K_h$$

$$\epsilon_{ca}(t) = \epsilon_{ca\infty} \cdot \beta_{as}(t)$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85[(220 + 110\alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm} / f_{cm0})] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{HR}$$

$$\beta_{HR} = 1,55[1 - (HR/HR_0)^3]$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot t^{0,5})$$

$$\beta_{ds}(t-t_s) = [(t-t_s)/(t-t_s + 0,04 \cdot \sqrt{h^3})]$$

donde:

- $\varepsilon_{cd,0}$ es la retracción de secado básica.

- f_{cm} es la resistencia media a compresión del hormigón a 28 días, MPa.

- $f_{cm0} = 10$ MPa.

- α_{ds1} y α_{ds2} son coeficientes dependientes de la velocidad de hidratación del cemento (ver tabla 4.3).

Tabla 4.3. Valores de los α para los diferentes velocidades del cemento

Clase cemento	Lento (S)	Normal (N)	Rápido(R)
α_{ds1}	3	4	6
α_{ds2}	0,13	0,12	0,11

-HR es la humedad relativa del ambiente, en %.

- $HR_0 = 100\%$

-Kh es el coeficiente que depende de la geometría de la pieza (Tabla 3.3 del EN 1992-1-1:2004).

-t es la edad del hormigón en el momento del ensayo.

- t_s es la edad del hormigón tras el curado.

- h_0 es el tamaño efectivo de la sección en mm ($h = 2Ac/u$).

-Ac es el área de la sección.

-u es el perímetro de la parte expuesta al secado.

4.4.5. EHE -08

La instrucción EHE-08 propone la misma formulación propuesta por el EC-2 y vista en el apartado anterior.

4.4.6. Análisis de los modelos EHE-08, ACI, EC-2 y CM-2010

En este apartado se analizan los 4 modelos descritos en apartados anteriores. Como primera observación, se destacan dos planteamientos técnicos diferente. Por un lado el ACI-92 utiliza una retracción base de 780mm sobre la que le aplica unos coeficientes correctores (γ_{sh}) y la repercute en el tiempo según, principalmente, las siguientes dos expresiones:

$$(\varepsilon_{sh})_u = 780 \gamma_{sh} \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$$

$$(\varepsilon_{sh})_t = (t / (35+t)) \cdot (\varepsilon_{sh})_u$$

El coeficiente γ_{sh} se obtiene a través de valores obtenidos principalmente de la dosificación utilizada.

Por otro lado, la EHE-08, el EC-2 y el CM-2010 utilizan un planteamiento muy diferente. El dato principal a utilizar en estos modelos es la resistencia media a compresión del hormigón analizado. Indudablemente, diferencias en las resistencias a compresión de un hormigón están influidas por variación de la cantidad de cemento, cantidad de aire ocluido y cantidad de árido, que son los parámetros utilizados como correctores en el ACI-92, por lo que, de forma indirecta, los cuatro modelos analizados tiene fundamentos compatibles.

Los códigos EC-2, EHE-08 y CM-2010, por su similitud y por sus fechas de publicación, han ido validando los modelos predecesores, con

ligeras modificaciones. El EC-2, de 2004, pretendió establecer una norma común a cumplir en Europa. En 2008 se publica la EHE-08, haciendo suyo lo indicado por EC-2. En 2010 el CM-2010 establece un planteamiento idéntico al del EC-2, con pequeños ajustes numéricos.

A continuación se analiza, con más profundidad, la comparación entre los modelos utilizados.

a) Modelo de cálculo CM-2010 Y EC-2

Como argumento de lo indicado anteriormente, sobre la similitud del EC-2, EHE-2008 y CM-2010, destacar la gran similitud de las principales fórmulas de los modelos (tabla 4.4), siendo las mismas para el EC-2 y la EHE-2008.

Tabla 4.4. Similitud entre las expresiones indicadas por CM-2010, EC-2 y EHE-2008

CM-2010	EC-2 y EHE-2008
$\epsilon_{as}(t) = \epsilon_{cas0}(f_{cm}) \cdot \beta_{as}(t)$	$\epsilon_{ca}(t) = \epsilon_{ca\infty} \cdot \beta_{as}(t)$
$\epsilon_{cds0}(f_{cm}) = [(220 + 110\alpha_{ds1}) \exp(\alpha_{ds2} \cdot f_{cm})] \cdot 10^{-6}$	$\epsilon_{cd,0} = 0,85 [(220 + 110\alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm}/f_{cm0})] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{HR}$
$\beta_{HR} = -1,55 [1 - (HR/100)^3]$	$\beta_{HR} = 1,55 [1 - (HR/HR_0)^3]$ donde $HR_0 = 100$
$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot \sqrt{t})$	$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot t^{0,5})$

Con todo ello, en la tabla 4.5 se muestra un ejemplo de similitud entre los modelos. En este caso, para un hormigón con cemento tipo N, con un espesor medio de 50mm, HR 50% y a 28 días. Destacar de los datos mostrados la proporcionalidad de ambos modelos, un 14,7% mayor para todos los datos del EC-2⁸ a 28 días. Para profundizar en el análisis de ambos modelos, se realiza una similar comparación pero variando la edad y manteniendo el $f_{cm} = 50\text{MPa}$ del hormigón (tabla

⁸ El modelo propuesto por la EHE-2008 es idéntico que el propuesto por el EC-2, por lo que los resultados son iguales. En adelante, en las tablas y graficas de este capítulo cuando se indica EC-2 los resultados también son válidos para el modelo de la EHE-2008.

4.6). De la simulación planteada, se destaca la proporcionalidad en la retracción autógena para los modelos analizados, obteniendo un 18% mayor para todos los datos del CM-2010. En la retracción de secado, con el paso del tiempo, se obtiene variaciones en los valores de los modelos analizados considerándose similares a los 6 y 120 días. En la figura 4.27 se muestran las diferencias (o perfil de proporcionalidad) entre los modelos para ambas retracciones.

Tabla 4.5. Valores de la retracción de secado según EC-2 y CM-2010, para hormigones a 28 días con diferente f_{cm} , con cemento tipo N, con un espesor medio de 50mm y HR variable

HR %	fcm= 20 Mpa			fcm= 40 Mpa			fcm= 60 Mpa			fcm= 80 Mpa			fcm= 100 Mpa		
	EC-2 $\mu\text{m/m}$	CM-2010 $\mu\text{m/m}$	dif. %	EC-2 $\mu\text{m/m}$	CM-2010 $\mu\text{m/m}$	dif. %	EC-2 $\mu\text{m/m}$	CM-2010 $\mu\text{m/m}$	dif. %	EC-2 $\mu\text{m/m}$	CM-2010 $\mu\text{m/m}$	dif. %	EC-2 $\mu\text{m/m}$	CM-2010 $\mu\text{m/m}$	dif. %
10	454	396	14,7	357	311	14,7	281	245	14,7	221	193	14,7	174	152	14,7
30	442	386	14,7	348	303	14,7	274	239	14,7	215	188	14,7	169	148	14,7
50	398	347	14,7	313	273	14,7	246	215	14,7	194	169	14,7	152	133	14,7
70	299	260	14,7	235	205	14,7	185	161	14,7	145	127	14,7	114	100	14,7
90	123	107	14,7	97	84	14,7	76	66	14,7	60	52	14,7	47	41	14,7

Tabla 4.6. Valores de la retracción autógena y de secado según EC-2 y CM-2010, para hormigones con $f_{cm}=50\text{MPa}$, con cemento tipo N, con un espesor medio de 50mm y HR 50%, a diferentes edades.

Días	Retracción autógena			Retracción de secado		
	EC-2 $\mu\text{m/m}$	CM-2010 $\mu\text{m/m}$	dif. %	EC-2 $\mu\text{m/m}$	CM-2010 $\mu\text{m/m}$	dif. %
1	14,5	17,7	-18,0%	27,6	52,2	-47,2%
3	23,4	28,5	-18,0%	73,1	89,4	-18,3%
7	32,9	40,1	-18,0%	138,3	133,7	3,4%
30	53,2	64,9	-18,0%	283,8	248,2	14,3%
120	71,1	86,6	-18,0%	373,5	373,6	0,0%
1000	79,9	97,3	-18,0%	411,7	471,1	-12,6%
100000	80,0	97,5	-18,0%	417,5	491,0	-15,0%

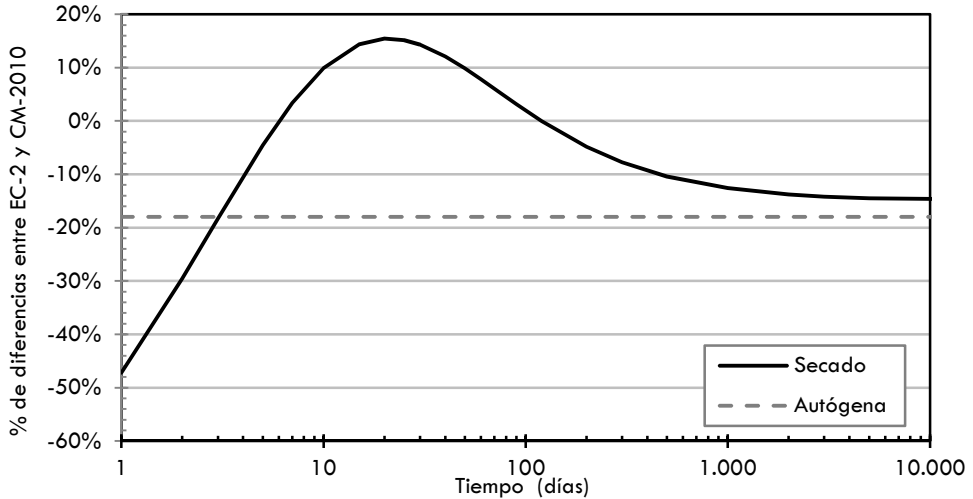


Figura 4.27. Evolución de las diferencias entre los modelos del EC-2 y CM-2010 para la retracción autógena y de secado

b) Modelo de cálculo de EHE-08, ACI, EC-2 y CM-2010

En la figura 4.28, y tabla 4.7 se muestran los resultados de la retracción total para un similar hormigón según los 4 modelos analizados. Para la EHE-08, EC-2 y CM-2010 se ha considerado un hormigón con $f_{cm}=50\text{MPa}$, con cemento tipo N, con un espesor medio de 50mm y HR 50%. Para el ACI-92 se adoptado, para los respectivos factores de corrección, 400kg/m^3 de cemento, 3% de aire ocluido y 37,50% de árido fino. Destacar de los resultados, y en línea con todo lo indicado anteriormente, que el CM-2010 con respecto la evolución de los datos del EHE-08 y EC-2 mantiene la forma del perfil de proporcionalidad mostrado en la figura 4.28. El ACI-92 mantiene una evolución diferente a los otros 3 modelos, caracterizándose por menores retracciones a edades tempranas e invirtiendo la tendencia a partir de los 30 días.

Tabla 4.7. Valores de retracción total, con el paso del tiempo de los cuatro modelos analizados, para un hormigón de características similares

Días	EC-2 y EHE-2008	CM-2010	ACI
7	171,1	173,8	111,1
30	337,0	313,1	307,6
90	428,9	432,7	479,8
1.000	491,6	568,4	643,9
3.000	495,6	581,8	658,7
10.0000	497,5	588,5	666,2

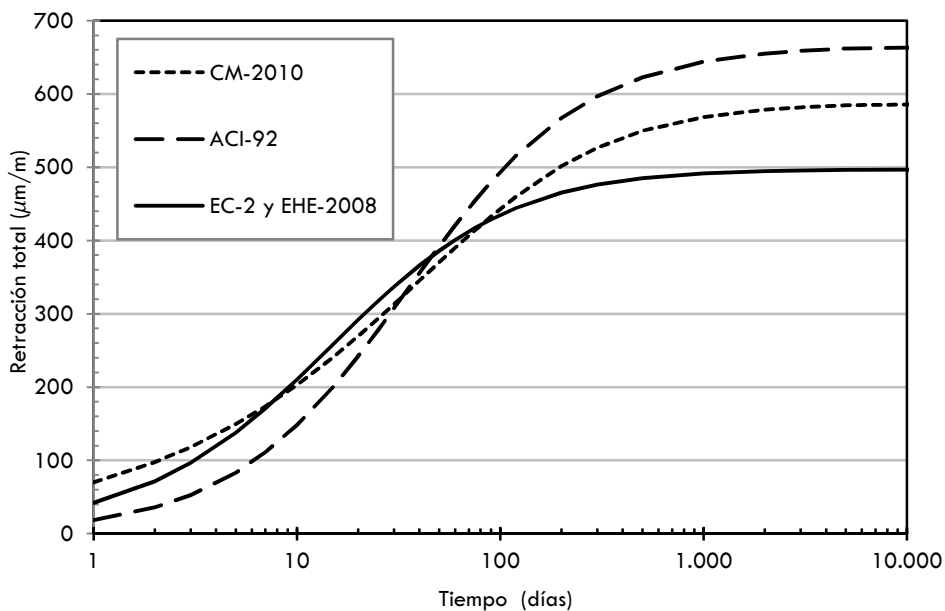


Figura 4.28. Evolución de la retracción total, con el paso del tiempo y según EHE-08, ACI-92, EC-2 y CM-2010, para un hormigón de características similares

Con respecto a la humedad ambiental, en la figura 4.29 se muestra cómo afecta en los 4 modelos analizados. Se destaca nuevamente la gran similitud entre EHE-08, EC-2 y CM-2010. El ACI-92 mantiene una tendencia lineal y diferente al resto, con un casi punto de tangencia en la HR=55%.

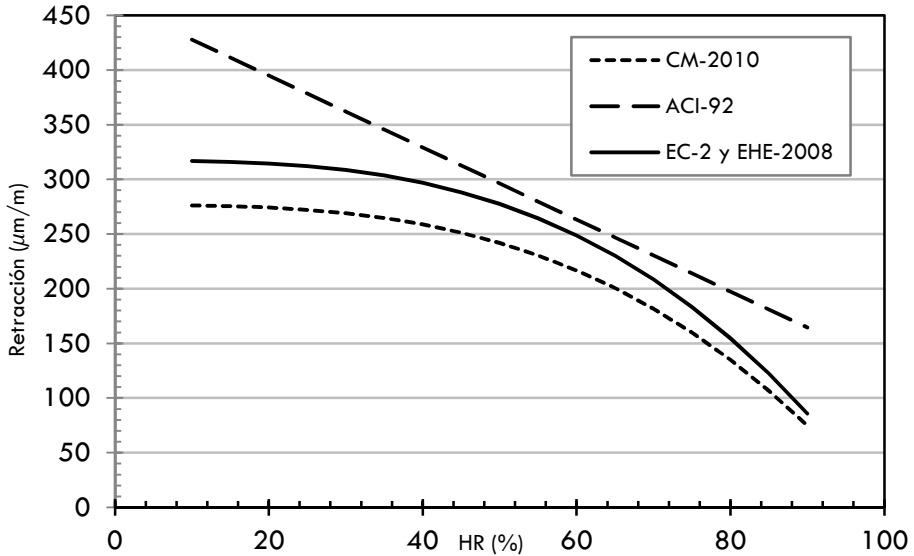


Figura 4.29. Evolución de la retracción total según la EHE-08, ACI-92, EC-2 y CM-2010, para diferentes HR

En la figura 4.30 y tabla 4.8 se muestran la proporcionalidad (diferencias) entre los resultados de retracción total obtenidos (por parejas). A edades muy cortas, las variaciones llegan a ser muy altas, hasta un 378% entre el CM 2010 y ACI-92. Con el paso del tiempo, las variaciones entre las parejas de los modelos analizados se reducen hasta un 12%(tabla 4.8).

Tabla 4.8. Valores de la proporcionalidad entre EHE-08, ACI-92, EC-2 y CM-2010(2 a 2), para la retracción total a diferentes edades

Días	CM 2010 – ACI-92	ACI-92 – EC-2 y EHE-2008	CM 2010- EC-2 y EHE-2008
1	378%	227%	166%
3	224%	183%	122%
7	156%	154%	102%
10	137%	142%	96%
30	102%	110%	93%
300	88%	80%	111%
3.000	88%	75%	117%
10.000	88%	75%	118%

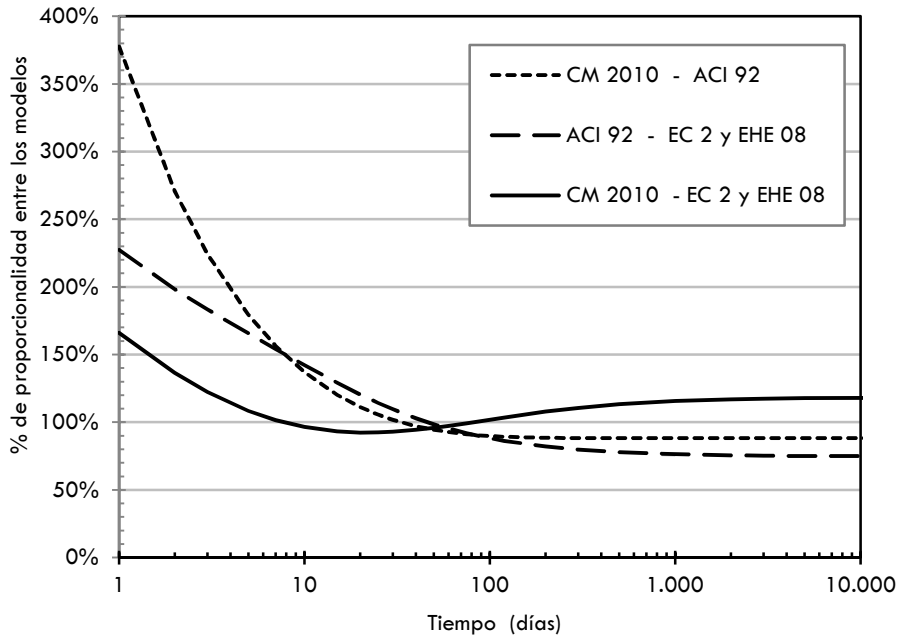


Figura 4.30. Evolución de la proporcionalidad entre EHE-08, ACI-92, EC-2 y CM-2010 (2 a 2), para la retracción total a diferentes edades

Capítulo 5. Fase experimental

5.1. INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se ha revisado los diferentes aspectos que inciden en la caracterización de los HAC y de la EGAH. Además, se ha profundizado en los procedimientos de dosificación, en los ensayos, tanto en estado fresco como endurecido y en la retracción del hormigón.

Con respecto a la dosificación del HAC, a pesar de los diversos métodos propuestos, no existe un consenso único en cuanto a la proporción de los materiales empleados debido a la influencia de la naturaleza y variabilidad de los mismos. Se ha optado por aplicar métodos validados en investigaciones anteriores por los miembros que han colaborado en la fase experimental.

Una vez adoptada la dosificación de referencia, se decide planificar la investigación principal que nos ocupa en este documento, que es la influencia de la escoria granulada de alto horno, considerada como árido reciclado siderúrgico, como sustitutivo del árido fino en las propiedades del HAC, tanto en estado fresco como en estado endurecido. Para ello, se han realizado 5 campañas experimentales en este trabajo de investigación. La primera de ellas, dirigida a analizar las propiedades de la EGAH desde diferentes ámbitos, como su reactividad, resistencia a la fragmentación o desgaste, deformabilidad, composición mineralógica, etc.

La segunda campaña experimental consiste en analizar diferentes propiedades en estado fresco de los HAC, con el estudio de la viscosidad,

tensión umbral de corte, diámetro final del ensayo de escurrimiento, velocidad de avance del fluido, etc. Además, se incluye en esta fase el estudio del acabado superficial de los hormigones fabricados, que aunque el estudio se realiza una vez desmoldadas las probetas, los resultados son dependientes principalmente de los parámetros en estado fresco indicados anteriormente. Se ha profundizado en el acabado superficial, con el fin de desarrollar una nueva metodología de ensayos que permitan en laboratorio cuantificarlo y correlacionarlas con los parámetros reológicos.

La tercera campaña experimental ha consistido en el estudio de las propiedades mecánicas: resistencia a compresión, resistencia a tracción y módulo de deformación de los HAC fabricados con sustituciones del árido fino por EGAH.

La cuarta campaña pretende estudiar y conocer la microestructura de los HAC fabricados, realizando ensayos de intrusión de mercurio, para cuantificar la cantidad de microporos, mesoporos y macroporos. Además de un estudio con microscopía electrónica de barrido que ayude a la comprensión de lo acontecido en la microestructura de las diferentes dosificaciones realizadas y sobre todo como afectan las sustituciones de árido de cantera por EGAH a la interfaz árido-pasta.

La quinta y última campaña experimental se centra en el estudio de la retracción acontecida en las 7 dosificaciones planteadas (0, 10, 20, 30, 40, 50 y 60% de EGAH como árido fino). Para esta campaña, quizás la más compleja en analizar los resultados, es prácticamente necesario la realización de las anteriores, dado que parámetros como relación agua/cemento, cantidad de cemento, volumen de pasta, granulometría de los áridos, condiciones de curado, resistencia a la compresión, resistencia a

la tracción, módulo de deformación, porosidad etc; influyen directamente en la retracción de los hormigones y sobre todo de los autocompactantes por sus menor diámetro máximo del árido y mayor cantidad de pasta en relación a la cantidad de árido grueso. En el estudio de la retracción, se analiza la retracción autógena y total de cada dosificación durante 365 días, la retracción inicial en las primeras 40 horas, así como, la evolución de la temperatura de fraguado, determinación de principio y final de fraguado de las 7 dosificaciones, pérdida de peso de los HAC por la evaporación del agua durante los primeros 365 días.

Se ha fabricado más de 2.000 litros de hormigón distribuidos en 42 amasadas, para un total de 271 probetas con una relación agua/material cementante¹ de 0,55². El tipo de cemento de las mezclas fue un CEM II /B-M (S-L) 42,5R y el aditivo empleado un superplastificante de policarboxilato (Viscocrete 3425). Los áridos fueron de piedra caliza de machaqueo, una grava 4/12 mm, una arena gruesa 0/4 mm y otra fina 0/2 mm, con un contenido de finos muy alto, del 1,0 %, 12,0 % y 17,1 %, respectivamente. Se utilizó adiciones de cenizas volantes para evitar la segregación y exudación en las mezclas de HAC y de finos calizos para compensar la carencia de finos de las EGAH. Además, se han realizado numerosas amasadas de morteros y pastas para los diferentes ensayos de caracterización realizados. A continuación, en la tabla 5.1 se muestran los ensayos realizados en este trabajo de investigación.

¹El material cementante se compone de cemento y cenizas volante.

²En base a trabajos previos, alguno de ellos incluidos en el anexo 3, se adoptó una relación a/c de 0,55 para garantizar, junto al SP añadido, de una adecuada reología de los HAC con diferentes sustituciones de EGAH, además de unas propiedades mecánicas aceptables para todos ellos.

Tabla 5.1. Ensayos realizados en el trabajo de investigación

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	Composición de la EGAH y CV
	Características del cemento
	Resistencia a la fragmentación (Micro-Deval)
	Densidad aparente y absorción de la EGAH
ENSAYOS EN ESTADO FRESCO	Ensayos reológicos
	Homogeneidad de los HAC. Estudio del índice VSI
	Acabado superficial. Método propuesto "ICB"
ESTRUCTURA POROSA	Porosimetría con intrusión de mercurio
REACTIVIDAD DE LOS ÁRIDOS	Microscopia electrónica de barrido
	Microscopia de fuerza atómica
	Ensayos de nanoindentación (Quantitative Nano-mechanical)
	Morteros para estudiar reactividad de la EGAH molida a 7, 28, 90 y 365 días
ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO	Ensayo de resistencia a compresión en probeta cilíndrica a 7, 28, 90 y 365 días
	Ensayo de resistencia a tracción indirecta a 28 y 90 días
	Ensayo de resistencia a flexotracción a 28 y 90 días
	Módulo de deformación de la pasta a 28 días
	Módulo de deformación de los HAC a 28 días
RETRACCIÓN DE LOS HAC	Determinación de inicio y final de fraguado
	Ensayo de pérdida de peso en probetas
	Ensayo de retracción a edad temprana
	Temperaturas del HAC durante el fraguado
	Retracción autógena, de secado y total

5.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

5.2.1. Introducción

El hormigón es un material muy heterogéneo que cuenta con numerosos materiales y compuestos en su dosificación, reaccionando algunos de ellos entre sí. Además, el tamaño de cada uno de ellos afecta a las propiedades mecánicas finales, pudiendo afectar incluso a la velocidad de hidratación del cemento y crear heterogeneidad en los resultados a obtener. Por ello, en los ensayos de caracterización de las EGAH se utilizan granulometrías muy acotadas para disminuir las variables que intervienen y facilitar la interpretación de los resultados obtenidos.

Dada la sensibilidad de los HAC en estado fresco y el desconocimiento de cómo afecta la EGAH a los mismos, se realiza un estudio previo de trabajabilidad y propiedades mecánicas de HAC con EGAH como árido fino (ver estudio completo en anexo 1). Se obtiene que la EGAH es un material, en principio, aceptable para utilizarse como árido fino en HAC.

5.2.2. Caracterización óptica de las EGAH (x20)

La escoria granulada está formada por pequeñas partículas alveolares con aristas cortantes. Los granos de la escoria tienen forma angulosa y presentan esfericidad media. La fracción superior a 5 mm se caracteriza por la presencia de elementos inertes de color oscuro y gran dureza, que no están vitrificados sino cristalizados (CEDEX, 2011).

La figura 5.1 muestra dos micrografías de unas muestras de escoria granulada de alto horno. Arriba, en las partículas pequeñas y/o fragmentos de la EGAH se puede observar fácilmente su estado traslucido³ por efectos de su vitrificación. Abajo, en las partículas de mayor tamaño (1-4mm), por su mayor espesor, su aspecto es opaco.



Figura 5.1. Micrografías de unas muestras de escoria granulada de alto horno

³Una escoria recién salida del alto horno es traslucida por su vitrificación (Duisburg-Rheinhausen, 2006). Con el paso del tiempo y en contacto con humedad van reaccionando lentamente algunos compuestos como CaO y MgO, produciéndose un oscurecimiento que deja prácticamente opacas las partículas, denominándose a estas escorias como envejecidas. El envejecimiento puede ser realizado dejando los acopios de escoria a la intemperie al menos durante un año. Para acelerar el proceso se puede regar la escoria periódicamente.

5.2.3. Composición de la EGAH y CV

Las escorias utilizadas y analizadas en este trabajo (tabla 5.2) presentan un índice de basicidad CaO/SiO_2 igual a 1,22 y, por lo tanto, son potencialmente hidráulicas (Puertas, 1993). Esta reactividad de la escoria también se aprecia en el ensayo de difracción de rayos X^4 (figura 5.3) ya que el difractograma obtenido es característico de una escoria amorfa, donde casi no hay picos de minerales cristalinos, aunque si presenta un montículo en los 30 grados (2θ). Este ángulo corresponde al pico principal de melilite, que es el principal mineral de la escoria cristalizada e indicativo de los compuestos amorfos que lo forman, originados por un rápido enfriamiento de la escoria a su salida del alto horno. Los pequeños picos que se detectan son de calcita CaCO_3 (C) y de mullita (M) ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$).

Tabla 5.2. Composición de la escoria granulada de alto horno

Sulfatos (SO_3)	0,48	%	UNE-EN 196-2:2006
Cloruros	0,022	%	UNE-EN 196-2:2006
Óxido de Calcio (CaO)	41,9	%	UNE-EN 196-2:2006
Óxido de Magnesio (MgO)	7,18	%	UNE-EN 196-2:2006
Óxido de silíceo (SiO_2)	34,41	%	UNE-EN 196-2:2006
$(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$	1,43		UNE-EN 196-2:2006
$\text{CaO}+\text{MgO}+\text{SiO}_2$	83,49		UNE-EN 196-2:2006

En la figura 5.2 y 5.4 se muestra los resultados del ensayo de microscopía electrónica de barrido realizado a la EGAH y cenizas volantes, respectivamente, cedidas por Holcim.

⁴ Las muestras fueron secadas a 110°C y pulverizadas a tamaños de partícula por debajo de 50µm. La identificación de fases minerales presentes se ha realizado por medio de la base de datos del JCPDS (Joint Comité on Powder Diffraction Standards).

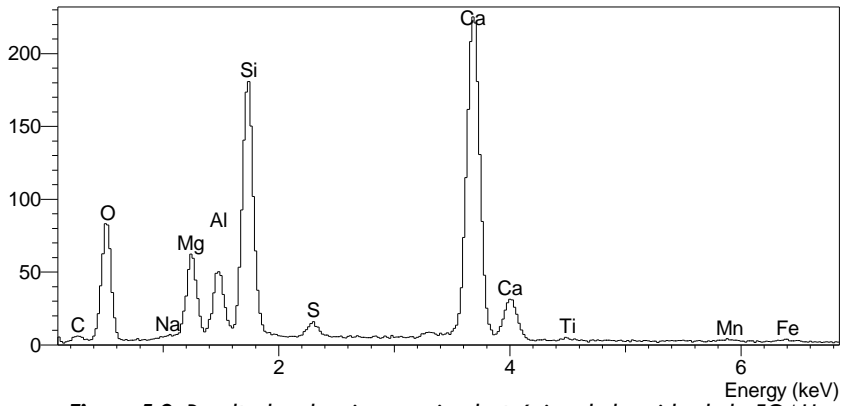


Figura 5.2. Resultados de microscopía electrónica de barrido de la EGAH

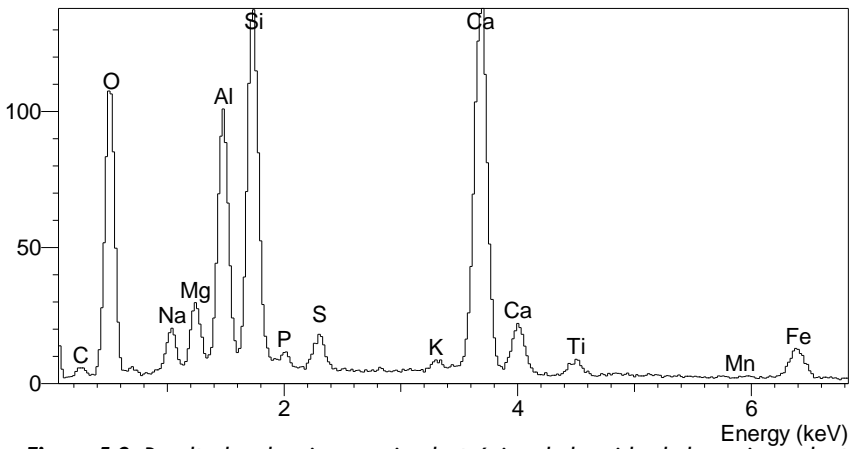


Figura 5.3. Resultados de microscopía electrónica de barrido de la ceniza volante

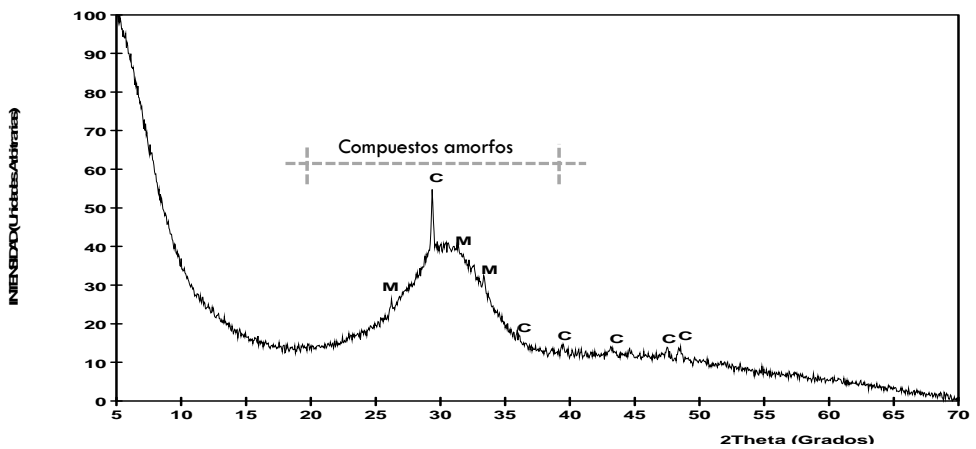


Figura 5.4. Difractograma de Rayos X de la EGAH

5.2.4. Módulo de deformación de los áridos

Para conocer la deformabilidad de las EGAH y de los áridos finos calizos se fabricaron varias probetas cúbicas para su ensayo. Se adoptó una granulometría única compuesta por áridos que pasan por el tamiz de 2mm y son retenidos por el tamiz de 1mm (figura 5.6), remarcado esta fracción de los áridos en la figura 5.5.

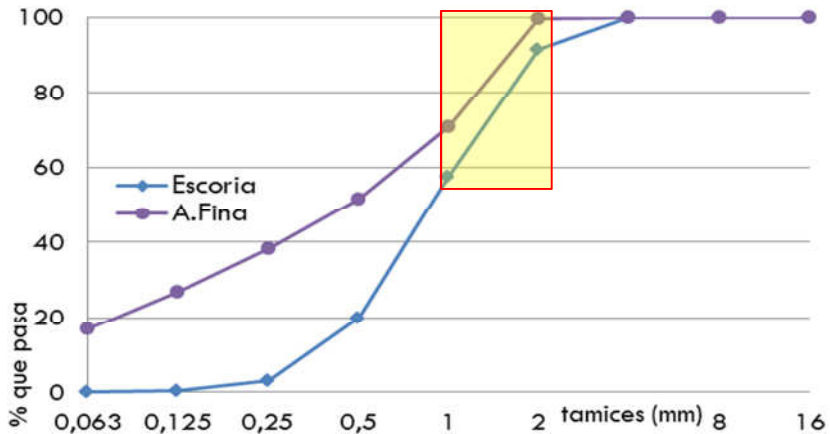


Figura 5.5. Granulometría seleccionada de escoria y arena fina para morteros



Figura 5.6. Material seleccionado entre 1 y 2 mm. Izq. árido calizo, derecha EGAH

Se han ensayado tres probetas con cada tipo de árido: EGAH y caliza (figura 5.7). Sobre cada probeta se instaló un sensor de deformación y se realizó el ensayo para obtener el módulo de deformación estático en compresión E_c , designado por la EHE como módulo secante.



Figura 5.7. Diferentes probetas para módulo de deformación de los áridos

Para el cálculo del módulo de deformación estático en compresión E_c , se utiliza la expresión:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = (\text{MPa}) \quad [5.1]$$

dónde:

$\Delta\sigma$ incremento de tensión.

$\Delta\varepsilon$ incremento deformación.

Ambos valores, para la EGAH y para la caliza machacada, se calculan en el tramo de comportamiento aproximadamente elástico del mortero, entre las tensiones de 0,5 MPa y el 40% de la tensión media de rotura (fig. 5.8).

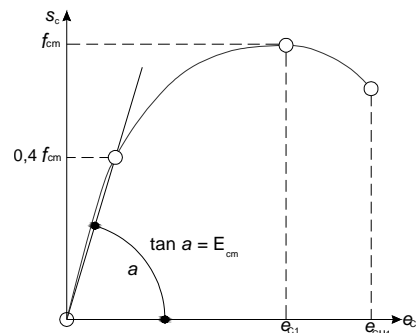


Figura 5.8. Relación tensión-deformación en el hormigón según EHE-08 (Parra et al., 2013)

En la figura 5.9 se muestran las probetas a ensayar. A la izquierda las 3 de arena caliza y a la derecha las 3 de EGAH. En la figura 5.10 se muestra el sensor de deformación instalado sobre los platos metálicas de la prensa hidráulica y conectado con el software informático que controla dicha prensa.



Figura 5.9. Diferentes probetas para módulo de deformación de los áridos

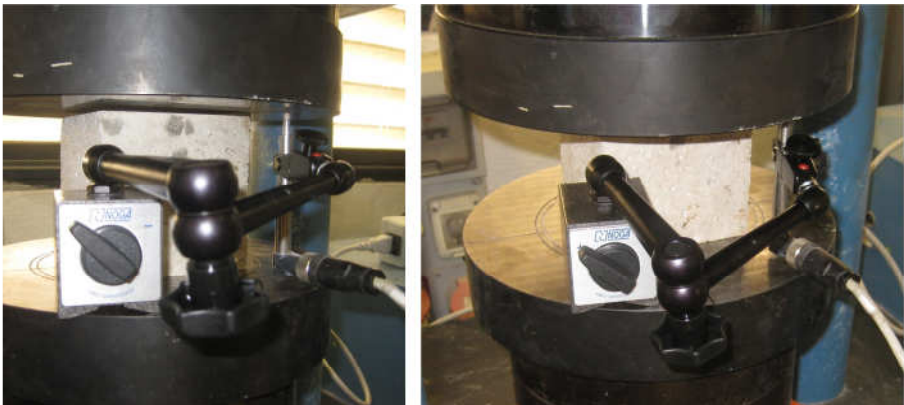


Figura 5.10. Montaje de sensor de deformación, para ensayo en probetas cúbicas

5.2.5. Estudio con microscopio electrónica de barrido.

La microscopía electrónica de barrido permite obtener imágenes de gran resolución. Se utiliza un haz de electrones y con electroimanes se recibe información de las trayectorias y rebotes de éstos. Para ello, las muestras se hacen conductoras metalizando su superficie. En este caso se utilizó polvo de oro en unas muestras y polvo de carbono en otras (figura 5.11).

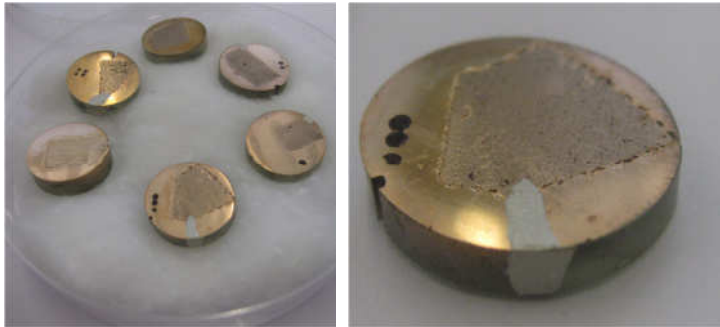


Figura 5.11. Muestras embutidas en resinas y metalizadas con oro para su análisis

Las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido (figura 5.12) se forman al incidir un haz de electrones sobre la muestra. Ésta emite una serie de señales que permiten ser transformadas en una imagen y/o proporcionan información acerca de su composición química. Con esta técnica se permite obtener una gran profundidad de campo (capacidad de tener enfocados a la vez dos puntos que se encuentran a



Figura 5.12. Equipo de microscopía electrónica de barrido (Servicio de microscopía electrónica de la UPV)

distinta profundidad). Se puede realizar un estudio con los electrones secundarios, lo que permite obtener una imagen de apariencia tridimensional o con los electrones retrodispersados que permite revelar la composición de la muestra por diferencias de contraste.

Con el fin de estudiar con esta técnica la microestructura y sobre todo la interfaz árido-pasta que se genera por el uso de la EGAH como árido se fabricaron unos morteros de dosificación 1:3:0,5 (cemento: arena: agua). Se realizaron 3 amasadas diferentes, variando el tipo de árido utilizado (EGAH, arena caliza y arena sílicea) y con idéntica granulometría acotada para facilitar la interpretación y comprensión de los resultados obtenidos. Se utilizó únicamente los áridos que pasan por el tamiz de 1mm y son retenidos por el tamiz de $500\mu\text{m}$, remarcado en la figura 5.13, izquierda. A la derecha se muestra parte del material seleccionado (escoria centro y árido calizo a la derecha). La arena caliza y la escoria utilizada son las mismas que las utilizadas para la fabricación de los HAC. Para la amasada con árido síliceo se utilizó arena normalizada CEN según el artículo 5.1.3 de la norma UNE-EN 196-1. El cemento utilizado, para todas ellas, ha sido CEM I.

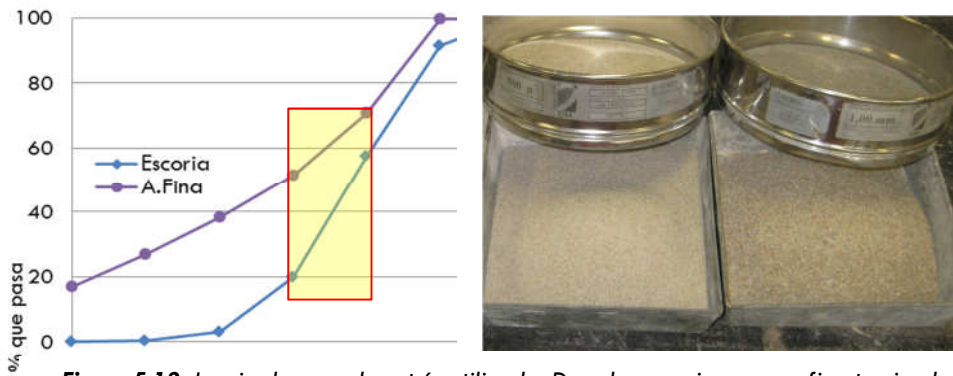


Figura 5.13. Izquierda granulometría utilizada. Derecha escoria y arena fina tamizada

Tras el amasado de cada mortero se rellenaron 12 moldes por amasada y se compactaron de forma manual. Se introdujeron todos ellos en la cámara de curado y se rellenaron de agua para un curado sumergido y evitar la carbonatación. En la figura 5.14 se observan las diferentes muestras de mortero realizadas para cada tipo de árido, EGAH (1), arena caliza (2) y arena silíceo (3). Todas ellas curadas en cámara a temperatura (20°C) y humedad controlada (100%) (4).

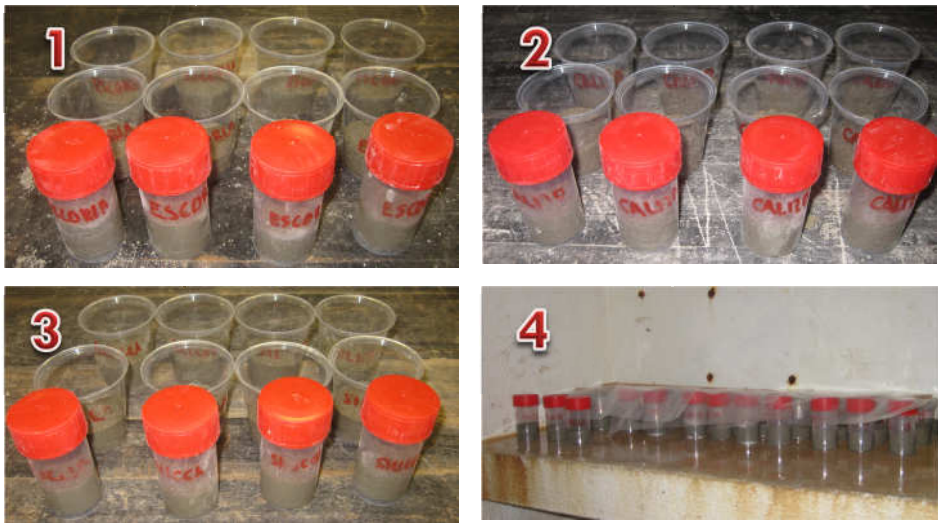


Figura 5.14. Morteros con áridos de escoria, caliza y silíceo

En una segunda fase de este ensayo, y para mejorar la compacidad de los anteriores morteros descrito, se realizaron nuevos morteros con compactación mecánica. Concluido el amasado de éstos se procedió al llenado de moldes estándar de 4x4x16cm. Este proceso se realizó en dos capas (figura 5.15). Primero una capa uniforme que se compacto con 60 golpes en la compactadora y a continuación se vertió la segunda capa de mortero que también se compactó con 60 golpes.

Una vez fabricadas las probetas, se conservaron en el interior de cámara de curado, a temperatura de $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $\geq 95\%$. A las 48 horas de su fabricación se desmoldaron e introdujeron en un envase con una mínima cantidad de agua, permitiendo el curado sumergido en agua pero minimizando la posible lixiviación de los hidróxidos de calcio de cada probeta. Para ello, como se ven en la figura 5.15 (derecha), se fabricaron envases con láminas de polietileno con una mínima holgura sobre las probetas de mortero, es decir, prácticamente de dimensiones $4\times 4\times 16\text{cm}$ y protegidas con cinta de embalar. Una vez rellenados dichos envases con agua se introdujeron en la cámara de curado. Las probetas se sacaron de la cámara de curado únicamente durante el período de los ensayos (a los 8 meses). Para ello se fraccionaron las probetas en porciones menores, destinando cada una a diferentes edades de ensayo.

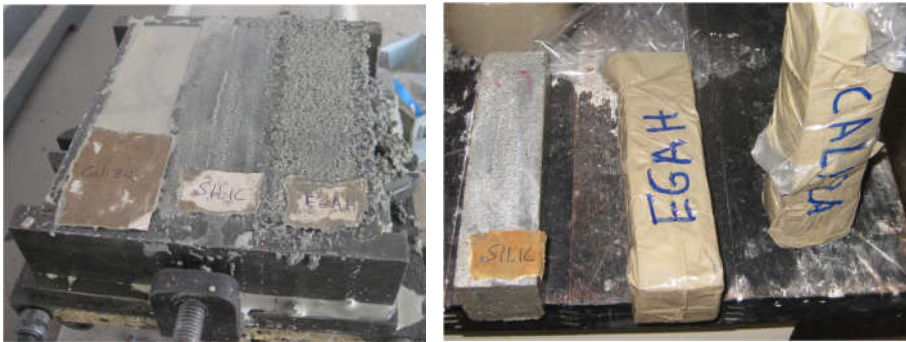


Figura 5.15. Izquierda, fabricación de los 3 morteros. Derecha, envasado de los mismos

5.2.6. Estudio con microscopio de fuerza atómica

El microscopio de fuerza atómica (AFM, Atomic Force Microscope) es un instrumento mecano-óptico capaz de detectar fuerzas del orden de nanonewtons y capaz de registrar la topografía (nanométrica) de la muestra mediante una sonda o punta afilada de forma piramidal o cónica (ver imagen 5.16). La sonda, de un par de micras de largo y menos de 100 Å de diámetro, va acoplada a un listón o palanca microscópica (cantilever) muy flexible, de sólo 200 µm.

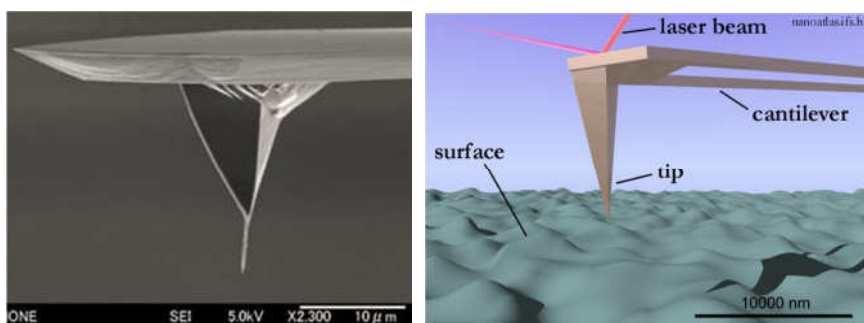


Figura 5.16. Detalle y esquema de la sonda de rastreo del microscopio de fuerza atómica. <http://debiogeo.blogspot.com.es/2008/11/microscopios-de-fuerza-atmica-para-ver.html>

La fuerza entre la punta de la sonda y la superficie de la muestra hace que la palanca se doble o flexione. Un detector mide esta flexión conforme la punta barre la superficie de la muestra y con ello se obtiene un mapa topográfico (ver esquema de la figura 5.17). Con la información obtenida y el software especializado se obtiene una imagen tridimensional de la zona inspeccionada.

El microscopio permite trabajar en modo de contacto continuo o intermitente ("tapping"). El primero permite obtener información tridimensional de la muestra y efectuar medidas de modulación de fuerzas (propiedades elásticas). El modo de contacto intermitente se

diferencia del anterior por no estar en contacto continuo con la superficie de la muestra reduciendo la interacción entre la punta y la muestra. La fuerza más común que contribuye a la flexión del cantilever es la de Van der Waals. Con esta tecnología se han realizado ensayos de nanoindentación (Quantitative Nano-mechanical), analizando el módulo de deformación de la interfaz árido-pasta y escoria-pasta de varias muestras de mortero.

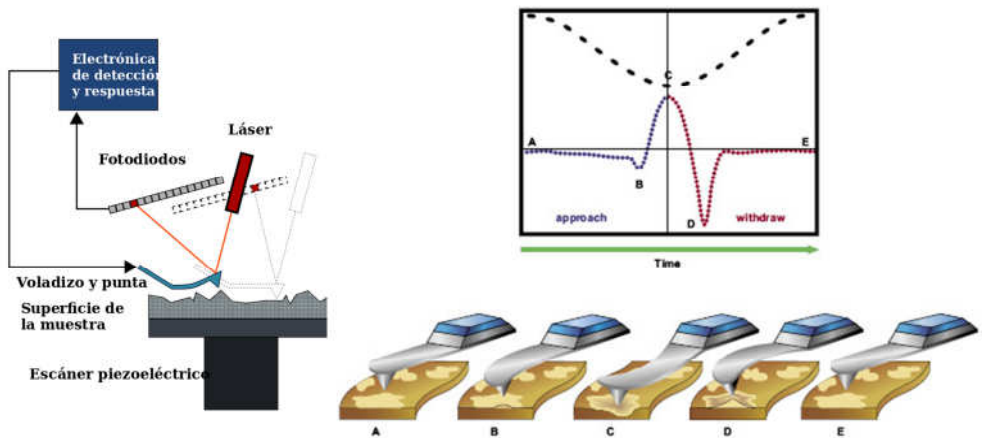


Figura 5.17. Izquierda y derecha esquema de funcionamiento del QNM.
<http://blog.brukerafmprobes.com>

Dada la precisión del instrumental utilizado se utilizó una mayor finura de los áridos. Se realizaron pastas con cemento tipo CEM I. La granulometría de los áridos estaba comprendida entre 0,063 y 0,085 μm . Tras el molido y tamizado de la EGAH y arena caliza (utilizada como referencia), se realizaron 9 amasadas, con diferentes sustituciones del cemento por cantidades de los micropartículas de EGAH y caliza. Todas ellas de tamaño similar a los granos del cemento. Como dosificación de referencia, para todas las pastas elaboradas, se adoptó 1:0,5

(cemento:agua). Se realizó una amasada con el 100% de cemento (sin sustituciones) y en otras cuatro se sustituyó respectivamente un 10, 20, 30 y 60% del cemento por las micropartículas de EGAH. Las restantes 4 amasadas se realizaron con las mismas sustituciones pero utilizando micropartículas de árido calizo. Con cada una de las pastas se realizó una torta de 4mm de grosor y se conservó en el interior de la cámara de curado a temperatura de $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ y sumergida en agua hasta la realización de los ensayos.

Para obtener una finura entre $0,063$ y $0,085 \mu\text{m}$, tras el molido se tamiza previamente a $125 \mu\text{m}$ para eliminar parte del material sobrante que ralentizaría la operación por la delicadeza de la operación con los tamices $0,063$ y $0,085 \mu\text{m}$ que precisan de agua para descartar el material por debajo de $0,063 \mu\text{m}$. En la figura 5.18 (izquierda) se remarca la fracción granulometría utilizada y a la derecha se muestra EGAH retenida en el tamiz de $0,063 \mu\text{m}$.

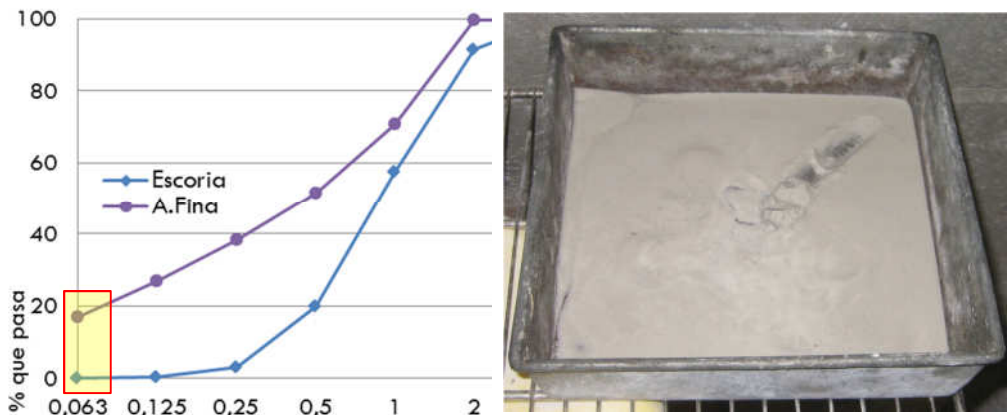


Figura 5.18. Granulometría seleccionada izquierda. Derecha escoria retenida en $0,063 \mu\text{m}$

5.2.7. Estudio de la reactividad de la EGAH molida

Para analizar la reactividad de la EGAH molida, se fabricaron unas probetas de mortero. El cemento utilizado ha sido un Portland Tipo I y la arena sílicea utilizada era normalizada, CEN según el artículo 5.1.3 de la norma UNE-EN 196-1. Se adopta por m^3 de mortero las siguientes cantidades de los 3 tipos de granulometrías utilizadas: 526,5kg de árido grueso, 189,0 de árido medio y 634,5 de árido fino (figura 5.19).



Figura 5.19. Arriba, pesada de los 3 áridos síliceos. Abajo, totalidad de elementos

Se realizaron 3 probetas de 4x4x16 cm para cada dosificación (tabla 5.3 y figura 5.20), para ensayarlas a compresión a diferentes edades, 2, 7, 28, 90 y 365 días. Estos ensayos tienen el objeto de ver la evolución de la reactividad de las escorias y la participación de éstas en la hidratación del mortero y en la resistencia final. Como dosificación de referencia para los morteros a realizar se adopta 1:3:0,5 (cemento:arena:agua), manteniéndola en todas las amasadas y sustituyendo únicamente el 50% del cemento por escoria molida o por filler calizo para obtener un límite inferior de resistencia. Es decir, se fabricaron 4 morteros distintos: uno de referencia sin escoria (M-1), otro en el que se sustituyó la mitad del cemento por filler calizo (M-3), otro en el que se sustituyó la mitad del cemento por escoria molida de granulometría similar a la del filler (M-4) y finalmente otro sólo con la mitad de cemento, sin añadir ni filler calizo ni escoria (M-2). Con los resultados de los 4 morteros se cuantifica la contribución de la escoria en la resistencia del mortero, pudiendo evaluar de forma separada el efecto filler y la hidratación de la EGAH.

Tabla 5.3. Dosificación de los morteros realizados

(Kg/m ³)	Relación dosificación	M1-100% Cemento	M2-50% Cemento	M3-50% Filler calizo	M4-50% EGAH
Agua	1	225	225	225	225
Cemento	2	450	225	225	225
EGAH		0	0	0	225
Filler calizo		0	0	225	0
Árido grueso	6	526,5	526,5	526,5	526,5
Árido medio		189	189	189	189
Árido fino		634,5	634,5	634,5	634,5

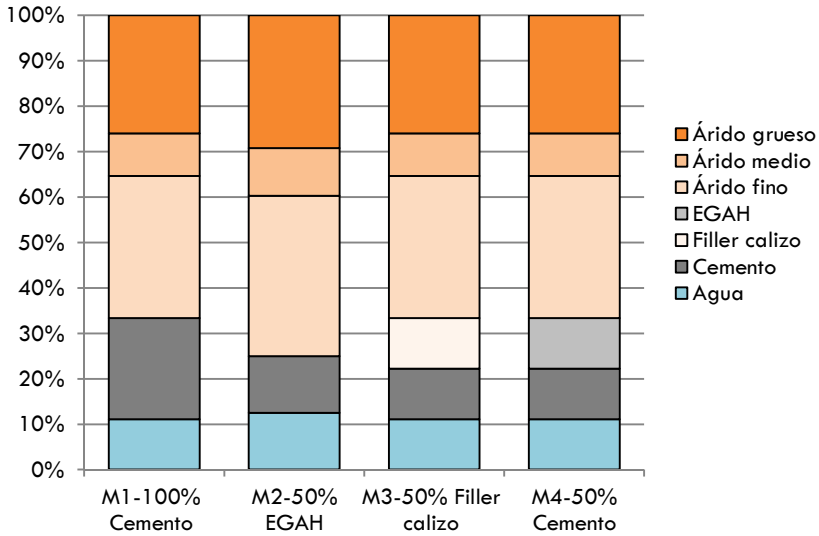


Figura 5.20. Histograma de dosificación de los morteros realizados

Tras el pesaje y amasado de cada mortero se vierte el material en 2 tongadas en moldes prismáticos, compactando la mezcla con 60 golpes (en la mesa de compactación) en cada tongada (figura 5.21).



Figura 5.21. Amasado del mortero y relleno del molde por tongadas

5.2.8. Resistencia a la fragmentación de los áridos (Micro-Deval)

El coeficiente de friabilidad o a la fragmentación de la EGAH y de los tipos de áridos calizos utilizados en la fase experimental, de fracciones granulométricas 0/2 y 0/4 mm, se determinó conforme a la norma UNE 83-115-89. El ensayo mide la fragmentación por abrasión o choque (fricción) de las partículas de los diferentes áridos en un tambor o cilindro en rotación y en unas condiciones dadas, con la ayuda de una carga de bolas de acero y en presencia de agua.

El desgaste se indica por medio del coeficiente Micro-Deval, que corresponde al porcentaje de la muestra original fragmentada en partículas inferiores a 0,05 mm producidas durante el ensayo. El objetivo de este ensayo es la determinación de un coeficiente de resistencia mecánica del árido, mediante la pérdida en peso de la muestra y producido después de un ciclo de desgaste-fragmentación.

La máquina de Micro-Deval consiste en tambores de acero inoxidable, de 200 mm de diámetro y aproximadamente 154 mm de longitud útil. Los tambores se colocan en dos soportes que giran según un eje horizontal a una velocidad de 100 ± 5 rpm (figura 5.22, abajo).

La escoria granulada de alto horno y los áridos calizos (2 kg de cada muestra) previamente fueron tamizados por vía húmeda a través de los tamices 0,1 y 2 mm (ver figura 5.23). Como indica la norma, las partículas finas de la arena inferiores a 0,1 mm no fueron estudiadas.



Figura 5.22. Arriba muestras a estudiar arriba (izquierda EGAH y derecha arena caliza), abajo dispositivo para coeficiente de Micro-Deval

Posteriormente se secó la muestra tamizada (entre los tamices 0,1 y 2 mm) en estufa a 105°C, hasta peso constante. Se homogenizó y extrajo finalmente una cantidad de 500 g de cada muestra y se introdujo en el tambor del dispositivo.

El material de relleno abrasivo consistió en bolas de acero de diferentes diámetros: 9 bolas de 30 mm de diámetro cuyo peso fue de 975 g, 21 bolas de 18 mm de diámetro cuyo peso fue de 490 g, y se completó su peso total de 2.500 ± 4 g con bolas de 10 mm de diámetro. Finalmente se relleno el cilindro con 2.500 g de agua (figura 5.23).



Figura 5.23. Equipamiento para la determinación del coeficiente de Micro-Deval. Material abrasivo a la izquierda, derecha llenado de agua con los áridos

Se dieron 1.500 vueltas del material en el dispositivo y se detuvo, procediendo a descargar con la carga abrasiva sobre un recipiente. Se tuvo especial cuidado para no perder nada de la muestra que pudiera variar el resultado final (figura 5.24).



Figura 5.24. Tambor del dispositivo y retirada de la muestra tras 1.500 vueltas

Se tamizó en seco la muestra tras el ensayo. Se pesó, con precisión de un gramo, lo retenido sobre el tamiz de 0,05mm. El peso de las partículas inferiores a 0,05mm producidas durante el ensayo a partir de los 500 g iniciales es igual a: $m = 500 - m'$, siendo m' lo retenido sobre el tamiz. Por tanto, el coeficiente de friabilidad (FA) se calcula con la expresión 5.2.

$$FA = \frac{500 - m'}{500} \text{ (redondeado a la unidad)} \quad [5.2]$$

Por lo que respecta a los resultados obtenidos, la escoria presenta un coeficiente de Micro-Deval mucho menor que el de los áridos calizos y, por lo tanto, su resistencia a la abrasión y su resistencia mecánica es mayor (Fowler, 2002). Los resultados se recogen en la tabla 5.4. La abrasión o desgaste superficial está influida principalmente por la textura, tamaño de grano y la dureza de los minerales que la componen (Martínez, 2008).

Tabla 5.4. Valores de la resistencia al desgaste-coeficiente de Micro-Deval

Tipo de árido	m' (g)	m (g)	FA
EGAH	430,70	69,3	14
Árido calizo grueso Granulometría 0/4 mm	285,6	214,4	43
Árido calizo fino Granulometría 0/2 mm	285,5	214,5	43

5.2.9. Densidad aparente y absorción de los áridos

La absorción de humedad y la densidad de la escoria se determinó según la norma UNE 1097-6:2001. Una vez conseguida la desecación de la muestra, que permite el desmoronamiento del tronco de cono formado por la escoria al levantar el molde metálico de la figura 5.25, se procede a determinar su valor de humedad. El cono se llena en 2 tongadas y se compacta con un pisón, con 30 toques en cada tongada. Tras este proceso, repetido cada vez con menos humedad, se levanta y se observa el desmoronamiento (figura 5.25 (derecha), remarcando el cilindro sin desmoronarse). Se concluye el proceso cuando el desmoronamiento es total.



Figura 5.25. Escoria granulada durante la realización del ensayo de absorción

A continuación se mezcla homogéneamente la muestra. Para ello se procede al cuarteo de la misma (figura 5.26).



Figura 5.26. Dispositivo de cuarteo

La determinación de la densidad de la escoria se realizó con el matraz de Le Chatelier. El método consiste en colocar una muestra de escoria de alto horno seca, de peso conocido, en el interior del matraz, previamente lleno con líquido (figura 5.27). A continuación se realizan diferentes pesadas según los siguientes pasos:

1. Se llena el matraz de Le Chatelier con agua hasta la marca de referencia y se pesa (Pic+liq)
2. Se cogen aproximadamente 500 gr de escoria (mat).
3. Se introduce la EGAH pesada al matraz con ayuda de un embudo y un pincel se retira el agua por encima de la marca de referencia y se pesa todo (Pic+liq+mat).



Figura 5.27. Determinación de la densidad de las escorias

La densidad de la EGAH se obtiene calculando el volumen de agua que desaloja (por encima de la marca de referencia) la muestra de EGAH introducida en el matraz. El volumen de agua desalojada se obtiene con la expresión 5.3.

$$V=(\text{Pic}+\text{liq})+\text{mat}- (\text{Pic}+\text{liq}+\text{mat}) \quad [5.3]$$

Una vez conocido el volumen de la muestra de EGAH, la densidad se obtiene directamente. El ensayo se realizó en 3 muestras de EGAH, resultando una densidad media de $2,45 \text{ g/cm}^3$ (tabla 5.5), la cual se encuentra dentro del intervalo esperado de escorias con propiedades puzolánicas consultadas en la bibliografía (Entre $2,0$ y $2,8 \text{ g/cm}^3$).

Tabla 5.5. Características ensayadas para conocer la densidad

Tipo	Masa	Pic+liq	Pic+liq+mas	Vol	Densidad(g/cm3)
Muestra 1	485,0	1252,8	1539,0	198,8	2,449
Muestra 2	492,6	1252,6	1543,8	201,4	2,445
Muestra 3	438,4	1252,6	1512,4	178,6	2,454
			Densidad media:		2,449

Para obtener la absorción de la EGAH, tras el cálculo de la densidad aparente, las mismas muestras de EGAH saturadas de agua al extraélas del matraz, pero sin agua superficial, se meten a la estufa durante 24h y se vuelven a pesar, obteniéndose el peso de la EGAH sin agua absorbida (tabla 5.6). La absorción de la EGAH es la diferencia de ambas pesadas (saturadas y secas) con respecto al volumen de la muestra (tabla 5.7).

Tabla 5.6. Masa y densidad de la escoria secada en horno

Tipo	Masa	Pic+liq	Pic+liq+mas	Vol	Densidad(g/cm3)
Muestra 1	446,9	1252,8	1539,0	198,8	2,246
Muestra 2	454,5	1252,6	1543,8	201,4	2,256
Muestra 3	405,9	1252,6	1512,4	178,6	2,272
			Densidad media:		2,258

Tabla 5.7. Coeficiente de absorción de cada muestra

Tipo	Coeficiente de absorción
Muestra 1	8,52
Muestra 2	8,38
Muestra 3	8,00

Para la obtención de la densidad y absorción de los áridos calizos se utilizó el procedimiento descrito anteriormente para la EGAH, obteniendo los siguientes resultados medios:

Coefficiente de absorción grava:	1,0 %
Coefficiente de absorción arena gruesa:	1,0 %
Coefficiente de absorción arena fina:	1,0 %
Densidad de la grava	2,60 Kg/m ³
Densidad de la Arena gruesa	2,60 Kg/m ³
Arena fina	2,60 Kg/m ³

Para calcular la densidad aparente del cemento ensacado, se rellenó un molde cilíndrico de 10 dm³ sin compactación. Se pesa el molde vacío y lleno de cemento, resultando un peso de 10,08 kg para los 10 dm³ de cemento, lo que resulta una densidad de 1,08 kg/dm³.

5.2.10. Granulometría de los áridos

Para el análisis granulométrico de cada árido se ha determinado la distribución por tamaños de las partículas. Se ha separado al árido en diferentes fracciones y se ha calculado el porcentaje que pasa por cada tamiz⁵ (figura 5.28). Los tamices empleados siguen la progresión



Figura 5.28. Tamices y dispositivo

⁵Las arenas y EGAH se secan ligeramente con el fin de evitar que se apelmacen sus granos por efecto de la humedad y queden retenidos por tamices de más abertura que los que corresponden al tamaño real.

geométrica de razón 2 en sus aberturas, a excepción de los tamices 10 y 12,5 mm. Estos tamices fueron utilizados en la caracterización de la grava pero no han sido tenidos en cuenta en los cálculos realizados, juntando el material retenido por estos tamices con el retenido por el tamiz de 8 mm que si pertenece a la serie normalizada.

Los áridos poseen una granulometría continua (ver estudio granulométrico en el anexo 1) debido a la existencia de fracciones de todos los tamaños comprendidos entre el más pequeño y el mayor de cada uno de ellos (figura 5.29). Además, como dato característico, se aprecia que las escorias carecen de las fracciones más finas, afectando esta carencia en las sustituciones planteadas en la fase experimental, tema que se ha estudiado con más detalle en la fase de dosificación por las implicaciones que esto tiene para la reología de los HAC, sobre todo en sustituciones altas de EGAH por árido fino. Para una dosificación óptima los áridos deben tener una granulometría adecuada para reducir al mínimo la cantidad de huecos y mejorar el esqueleto granular del hormigón.

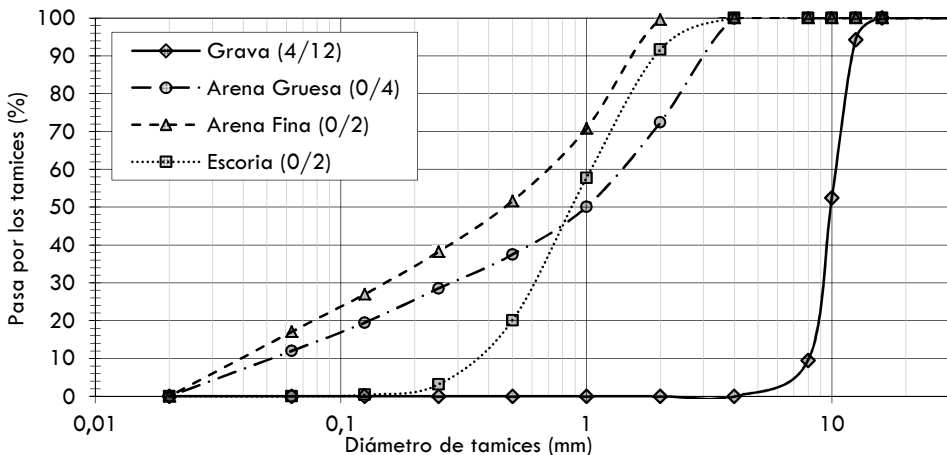


Figura 5.29. Curvas granulométricas de todos los áridos

5.2.11. El esqueleto granular de los HAC

El esqueleto granular de los HAC están constituido a partir de tres fracciones de árido calizo de machaqueo: una grava 4/12 mm, con un contenido de finos del 1%, una arena gruesa 0/4 mm y una arena fina 0/2 mm, con un contenido de finos mayor (tamaño de partícula $<0,063$ mm), del 12,0% y 17,1% respectivamente. Estas arenas fueron sustituidas, en parte, por escoria de fracción granulométrica 0/2 mm. Adicionalmente, se añadió filler calizo para contrarrestar la carencia de finos en la EGAH. Las curvas granulométricas fueron analizadas siguiendo los criterios establecidos en la norma europea UNE EN 12620 y el anejo 17 de la EHE-08. Como se puede observar en la figura 5.30, las partículas del árido calizo son más finas que las de EGAH. Para el estudio en detalle de las fracciones por debajo de 0,1mm, se utilizaron técnicas granulométricas con láser, mostrándose los resultados obtenidos de los finos de la arena y del filler calizo en la figura 5.30.

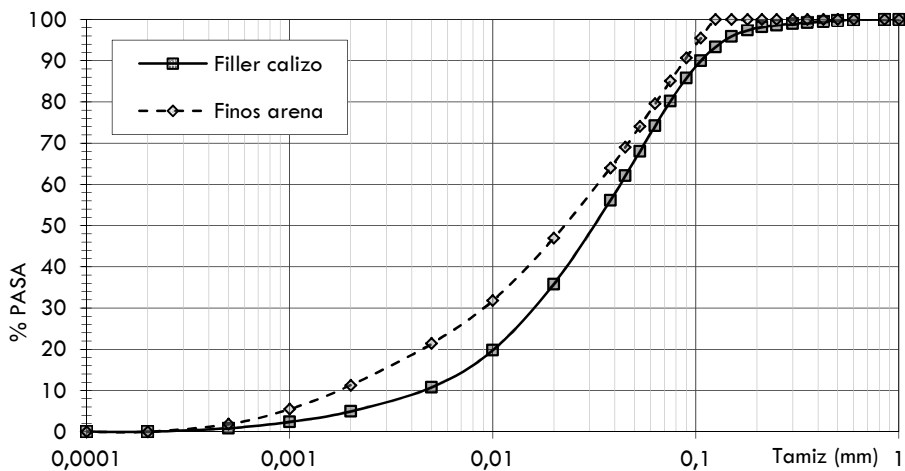


Figura 5.30. Granulometría de los finos de la arena caliza y del filler calizo adicionado

Se fabricaron 7 tipos de HAC, con sustituciones del 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% y 60% del árido fino por EGAH. En la Tabla 5.8 se detallan las dosificaciones de todas ellas. Todas las mezclas estudiadas se fabricaron con $375\text{Kg}/\text{m}^3$ de cemento, con $25\text{ kg}/\text{m}^3$ de ceniza volante y con una relación efectiva agua/cemento de 0,55. En la fila “Filler calizo” se indica los finos calizos adicionados para compensar la pérdida de finos que se produce al sustituir las arenas por escoria. La finalidad es obtener cantidades de fracciones menores a $0,85\text{ mm}$ muy similares entre los diferentes HAC (tabla 5.8 y figura 5.31).

Tabla 5.8. Dosificación de los HAC

(Cantidades en kg/m^3)	H-0	H-10	H-20	H-30	H-40	H-50	H-60
Arena gruesa (0/4)	861,2	870,2	873,2	794,5	686,2	560	456,6
Arena fina (0/2)	274,1	158,9	44,7	0	0	0	0
Grava (4/12)	656,6	656,7	656,3	656,3	656,3	655,6	663,9
EGAH (0/2)	0	100	199,1	303,1	410,5	515,2	619,3
Cemento	375	375	375	375	375	375	375
Ceniza volante	25	25	25	25	25	25	25
Agua	220	220	220	220	220	220	220
SP	4,4	4,2	4	4,6	4,8	7,2	6,0
Filler calizo	0	32,5	64,7	91,4	114,6	137	159,3
Cantidad de finos de arena + filler: $<0,85\text{mm}$ (kg/m^3)	241,70	244,92	246,90	246,21	248,26	246,09	248,31
% Total $<0,85\text{mm}$	100,0%	101,3%	102,1%	101,9%	102,7%	101,8%	102,7%

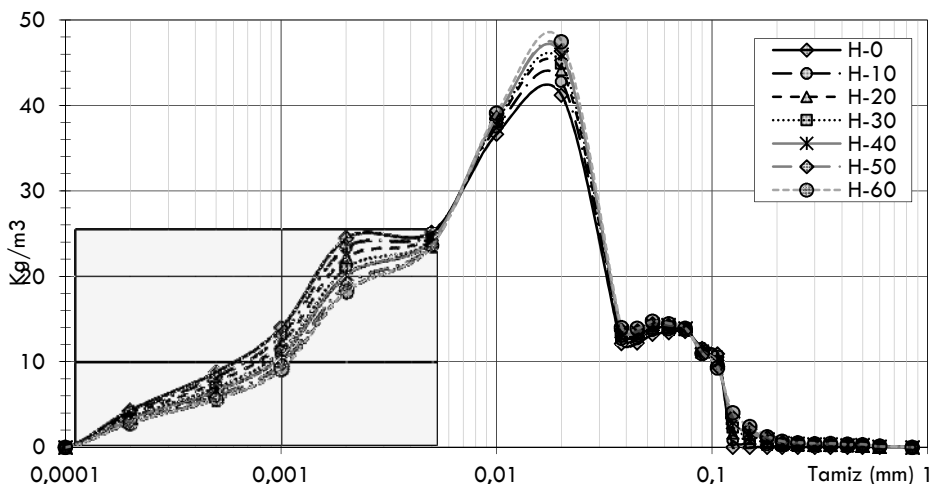


Figura 5.31. Cantidad de finos calizos (de las arenas y adicionados) por m^3 de cada HAC

5.2.12. Caracterización del cemento

El cemento utilizado, CEM II /B-M (S-L) 42,5R, es caracterizado en abril de 2013. En la tabla 5.9 se presentan los resultados.

Tabla 5.9. Caracterización del cemento

		ESPECIFICACIONES UNE-EN 197-1:2011
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS		
Cloruros (%)	0,03	< 0,10 %
Sulfatos (%)	3,08	< 4,0 %
Contenido en Cromo (VI) soluble (%)	0	≤ 0,0002 %
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		
Principio de fraguado (min.)	170	> 60 min.
Final de fraguado (min.)	220	< 12 h.
Expansión (mm)	0	< 10 mm
Densidad real (g/cm ³)	3,03	
Superficie Específica Blaine (cm ² /g)	4.550	
COMPOSICIÓN DEL CEMENTO (%)		
Clinker (K)	73	K: 65-79 %
Caliza (L)	12	L +S: 21-35 %
Escoria (S)	15	
Componente minoritario (CM)	0	CM: 0-5 %
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS		
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)		
2 días	28	> 20 MPa
7 días	43,6	
28 días	54,4	Entre 42,5 y 62,5 (MPa)

5.3. DOSIFICACIÓN

5.3.1. Granulometría del HAC

El método de dosificación elegido para los HAC es una adaptación del método Bolomey para hormigones autocompactantes realizada por el Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad Politécnica de Valencia en base a trabajos de investigación previos. Para determinar las proporciones⁶ de los diferentes áridos, Bolomey utiliza una curva de referencia de granulometría variable en función de la consistencia deseada en el hormigón, en este caso autocompactante, y de la forma de los áridos. Esta curva de referencia (figura 5.32), viene definida por la siguiente ecuación:

$$Y = a + (100 - a) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad [5.4]$$

donde,

y : Tanto por ciento en volumen que pasa por cada tamiz de abertura d.

d : Abertura en mm de cada uno de los tamices de la serie empleada.

D : Tamaño máximo del árido en mm.

⁶Para realizar el ajuste granulométrico de la mezcla de los áridos a la curva Bolomey (figura 5.32), se emplea el método teórico basado en los módulos granulométricos, siendo este método más exacto que otros como el de tanteo. Este método teórico tiene en cuenta el porcentaje de cemento que entra en la composición del hormigón, así como las fracciones de los diferentes áridos, sus módulos granulométricos y las proporciones de cada árido para que la granulometría de la mezcla se ajuste a la curva de referencia (ajuste realizado por mínimos cuadrados) siguiendo las recomendaciones recogidas en el libro de Manuel Fernández Cánovas "Hormigón" (1989).

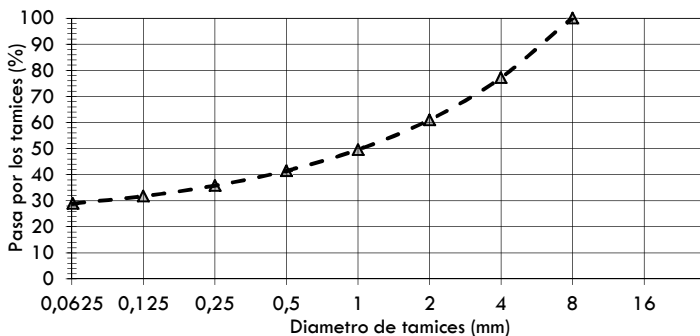


Figura 5.32. Ejemplo de curva teórica Bolomey

α : Parámetro que toma distintos valores en función del tipo de árido y de la consistencia del hormigón.

Tras los buenos resultados obtenidos en investigaciones anteriores y previas, se adopta el coeficiente “ α ” para el HAC entre 18 y 24, dependiendo de las características deseadas para el hormigón resultante. En esta investigación, dado que se pretende obtener HAC fluidos con un valor de 700 ± 30 mm en el ensayo de escurrimiento, se adopta $\alpha=20$, obteniendo la granulometría indicada en la tabla 5.10. Para más detalle sobre este método y la dosificación utilizada ver el anexo 3.

Tabla 5.10. *Granulometría Bolomey para grava, arena gruesa, arena fina y EGAH*

Tamiz (mm)	Grava		Arena gruesa		Arena fina		EGAH	
	Pasa (%)	RAC (%)	Pasa (%)	RAC (%)	Pasa (%)	RAC (%)	Pasa (%)	RAC (%)
125	100	0	100	0	100	0	100	0
63	100	0	100	0	100	0	100	0
31,5	100	0	100	0	100	0	100	0
16	100	0	100	0	100	0	100	0
12,5	100	0	100	0	100	0	100	0
10	91,55	8,45	100	0	100	0	100	0
8	84,00	16,00	100	0	100	0	100	0
4	65,25	34,75	100	0	100	0	100	0
2	52,00	48,00	79,69	20,31	100	0	100	0
1	42,63	57,37	65,32	34,68	81,98	18,02	81,98	18,02
0,5	36,00	64,00	55,17	44,83	69,23	30,77	69,23	30,77
0,25	31,31	68,69	47,99	52,01	60,22	39,78	60,22	39,78
0,125	28,00	72,00	42,91	57,09	53,85	46,15	53,85	46,15
0,063	25,68	74,32	39,35	60,65	49,38	50,62	49,38	50,62

5.3.2. Automatización de cálculos en la dosificación

Para la fase de ajustes previos y dosificación adoptada, se ha utilizado una hoja de cálculo programada por el profesor, y director de este trabajo, Dr. Manuel Valcuende Payá, validada con éxito en anteriores trabajos de investigación del DCA de la UPV. Esta herramienta informática agiliza y simplifica los cálculos a realizar en la dosificación, así como los ajustes a realizar diariamente por la humedad de los áridos y reajusta las diferentes pesadas para cada volumen de amasada.

En la tabla 5.11 se muestra la interfaz de esta aplicación informática, mostrando las casillas más importantes a la hora del ajuste de la dosificación. Previamente se introduce la granulometría de los 4 áridos utilizados y con todo ello se calcula la dosificación que ajusta con la curva de Bolomey adoptada.

Dado el planteamiento de la fase experimental, con 6 sustituciones diferentes de árido fino por escoria, se hace necesario una ampliación en el procesado de información. Para ello, se genera una nueva hoja de cálculo (tabla 5.12) que se acopla y vincula a la inicial, compartiendo ambas información como la cantidad de arena fina, arena gruesa, humedades, absorción y cantidad de finos de los áridos. Además, se generan nuevas entradas de datos, como porcentaje de escoria a utilizar, porcentaje de arena fina a sustituir, porcentaje de arena gruesa a sustituir y cantidad de filler calizo a utilizar. Con toda esta información y los cálculos programados se obtiene uno listado de materiales y pesadas a verter en la amasadora.

Tabla 5.11. Interfaz de aplicación informática DCA

Árido de machaqueo, consistencia fluida			a = 20		
Módulo Bolomey grava	MBgr =	3,61			
Módulo Bolomey arena gruesa	MBar =	2,09			
Módulo Bolomey arena fina	MBar =	1,35			
Módulo Bolomey escoria	MBar =	1,35			
a/c	0,55				
SP (%/cem)	1,50				
VMA (%/cem)	0,00				
Esco (%arena)	0,00				
Fabricación:	10	Litros	(Volumen de amasada)		
			Peso		
	Densidad (Kg/m ³)	Volumen (dm ³ /m ³)	(Kg/m ³)	Corregido Humedad	Fabricación: (Kg/amasada)
Cemento	3,1	120,97	375	375	3,75
Agua	1,00	206,25	206,25	129,87	1,30
SP	1,05	5,36	5,625	5,625	56,25
Cohesionante	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Grava	2,60	256,52	666,95	673,62	6,74
Arena gruesa	2,60	297,08	772,42	816,14	8,16
Arena fina	2,60	138,82	360,94	386,93	3,87
Finos	2,60				
			s/(cem+ar+f)	s/(áridos)	
Porcentaje cemento + finos	to =	14,87			
Porcentaje de grava	t3 =	31,54	37,05		
Porcentaje de arena gruesa	t2 =	36,52	42,90		
Porcentaje de arena fina	t1 =	17,07	20,05		
Volumen de cemento + áridos + finos		Vcem+ar+fin	813,39		
Volumen de áridos		Varena+grava	692,43		
Volumen arena fina + arena gruesa		Var fi + ar gr	435,91		
Volumen ar fi + ar gr + escoria		Varf+arg+esc	435,91		
Contenido total de finos (cemento+aridos+filler)			529,13		
Volumen de pasta (> 350 L/m ³)			391,86		
Relación en volumen agua/finos(cem+áridos+filler)			1,14		
Relación en vol (agua+sp+vma)/finos(cem+áridos+filler)			1,17		

Tabla 5.12. Ampliación de la hoja de cálculo para el 60% de EGAH

Sustitución Arena Gruesa		Sustitución de Escoria(gr)= 36,12%		Diferencial agua(litros)	
47,45%	393,67	Esc.=383,35	89,04%	4,58%	17,56
		Finos=47,18	10,96%	3,81%	1,80
		Total=430,53	100,00%		19,36

5.3.3. Dosificación de los HAC con EGAH

Tras los estudios previos realizados y detallados en el anexo 2 y las premisas planteadas en la fase de experimentación para la fabricación de HAC con $\varnothing f=700 \pm 30\text{mm}$ y con T_{500} bajos, entre 1 y 3,5 s., se consideró como más idónea la dosificación nº5 de dicho anexo, con 25 kg de ceniza volante que sumados a los 375 kg de cemento resulta 400 kg de material cementante. Con respecto a los áridos, para un ajuste total a la curva de Bolomey con $a=20$, fue imprescindible la utilización de un 38% de árido grueso (4/12). Para el superplastificante, se parte, por lo general, de la cantidad del 1,2% del peso de cemento, permitiendo pequeñas variaciones para garantizar parámetros reológicos aceptables. Con todo ello, en la tabla 5.13 se detallan las 7 dosificaciones teóricas realizadas (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% y 60% de EGAH).

Tabla 5.13. Dosificación teórica con árido grueso y fino a sustituir

(Kg/m ³)	Cemento	CV	Agua	SP	Grava	Arena gruesa	Arena fina	Sust. A gruesa	Sust. A fina
H-0	375	25	220	4,4	656,6	829,7	260,3	0,0%	0,0%
H-10	375	25	220	4,2	656,8	829,6	260,7	0,0%	41,8%
H-20	375	25	220	4,0	656,9	829,6	261,1	0,0%	83,6%
H-30	375	25	220	4,6	656,5	829,7	260,0	8,1%	100,0%
H-40	375	25	220	4,8	656,3	829,7	259,6	21,2%	100,0%
H-50	375	25	220	7,2	654,4	829,9	255,4	34,6%	100,0%
H-60	375	25	220	6,0	655,4	829,8	257,5	47,6%	100,0%

La gran diferencia granulométrica entre arenas naturales y EGAH reside en las fracciones menores a 0,125 mm (ver tabla 5.14), siendo ésta imprescindible para una correcta reología de los HAC, sobre todo la menor de 0,063 mm, y así quedó constatado en los estudios previos de dosificación, que para altos contenidos de EGAH, sin aporte extra de finos,

no fluía el HAC correctamente, con altos valores de tensión inicial de corte y viscosidad.

Por este motivo, se hace imprescindible su corrección. Tras varios cálculos correctores de la granulometría de la EGAH, resultó como más idóneo para alcanzar parámetros adecuados de fluidez y viscosidad de los HAC con altos contenidos EGAH que se adoptara un coeficiente corrector de 1,75⁷ en las partículas más finas (<0,063mm). Esta cantidad de material fino es la indicada en la última columna de la tabla 5.15.

Tabla 5.14. Diferencias significativas en granulometrías de los áridos utilizados

Tamiz	Arena Gruesa		Arena Fina		Escoria	
	Pasa (%)	RAC (%)	Pasa (%)	RAC (%)	Pasa (%)	RAC (%)
0,125	19,47	80,53	26,99	73,01	0,38	99,62
0,063	11,98	88,02	17,06	82,94	0,00	100,00

Tabla 5.15. Dosificación con EGAH y fino calizo

(Kg/m ³)	Cemento	CV	Agua	SP	Grava	Arena gruesa	Arena fina	EGAH	Fino calizo
H-0	375	25	220	4,4	656,6	829,7	260,3	0,0	0,0
H-10	375	25	220	4,2	656,8	829,6	151,7	100,0	18,6
H-20	375	25	220	4,0	656,9	829,6	42,9	200,2	65,1
H-30	375	25	220	4,6	656,5	762,7	0,0	303,8	91,6
H-40	375	25	220	4,8	656,3	653,6	0,0	409,7	114,4
H-50	375	25	220	7,2	654,4	542,7	0,0	514,0	136,5
H-60	375	25	220	6,0	655,4	434,9	0,0	620,8	159,7

Antes de cada amasada se corregía la cantidad de agua a verter en función del contenido de humedad de los áridos.

⁷ La EGAH usada como árido fino, por sí misma, afecta negativamente en las propiedades del hormigón en estado fresco debido a su granulometría abierta (contenido insuficiente de finos) y por la forma angulosa de sus granos (Antonina, 2002). Es por ello, que en los ensayos previos realizados con HAC con EGAH y tras no obtener resultados deseados se determinó la corrección, con filler calizo, de la granulometría abierta de la EGAH.

5.4. PROGRAMA DEL PLAN EXPERIMENTAL

Las 42 amasadas realizadas, 6 para cada dosificación adoptada, se fabricaron en condiciones climáticas similares, con una humedad homogénea en los áridos utilizados. Para ello, éstos se acopian en el interior del laboratorio, se humedecen ligeramente, se mezclan manualmente y cubren con una lámina impermeable, dejándolos reposar de 12 a 24 horas antes de la realización de las amasadas. Las 6 amasadas de cada dosificación se planificaron de la siguiente forma:

La primera, de unos 10 litros, se utiliza para verificar la correcta dosificación con ajustes en la cantidad de SP para la obtención de una μ y τ acorde con las premisas adoptadas en la investigación.

Las tres siguientes, de 60 litros cada una, se utilizan para su vertido en diferentes moldes cilíndricos y primaticos, para realizar posteriormente la mayoría de los ensayos, entre ellos los de compresión, tracción y retracción.

La quinta amasada, de 53 litros, se destinó principalmente a ensayos complementarios de retracción, entre ellos el de retracción a edad temprana, evolución de temperatura en los HAC y pérdida de peso en las probetas.

La sexta y última amasada, de 12 litros, se destinó únicamente al ensayo de principio y final de fraguado del HAC.

Tras la descripción del programa principal de la fase experimental se comienza con la segunda parte de este capítulo, donde se describen los ensayos principales de esta investigación, tales como ensayos del HAC

en estado fresco, ensayos de resistencia mecánica, porosimetría por intrusión de mercurio, retracción y acabado superficial de los HAC.

Las probetas fabricadas con las dosificaciones anteriores se han ensayado para obtener su resistencia a compresión, tracción, y módulo de deformación a las edades de 7, 28 y 90 días. Igualmente, se ha estudiado la pérdida de peso del hormigón, la retracción autógena y la total desde las primeras horas hasta los 360 días (tabla 5.16). Por último⁸, se ha analizado la microestructura de los hormigones y pastas con porosimetría por intrusión de mercurio a los 150 días, con microscopio electrónica de barrido y de fuerza atómica y con ensayos de nanoindentación (Quantitative Nano-mechanical) sobre la interfaz árido-pasta.

Tabla 5.16. Resumen de los ensayos realizados

Tipo de ensayo	Edad				Probeta tipo
	7 días	28 días	90 días	1 año	
Compresión	X	X	X	X	(1), (2) y (3)
Tracción indirecta		X	X		(1)
Flexotracción		X	X		(2)
Módulo de deformación		X			(1) y (3)
Retracción	X*				(2)
Pérdida de peso	X*				(2)

*El ensayo se prolonga en el tiempo hasta la edad de un año.

Con el fin de llevar a cabo los ensayos anteriores, se han realizado distintos tipos de probetas:

⁸ Además de los ensayos reseñados, en el anexo 2 se describen algunos procesos realizados en esta investigación como la molienda de la EGAH, el amasado del HAC y la de los morteros.

1. Probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, empleadas para estudiar la resistencia a compresión, resistencia a tracción y módulo de deformación de los HAC.

2. Probetas prismáticas de 100 x 100 x 400 mm, empleadas en los ensayos de resistencia a flexotracción, retracción y pérdida de peso.

3. Probetas cúbicas de 100 mm de lado, extraídas mediante corte de otra mayor de 100 x 100 x 400 mm.

A modo de resumen se han realizado un total de 42 amasadas, siendo el número de probetas ensayadas 271. Además, se han realizado numerosas amasadas de morteros y pastas para los diferentes ensayos de caracterización realizados.

5.5. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

5.5.1. Ensayo de escurrimiento (slump- flow)

El ensayo de escurrimiento o Slump-Flow se describe en la UNE-EN 12350-8:2011. Éste evalúa la fluidez del hormigón autocompactante. Permite de forma cualitativa, en términos visuales, comprobar la existencia de exudación y o segregación en el HAC, manifestadas, respectivamente, por la presencia de una aureola de pasta o mortero alrededor del perímetro de la extensión del flujo y una presencia de áridos gruesos acumulados irregularmente, sobre todo, en el área central de la torta. Se realiza con un cono de Abrams que tiene una altura de 300 mm, una abertura superior de 100 mm de diámetro y una inferior de 200mm de diámetro. A diferencia del ensayo con hormigón vibrado, en éste la muestra de hormigón se coloca sin ningún tipo de compactación y tomándose como dato el diámetro final de extensión (\varnothing_f) y el tiempo que tarda la muestra desde el inicio del levantamiento del cono hasta alcanzar un diámetro de 500 mm (T_{500}). En la fase experimental, este ensayo se realizó compaginado con un reómetro computarizado, que a la vez que se medía el \varnothing_f y el T_{500} se obtenía el valor de la viscosidad (μ) y la tensión umbral de corte (τ).

El cono se sitúa sobre una superficie completamente horizontal, generalmente una chapa de acero, de dimensiones mínimas 800 x 800 mm, que tiene grafiada unos ejes graduados cada 100 mm y remarcado los 500 mm para la toma de tiempo del T_{500} . El procedimiento de ensayo consiste en extraer de la amasadora un cubo con unos 8 litros, que se vierte sobre el cono sin compactar y se enrasa por la cara superior. Se

levanta el cono con suavidad, a velocidad constante, evitando la suspensión del flujo. Se deja fluir libremente la mezcla por la superficie nivelada, midiéndose los dos parámetros siguientes:

a) Tiempo que tarda en alcanzar la extensión media de 500 mm (T_{500}), parámetro relacionado con la viscosidad. Por lo general, a mayor T_{500} ¹ mayor es la viscosidad del HAC.

b) Diámetro medio final alcanzado por la masa de hormigón (\varnothing_f), tomando para ello 2 diámetros perpendiculares entre sí. Este parámetro es indicativo de la tensión umbral de corte (capacidad de fluir del hormigón bajo su propio peso), siendo mayor la tensión umbral de corte a menor \varnothing_f . El HAC se detiene, cuando la tensión tangencial que genera es inferior a la tensión umbral de corte.

El ensayo del escurrimiento (figura 5.33) describe el flujo de una mezcla en estado fresco y no confinada. Es un ensayo delicado y estandarizado para la normalización de las características de los HAC. Este ensayo inicial y básico, permite determinar la consistencia del hormigón fresco y ver si cumple con las especificaciones. Además, las observaciones visuales durante el ensayo y/o durante la medida del tiempo T_{500} pueden dar información adicional sobre la segregación y la uniformidad del HAC, aunque estas inspecciones visuales se basan en la pericia y experiencia del operario que las realiza, no siendo nada objetivas y extrapolables entre diferentes laboratorios. El aspecto final del hormigón debe ser lo más homogéneo posible, observarse una buena

¹ Este parámetro está relacionada con la viscosidad cinemática y plástica. La viscosidad cinemática (ν), es la viscosidad dinámica (μ) en relación a la densidad del fluido (ρ) a una determinada temperatura, tal que: $\nu = \mu / \rho$ (m^2/s)

distribución del árido y no presentar síntomas de exudación en la zona perimetral de la pasta (aureola de agua en el borde).

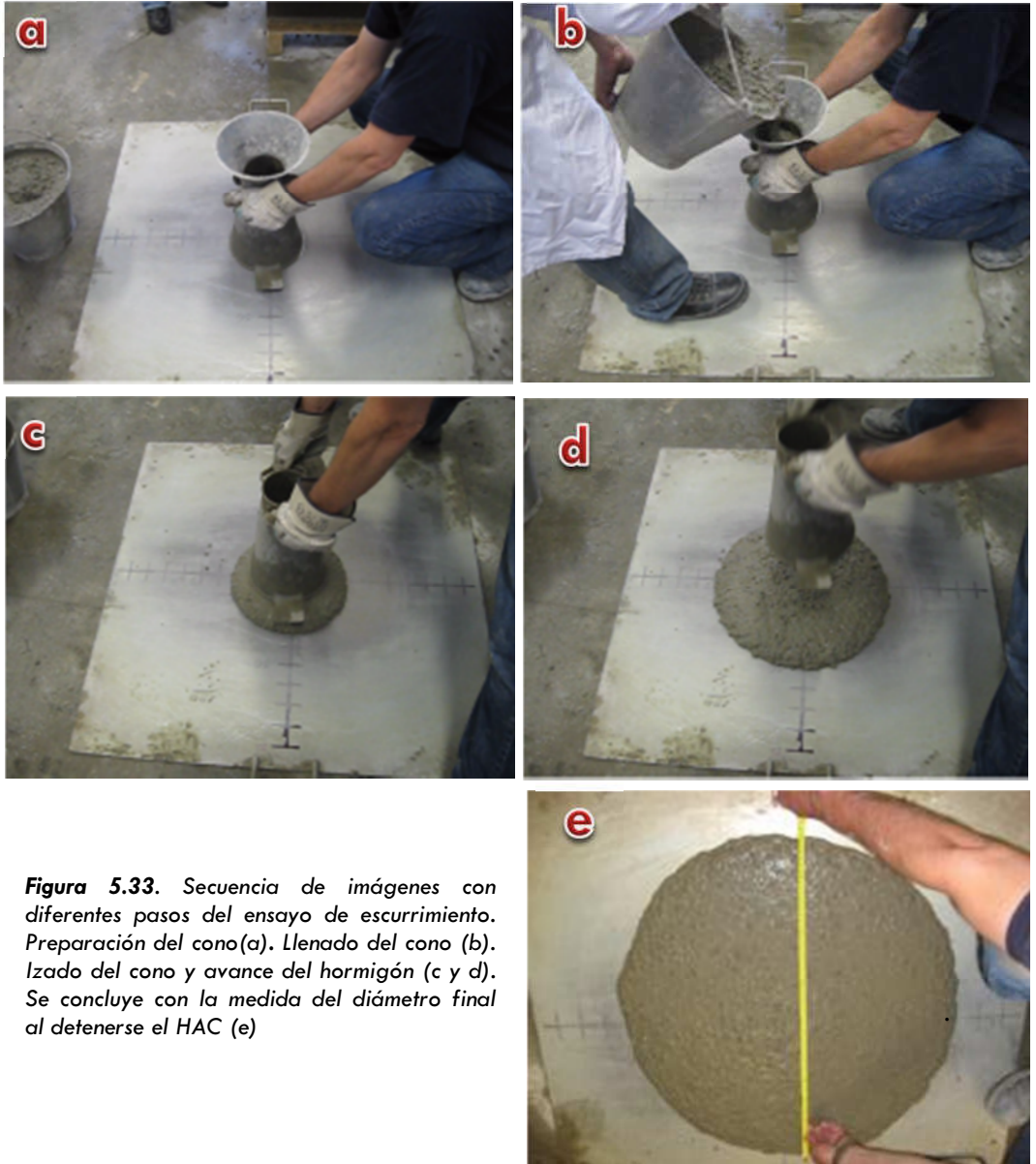


Figura 5.33. Secuencia de imágenes con diferentes pasos del ensayo de escurrimiento. Preparación del cono (a). Llenado del cono (b). Izado del cono y avance del hormigón (c y d). Se concluye con la medida del diámetro final al detenerse el HAC (e)

5.5.2. Estudio reológico.

En la fase experimental se ha utilizado el dispositivo reométrico 4C-Rheometer, diseñado por Danish Technological Institute (figura 5.34). Éste estima la fluidez y características del fluido a través de dos parámetros: la viscosidad plástica y la tensión umbral de corte, utilizados ambos en los modelos teóricos de Bingham. El Danish Technological Institute (2010) asignaron características a los HAC (buen acabado superficial, trabajabilidad, riesgo de segregación o coqueras, etc) dependiendo de su viscosidad y tensión umbral de corte. Previamente, Nielsson y Wallevik (2003) propusieron unos valores idóneos para μ y τ , delimitando dichos valores en la figura 5.35 (línea continua). Más tarde Zerbino et al. (2006) propusieron una ampliación de esta zona (figura 5.35).

Tres amasadas de cada dosificación de la fase experimental, previamente a su aceptación, han sido estudiadas con el dispositivo 4C-Rheometer. El proceso de trabajo con este dispositivo ha sido el siguiente (figura 5.36): se llena el cono con el HAC, se ejecuta el programa de procesado de información, se activa la grabación del video y el levantamiento del cono a velocidad de 7 cm/s. Tras el tiempo programado se detiene la grabación y se procesa la información. Se introduce el valor de la densidad del hormigón en estado fresco y el programa calcula y proporciona los siguientes datos: T_{500} , \varnothing_f , una relación de avance del hormigón con respecto al tiempo, la μ y τ .



Figura 5.34. Vista frontal y latera del dispositivo reométrico 4C-Rheometer

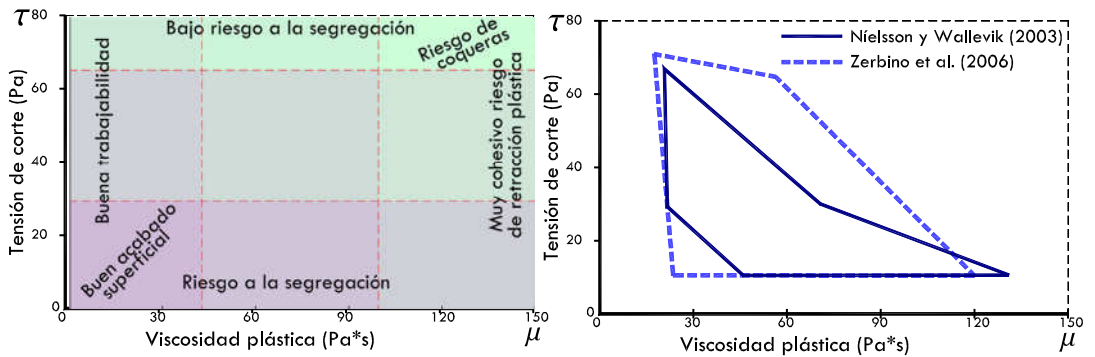


Figura 5.35. Comportamiento de HAC según D.T. Institute (2010) a la izquierda. Según Nielsson y Wallevik, (2003) y Zerbino et al.(2006) a la derecha

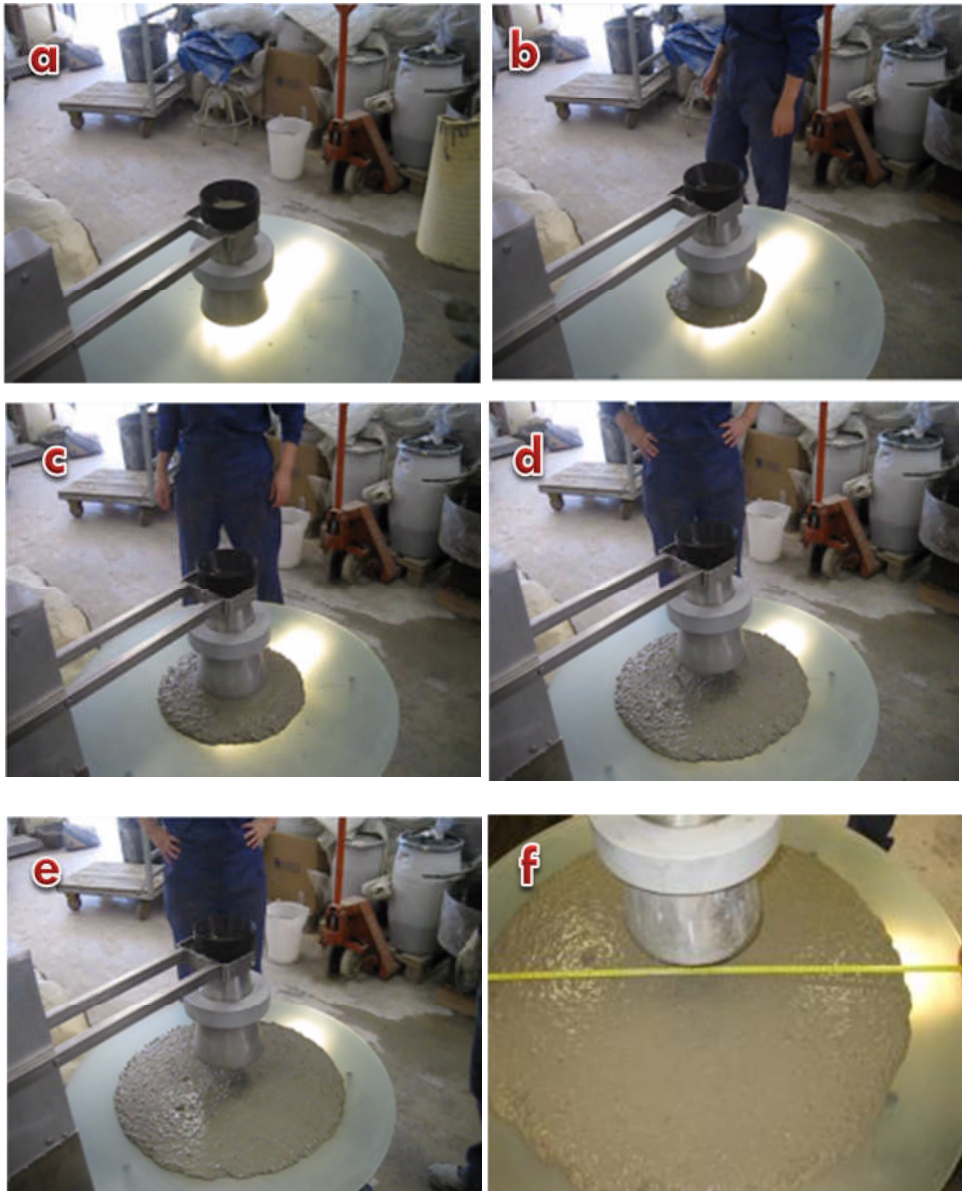


Figura 5.36 (a, b, c, d, e y f). Proceso automatizado del ensayo de escurrimiento

5.5.3. Índice de segregación y exudación visual, “VSI”

El HAC debe presentar una buena distribución del árido y no presentar síntomas de exudación en estado fresco. Para su análisis, durante la realización del ensayo de escurrimiento de todas las amasadas se comprobó de forma cualitativa, en términos visuales, la no existencia de exudación y/o segregación. A continuación se muestran los resultados sobre la estabilidad de los HAC (índice VSI), en estado fresco, realizado sobre 21 amasadas durante la realización del ensayo de escurrimiento. Ninguna de las amasadas de la fase experimental presentó indicios de exudación o segregación.

Según la norma ASTM C1611 M-05, en el ensayo de escurrimiento, podemos clasificar los resultados por un índice visual de la segregación y exudación acontecidos. Existen 4 grupos de clasificación, identificados de 0 a 4². En la tabla 5.17 se muestran los valores del ensayo VSI de las 21 amasadas de la fase experimental. A su derecha, en las figuras 5.37 y 5.38, se muestra el aspecto de dos amasadas de los H-0 (Ver anexo n° 5 para el resto). De estas 21 amasadas estudiadas con el dispositivo 4C-Rheometer, solamente 5 obtuvieron un valor de 1, por apreciarse una ligera aureola de mortero sin presencia de árido. El resto, con valor 0, presentaban una apariencia excelente en el ensayo de escurrimiento.

² VSI = 0 (alta estabilidad); no hay indicios de exudación ni de segregación.

VSI = 1 (estable); no hay indicios de segregación, pero se puede observar una ligera exudación como un brillo en la masa del hormigón.

VSI = 2 (inestable); se observa un pequeño halo de mortero (≤ 10 mm) o una concentración de áridos en el centro de la masa de hormigón.

VSI = 3 (alta inestabilidad); se observa una clara segregación con un halo de mortero (> 10 mm) y/o una gran concentración de áridos en el centro de la masa de hormigón. .

Tabla 5.17. VSI para 21 amasadas

	Amasada	Índice VSI
H-0	1	0
	2	0
	3	0
H-10	1	0
	2	1
	3	0
H-20	1	0
	2	0
	3	1
H-30	1	0
	2	1
	3	0
H-40	1	0
	2	0
	3	0
H-50	1	0
	2	0
	3	1
H-60	1	0
	2	1
	3	0

**Figura 5.37.** Ensayo de escurrimiento del H-0-2**Figura 5.38.** Ensayo de escurrimiento del H-0-3

5.5.4. Acabado superficial. Método propuesto “ICB”

En este trabajo de investigación se ha desarrollado un método de trabajo para el estudio del acabado superficial de hormigones que tiene en cuenta la presencia de poros superficiales. Utilizándolo en laboratorio o en obra permite estudiar los efectos que se producen por variaciones en la dosificación o en los parámetros reológicos de los HAC. Se puede clasificar los HAC por su grado de calidad superficial y/o catalogar los daños superficiales según los estándares internacionales más utilizados, como son los indicados por el grupo de trabajo W29 del CIB, (1971), que establecen una escala de valores del 1 a 7 (de menor a mayor cantidad de daños superficiales). En la figura 5.39 se muestran dos probetas de la fase experimental con diferente cantidad de poros en superficie. El HAC de la izquierda, con bajo daño superficial, podría ser utilizado como HAC visto (arquitectónico), mientras el de la derecha, dada la gran cantidad de poros, no sería viable su uso en hormigones vistos. Estos poros son el resultado de no haberse liberado algunas burbujas de aire, al no ascender hasta la superficie. La viscosidad del HAC es de gran importancia en la ascensión del aire ocluido. Éste, en su ascenso, tiende a unirse y formar grandes burbujas de aire. En caso de no liberarse las que se encuentran en contacto con el encofrado los resultados estéticos pueden no ser los esperados.

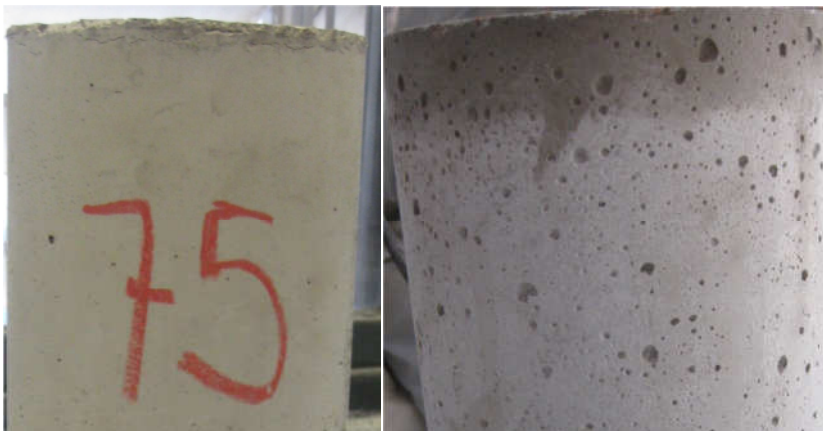


Figura 5.39. Diferentes grados de calidad en el acabado superficial de los HAC

El método desarrollado consiste en cuantificar la superficie ocupada por los poros sobre el total inspeccionado. En este caso se analiza un tercio de la superficie de cada probeta. Se han analizado un total de 97 probetas, de las 7 dosificaciones de HAC con EGAH.

El método se puede realizar con programas informáticos de tratamiento de imágenes (Matlab, Scilab, Octave o similar) o de forma manual. En esta investigación se ha cuantificado la superficie ocupada por los poros de 2 mm o mayores, agrupándolos por su diámetro en 2, 4, 6, 8 y 10 mm (ver esquema en figura 5.40). En el caso de los poros de 2 mm, dado su pequeño tamaño y su gran cantidad, se han estudiado únicamente en una zona central de la probeta de 50x50 mm, marcada con línea roja (figura 5.40). Los datos obtenidos en esta zona central se extrapolan al resto de la zona analizada

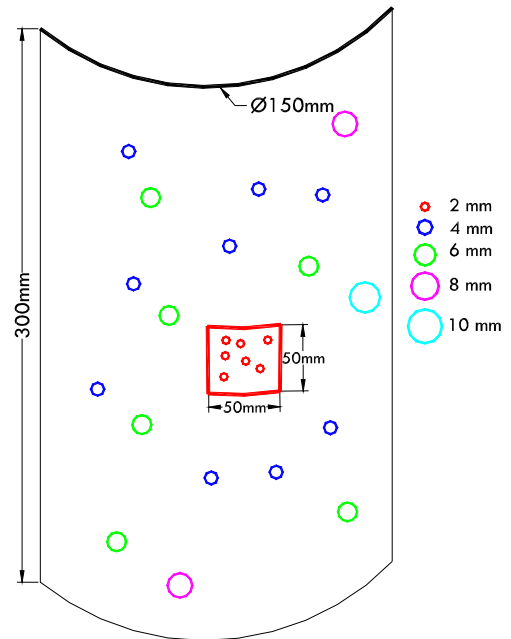


Figura 5.40. Esquema de inspección

Para el análisis manual, se remarca en círculo, con un código de colores, cada uno de los poros detectados en la zona estudiada (figura 5.40). Estos círculos deben inscribir, lo más ajustadamente, los diferentes poros. Rojo para los de \varnothing equivalente de 2 mm, azul oscuro para los mayores de 2 mm hasta los de 4 mm, verde para los mayores de 4 mm hasta los de 6 mm, magenta para los mayores de 6 mm hasta los de 8 mm y azul claro o cian para los mayores de 8 mm hasta los de 10 mm (figura

5.41). Cuando puntalmente, varios poros se agrupan entre sí de forma no circular y su diámetro total es mucho mayor a 10 mm se intenta descomponer en dos o más diámetros menores para reducir la superficie no dañada dentro de la circunferencia.

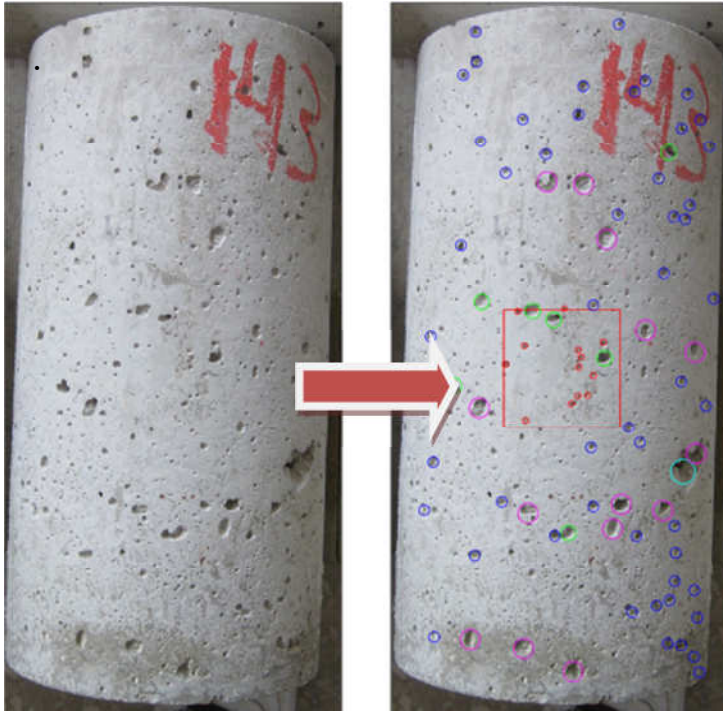


Figura 5.41. Procedimiento de inspección de daños superficiales por poros

El método desarrollado se ha denominado ICB (índice cuantitativo de calidad superficial por poros o burbujas de aire no liberadas). En el anexo 13, se detalla la metodología de ensayo, así como la formulación para el cálculo del ICB. Además en el mismo anexo, se incluye un estudio de las plantillas propuestas por el CIB N°24 W29 para obtener un factor de conversión que permite adaptar el valor ICB a la escala numérica (de 1 a 7) de dichas plantillas.

En la fase experimental se ha estudiado un $1/3$ de la superficie lateral de cada probeta de $\varnothing 150$ mm, por lo que se inspecciona una banda de 157 mm de ancho por el alto total de 300 mm. Sobre estos 47.123 mm^2 se marca su centro geométrico y se traza, coincidiendo con su centro inscrito, un cuadrado de 50×50 mm. Se inspeccionan ambas superficies. Sobre la mayor de 157×300 mm se identifican los poros mayores de 2 mm. Sobre la zona de 50×50 mm (2.500 mm^2), además de los anteriores, se identifican los poros de aproximadamente 2 mm.

La inspección se realiza con una plantilla de medida variable y aconsejablemente transparente, sobre la cual deben ir taladrados o impresos los diámetros de los poros a clasificar³ (figura 5.42). Si la plantilla se construye de 50 mm de lado se puede utilizar para remarcar en la probeta la zona central a estudiar todos los diámetros, incluidos el de 2 mm.

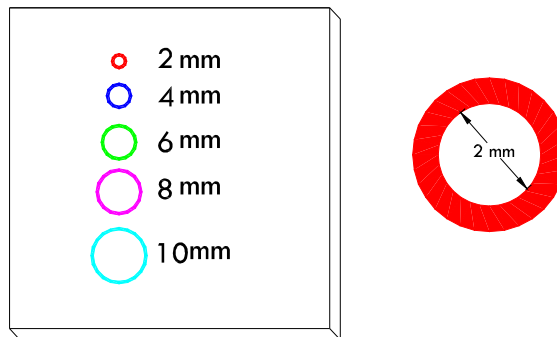


Figura 5.42. Izquierda, propuesta de plantilla. Derecha, \varnothing interior a taladrar

³ En caso de utilizar herramientas informáticas de gran calidad, podemos calcular el área real de cada poro sin idealizar la forma de éste como una circunferencia perfecta.

Para utilizar el método con ampliaciones informáticas, se necesita un ordenador con software de reconocimiento de texturas para detectar el contorno de los poros y que cuantifique su superficie. Se debe marcar las probetas de igual forma que en la figura 5.43 y se digitaliza⁴.

Conocida la superficie total de inspección y la superficie ocupada por los poros, se calcula la proporción entre ambas. Para ello, una vez catalogado los poros por su diámetro, se calcula la superficie de los desperfectos con respecto al 100% de la zona inspeccionada con la siguiente expresión:

$$\text{Superficie desperfecto} = n^{\circ}B_{10} \times AB_{10} + n^{\circ}B_8 \times AB_8 + n^{\circ}B_6 \times AB_6 + n^{\circ}B_4 \times AB_4 + n^{\circ}B_2 \times AB_2 \times CP$$

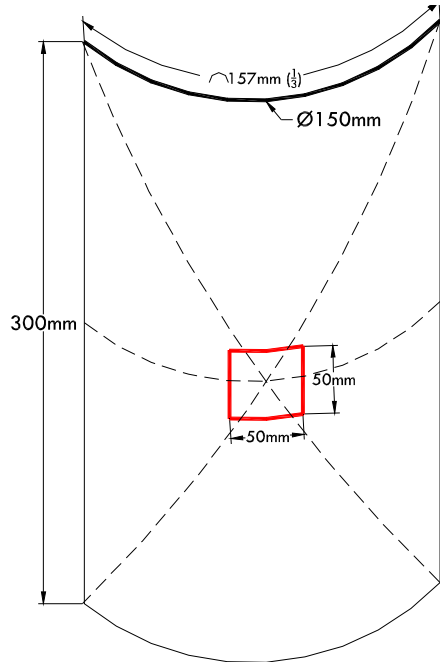


Figura 5.43. Replanteo sobre la probeta

⁴ En caso de utilizar herramientas informáticas, se puede utilizar un escáner de mano que se adapta al contorno de la probeta o hacer rodar la probeta sobre una superficie que recoja las irregularidades y las mantenga para su escaneado (figura 5.44). Esta superficie, o la probeta, pueden ser tratada con tinta (efecto tampón) o similar, para registrar las superficies de poros.

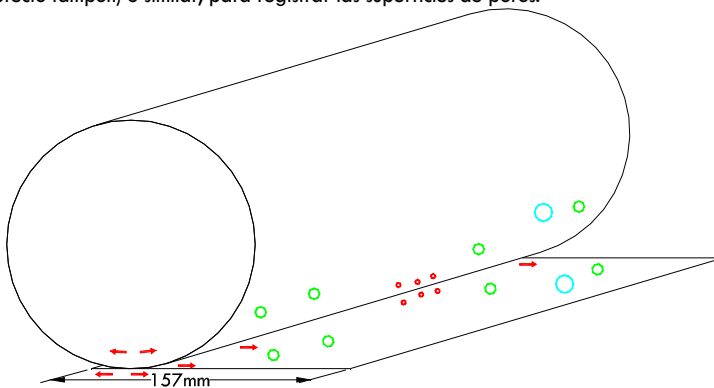


Figura 5.44. Esquema de reproducción plana de desperfectos en probeta

donde,

$n^{\circ}B_n$, es el número de poros detectados para los diferentes diámetros, en este caso “n” es 10, 8, 6, 4 y 2 mm.

AB_n , es el área de la burbuja idealizada como círculos de diámetros 10, 8, 6, 4 y 2 mm, por lo que el valor es constante para los diferentes cálculos.

CP , es una constante de proporcionalidad entre el área total inspeccionada (en este caso un tercio del perímetro de la probeta por la altura) y el área central inspeccionada de poros de 2 mm (generalmente 50x50 mm).

Para obtener el valor del índice ICB se aplica la siguiente expresión:

$$ICB(\%) = \frac{\text{Superficie desperfectos} \times 100}{\frac{1}{3} \text{ del perímetro de la probeta} \times \text{altura}}$$

5.5.5. Determinación de inicio y final de fraguado de los HAC

Para determinar el inicio y final de fraguado de los HAC se utilizó el procedimiento marcado por la norma ASTM C 403-08. Ésta establece que el tiempo de fraguado se determina en base al endurecimiento del hormigón por medio de la resistencia a la penetración de agujas normalizadas para tal fin.

Para cada dosificación de HAC se llenó un molde de unos 12 litros. Sobre la superficie de hormigón se fue probando introducir algunas de las

agujas normalizas de diámetros diferentes (figura 5.45 y tabla 5.18) y en función de la fuerza ejercida, determinada por una escala numérica en el vástago del dispositivo, se calcula la tensión aplicada sobre la superficie del hormigón.



Figura 5.45. Dispositivos y detalle de las agujas

Tabla 5.18. Dimensiones de las agujas

	Nº1	Nº2	Nº3
Ø(mm)	4,51	6,38	20,28
Sup.(mm ²)	16	32	323

Con la superficie de contacto de la punta de la aguja utilizada en cada prueba y la fuerza ejercida por la misma (indicada en la escala del dispositivo), se calcula la tensión ejercida. Según la norma utilizada ASTM C 403-08, cuando la tensión obtenida supera los 3,5 MPa, se considera que ha comenzado el inicio de fraguado y cuando se superan los 27,6 MPa se considera que ha concluido el fraguado.

5.6. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO

5.6.1. Ensayo de resistencia a compresión en probeta cilíndrica

El ensayo de resistencia a compresión, sobre probeta cilíndrica, se rige por la norma UNE-EN 12390-3. Para la realización del mismo se emplearon probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Las probetas, tras su desmoldado y paso por la cámara de curado hasta la edad de ensayo, se pulen para obtener caras totalmente planas y paralelas entre sí, (figura 5.46). Se ha realizado un pulido por medios mecánicos. Se ha descartado el refrentado con azufre por sus implicaciones medioambientales negativas (figura 5.47).

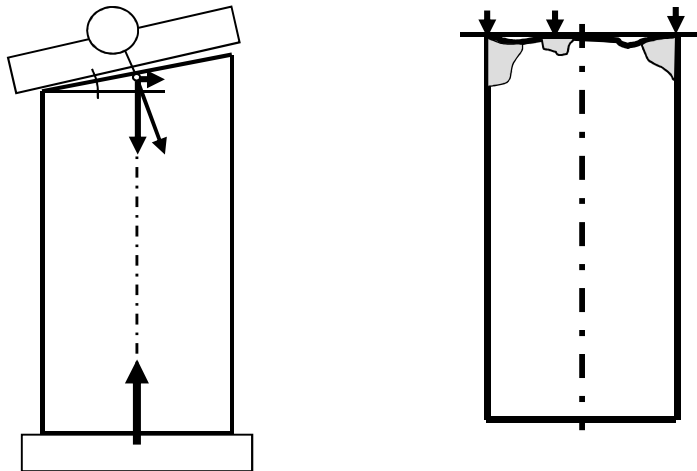


Figura 5.46. Probeta sin refrentar a la izquierda y refrentada a la derecha (Apuntes de Materiales de construcción II.UPV)

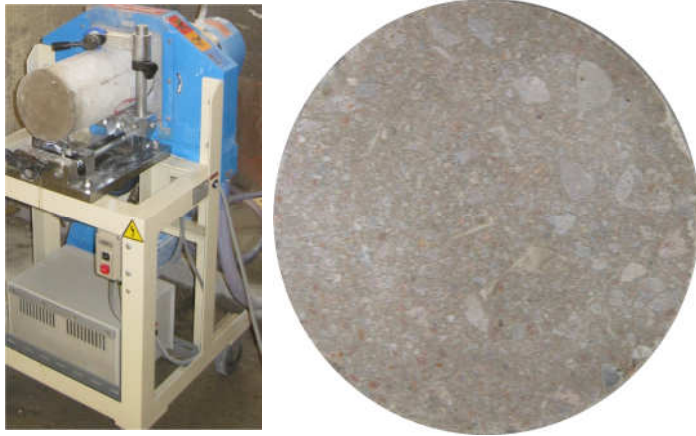


Figura 5.47. Dispositivo de refrentado a la izq. Cara refrentada a la derecha

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.

Se introducen en el dispositivo de ensayo las dimensiones medias de la probeta, se coloca ésta centrada en el dispositivo (figura 5.48) y se inicia el proceso de carga hasta rotura, (figura 5.48, derecha), a una velocidad de carga de 10 ± 2 MPa/s (10 ± 2 kg/cm²/s).



Figura 5.48. Izquierda dispositivo de ensayos mecánicos, derecha rotura de probeta

Para determinar la resistencia a compresión se sigue el procedimiento descrito por la Norma Internacional ISO 4012, el cual consiste en someter a compresión uniaxial hasta la rotura la probetas de hormigón, curadas a temperatura de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ y humedad superior o igual al 95 %.

Los resultados obtenidos se ordenan y se determina su dispersión (δ) en tanto por ciento de los resultados del ensayo según la instrucción EHE, artículo 30. El recorrido relativo debe de ser inferior al 13 % para ensayos de 2 probetas por amasada y 20% para más de 2.

5.6.2. Ensayo de resistencia a tracción indirecta

Se ha determinado el valor de la resistencia a tracción indirecta para las 7 dosificaciones de hormigones autocompactables empleadas a 28 y 90 días.

El ensayo de tracción indirecta es un procedimiento extendido internacionalmente y regulado por las normas UNE-EN 12390-6 e ISO 4108. El método consiste en aplicar una carga de compresión a lo largo de una generatriz centrada de la probeta cilíndrica. En el interior aparecen tensiones horizontales de tracción que producen la rotura, dividiendo la probeta en dos partes. (Ver esquema en figura 5.49, y ensayo en figura 5.50).

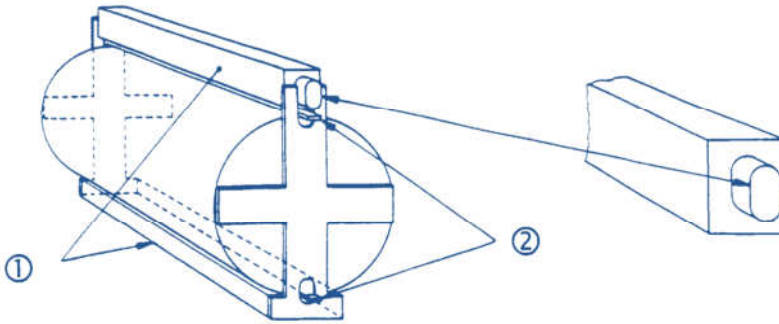


Figura 5.49. Dispositivo de ensayos para probetas cilíndricas. (1) Pieza de acero de carga. (2) Bandas de apoyo. UNE-EN 12390-6



Figura 5.50. Izq. dispositivo del ensayo. Derecha, rotura de probetas

De esta forma se puede medir la tensión de tracción última que resiste la probeta. La resistencia a tracción indirecta se calcula mediante la expresión:

$$f_{ti} = \frac{2 P}{\pi d l} \quad [5.5]$$

dónde:

f_{ti} tensión de rotura o tracción indirecta (MPa)

P carga de rotura en (N)

- l longitud de la probeta (mm)
- d diámetro de la probeta (mm)

Previo a la realización del ensayo se mide la longitud de dos generatrices opuestas y dos diámetros ortogonales a media altura con un pie de rey de precisión 0,02 mm. Se efectúa también un pesado de 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. Entre los platos de la prensa y la probeta se sitúan 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, todo ello según normativa. 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.

Por otra parte, como valor de resistencia a tracción se toma el valor medio de los ensayos realizados sobre cada amasada, estimándose como parámetros de dispersión tanto el recorrido relativo o rango como el coeficiente de variación.

La EHE considera que la resistencia a tracción indirecta del hormigón obtenida mediante ensayo brasileño (f_{cti}) es superior a la resistencia a tracción axial (f_{ct}), indicando que:

$$f_{ct} = 0,90 f_{cti}$$

[5.6]

5.6.3. Ensayo de resistencia a flexotracción

Este ensayo se realizó a 28 y 90 días, en 3 probetas prismáticas de 100x100x400 mm de cada una de las 7 dosificaciones de HAC realizadas. Este ensayo se rige por la norma UNE EN 12390-5.

El dispositivo para la aplicación de cargas (figura 5.51) consiste en dos rodillos soportes y dos rodillos superiores soportados por una placa articulada que reparte la carga aplicada por la prensa entre los dos rodillos por igual.

Todos los rodillos están contruidos de acero y tienen una sección circular con un diámetro entre 20 mm y 40 mm. Los rodillos, incluyendo los dos superiores, son capaces de girar libremente alrededor de sus ejes y de inclinarse en un plano normal al eje longitudinal de la probeta.

La distancia, "l", entre los rodillos exteriores es igual a 3d, siendo "d" el ancho de la probeta. La distancia entre los rodillos interiores es igual a "d". Los rodillos interiores están centrados entre los rodillos exteriores, como se muestra en la figura 5.51. Todos los rodillos se ajustan a las distancias indicadas con una precisión de ± 2 mm.

Se selecciona un incremento de tensión constante dentro del rango de 0,04 a 0,06 MPa/s ($\text{N}/\text{mm}^2 \cdot \text{s}$). La carga se aplica sin brusquedades y se incrementa continuamente a la velocidad seleccionada ± 1 %, hasta que la probeta no soporte una carga mayor.

La resistencia a flexión viene dada por la fórmula:

[5.7]

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

donde

f_{cf} es la resistencia a flexión, en MPa (N/mm²);

F es la carga máxima, en newtons;

l es la distancia entre los rodillos soportes, en milímetros;

d_1 y d_2 son las dimensiones laterales de la probeta, en milímetros.

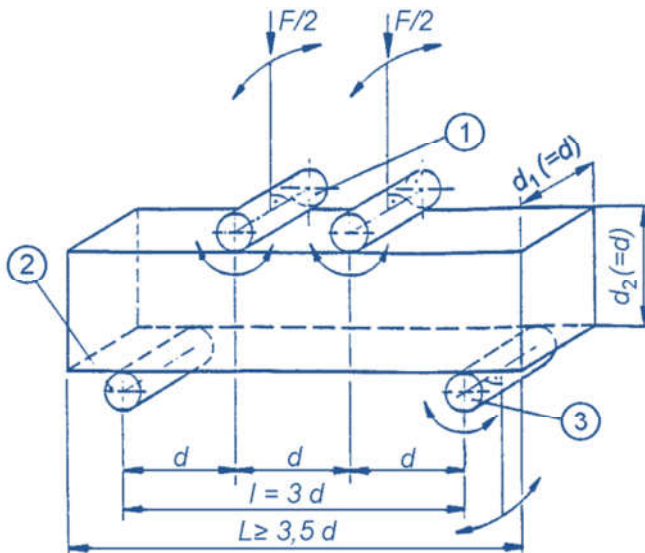


Figura 5.51. Dispositivo de carga de probetas (dos puntos de carga). (1) Rodillo de carga. (2) Rodillo soporte. (3) Rodillo soporte. UNE EN 12390-5

Tras el desmoldado de las probetas y su paso por la cámara de curado se procede a realizar el ensayo en la prensa hidráulica tipo puente, con el dispositivo metálico indicado en la norma, con dos puntos de presión (figura 5.52).



Figura 5.52. Izquierda y derecha, prensa con dispositivo metálico del ensayo

5.6.4. Módulo de deformación

La relación tensión-deformación del hormigón no es lineal y por ello si se intenta obtener el módulo de deformación con el cociente entre la tensión y la deformación, éste varía para cada punto de la curva.

Si en lugar de cargar la probeta hasta la rotura se la comprime solo hasta aproximadamente un 40% de la carga de agotamiento y se la descarga, la rama de descarga es prácticamente una línea recta, quedando una deformación remanente. Volviendo a cargar y descargar varias veces hasta alcanzar la misma tensión, la curva tensión-deformación, dentro del rango tensional aplicado, se trasforma casi en una línea recta, cuya inclinación es aproximadamente igual al módulo de deformación secante del hormigón en el punto correspondiente a una tensión igual a $0,4f_c$. De hecho, la instrucción EHE-08 en su Art. 39.6 define que el módulo de deformación a adoptar será el módulo instantáneo de deformación

longitudinal secante⁵ (en MPa) (Parra et al., 2013).

Para la fase experimental, se han ensayado probetas de cada una de las dosificaciones fabricadas, siguiendo el procedimiento de ensayo de la norma ASTM para obtener el módulo de deformación estático en compresión E_c , designado por la EHE como módulo secante.

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = (\text{MPa}) \quad [5.8]$$

dónde:

$\Delta\sigma$ incremento de tensión.
 $\Delta\varepsilon$ incremento deformación.

Ambos valores se calculan entre las tensiones de 0,5 MPa y el 40% de la tensión media de rotura (f_c) de los HAC. La media se ha realizado sobre 6 probetas ensayadas a compresión para cada dosificación a 28 días.

Previa a la realización del ensayo, la probeta se ha medido con un pie de rey, determinándose la longitud de dos generatrices diametralmente opuestas y de dos diámetros ortogonales. Igual que en el ensayo de compresión, la cara de acabado de la probeta se pulió.

A continuación se procede a la colocación de unos captadores de deformación situados en la zona central de la probeta, con una sensibilidad de 0,50 μm .

⁵ El módulo instantáneo de deformación longitudinal secante está limitando por debajo del límite de proporcionalidad del diagrama tensión deformación (Estadio I), considerando que en condiciones de servicio no se sobrepase el valor de 0.45 f_{cj} , siendo f_{cj} la resistencia del hormigón a la edad de j días, con lo que el tramo del diagrama es prácticamente lineal(Parra et al.,2013).

Los ensayos se realizaron en una prensa universal de ensayo (figura 5.53). La deformación captada por los sensores junto con la presión ejercida por el plato de la prensa es registrada informáticamente. A la finalización del ensayo se rompió a compresión la probeta, verificando que la carga de rotura no difería en más de un 20% de la resistencia a compresión de referencia inicial.



Figura 5.53. Dispositivo de medida

Finalizado este proceso se calculan las deformaciones medias obtenidas en cada una de las líneas de medida en el ciclo de carga y se obtiene el módulo de deformación estático en compresión mediante la expresión:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = (\text{MPa}) \quad [5.9]$$

dónde:

- $\Delta\sigma$ incremento de tensión.
- $\Delta\varepsilon$ incremento deformación unitaria.
- σ_2 tensión en el escalón de carga correspondiente al 40% de la resistencia a compresión del hormigón.
- σ_1 tensión inicial (0,5 MPa).
- ε_2 deformación unitaria media, bajo el nivel de carga máxima.
- ε_1 deformación unitaria media, correspondiendo a la tensión de (0,5 MPa).

5.6.5. Porosimetría por intrusión de mercurio (PIM)

El ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio permite obtener una distribución del tamaño y volumen de los poros existentes en el hormigón, evaluando y cuantificando la porosidad y penetrabilidad de la muestra estudiada.

El principio físico del ensayo es el no mojado de algunos líquidos⁶. Esto posibilita que en contacto con un sólido poroso, éste no absorba el líquido a presiones bajas o en vacío, permitiendo que, ante aumentos de presión, se cuantifique la penetración del líquido en la red porosa del material.

Si se sumerge una muestra de hormigón en mercurio a presión atmosférica, éste no penetra en la red porosa de la muestra. Con el aumento de la presión ejercida sobre el líquido, éste va penetrando en los poros. Con el aumento de la presión, disminuye el diámetro donde el mercurio penetra. Los rangos utilizados para el hormigón oscilan entre los 0,005 y 100 μm . Como es lógico, el mercurio solo penetrará en los poros interconectados.

⁶El mercurio cumple este requisito dado que posee una alta tensión superficial, considerándose como un líquido que no moja la mayoría de los materiales. En la figura 5.54, se muestra un esquema de lo indicado, con ángulo α de contacto bajo (izquierda) para el líquido moja. Con alto ángulo de contacto, se considera una alta tensión superficial del líquido y por tanto éste no moja al material de contacto.

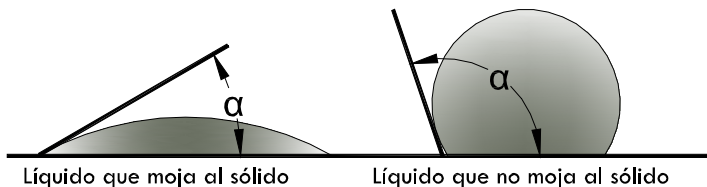


Figura 5.54. Representación esquemática del ángulo de contacto de los líquidos

La relación entre la presión ejercida y el tamaño de poros viene dada por la ecuación de Washburn. Ésta parte de la hipótesis de que la red porosa tiene una forma cilíndrica:

$$P = \frac{-4 \cdot \gamma \cdot \cos\theta}{D}$$

siendo:

p: Presión para que el mercurio penetre en un poro de diámetro D (N/nm²)

γ : Tensión superficial del mercurio (485 N/mm)

θ : Ángulo de contacto entre el mercurio y la superficie del poro (130°)

D: Diámetro de poro (nm)

Además, con los datos obtenidos en el ensayo se puede calcular:

-**La porosidad total** con la expresión:

$$P_t = \frac{V_p}{V_m} \cdot 100$$

dónde:

Pt: Porosidad total (%)

Vp: Volumen de poros (mm³)

Vm: Volumen de la muestra (mm³)

-**El diámetro promedio de poro**, con la expresión:

$$\varnothing = \frac{4 \cdot V}{A}$$

dónde:

\varnothing : Diámetro de poro promedio (mm)

V: Volumen de poros (mm³)

A: Superficie de la muestra (mm²)

-**El diámetro de poro crítico**. Es el diámetro de poro que más se repite.

-El **diámetro** umbral. Es el diámetro de poro a partir del cual se produce un aumento rápido de la intrusión de mercurio. Es el límite a partir del cual se concentran el mayor número de poros y por lo tanto es un buen indicador de la finura de la estructura porosa.

-La **distribución de los poros por diámetros**. Los dispositivos de ensayo procesan informáticamente la información del ensayo, dando como resultado un listado de datos con el que vinculan incrementos de presión con variaciones de diámetro de poro penetrado, pudiendo representar la distribución de poros de la muestra ensayada (figura 5.55).

El ensayo se realizó según el procedimiento descrito por la norma ASTM D4404-84 (2004), validado por la investigación internacional para la caracterización del hormigón⁷. El equipo utilizado es un porosímetro Micromeritics, modelo Autopore IV 9500 V1.07 (figura 5.55), con una presión máxima de 60.000 psia (414 MPa). A esta presión, el tamaño de poro más pequeño en el cual el mercurio se puede introducir es de 3 nm.



Figura 5.55. Porosímetro Autopore IV

⁷ Sin embargo, la técnica de PIM tiene algunas limitaciones. En primer lugar la suposición de que los poros son cilíndricos no es totalmente real de acuerdo con las características de una estructura de poros real. En segundo lugar la muestra debe ser secada antes de la intrusión y esto puede producir algún daño microestructural. Un tercer problema se conoce como el efecto botella de tinta, en el que un poro más grande está precedido en el camino de la intrusión de mercurio por un cuello más pequeño, produciendo curvas de distribución de tamaño de poro no reales, con alto volumen de poros más pequeños y pequeño volumen de poros más grandes. A pesar de estas limitaciones, la técnica de PIM es todavía una ayuda muy eficaz para la comparación de la estructura de poros y características de la red de poros de diferentes tipos de materiales a base de cemento (Valcuende et al., 2012).

Esta prueba se llevó a cabo a los 5 meses de la fabricación de los HAC, en muestras de un peso de aproximado de 6 g extraídas de probetas cubicas de 100x100x100 mm⁸. Los hormigones analizados fueron el H-0, el H-10, el H-20, el H-40 y el H-60 (figura 5.56).



Figura 5.56. Arriba preparado de probetas, abajo corte de las mismas

⁸ Para el hormigón H-60 la muestra no se extrajo de una probeta cubica sino de una probeta cilíndrica de 15 cm de diámetro.

De las probetas se extraen unos cilindros de 10 mm de diámetro de la zona central (figura 5.58). Tras el secado en estufa a 110°C , hasta peso estable, se colocan en un portamuestra. Se pesa el conjunto en una balanza de precisión y se coloca en el equipo de porosimetría y se hace una intrusión de mercurio a baja presión con un nuevo pesado. Por último, se vuelve a repetir el proceso, pero esta vez a alta presión. En la figura 5.57 se muestra esquemáticamente el proceso de aumento de la presión con la disminución del diámetro de poro penetrado.

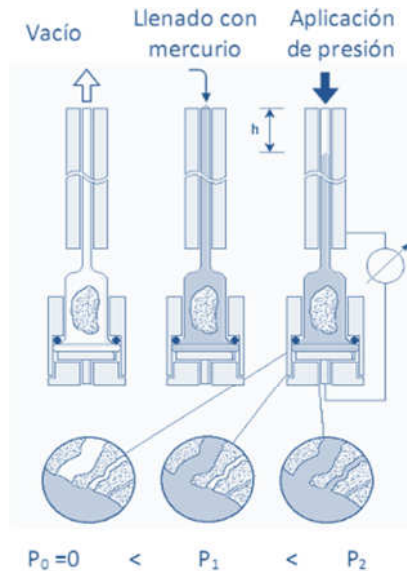


Figura 5.57. Procedimiento (León N. 2012)

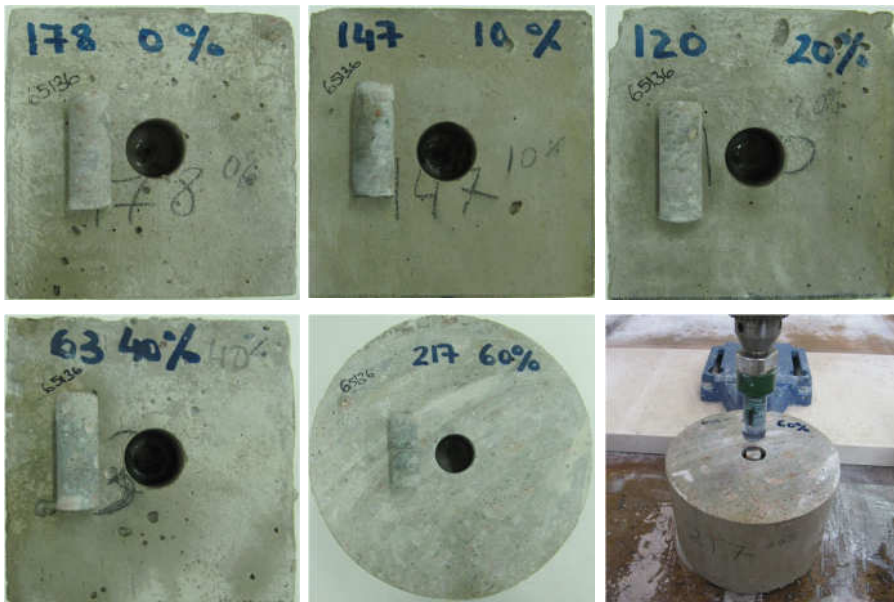


Figura 5.58. Extracción de los cilindros de HAC, del interior de las probetas

5.7. ENSAYOS DE RETRACCIÓN

5.7.1. Introducción

Para determinar retracción de los HAC se realizaron los ensayos de retracción autógena y total sobre probeta prismática de $100 \times 100 \times 400$ mm. Para obtener más información sobre este fenómeno, también se midieron la temperatura de fraguado, la pérdida de peso de las probetas por evaporación de agua y retracción de las probetas a edad temprana, en sus primeras 40 horas desde el fraguado. Para ello se determinó simultáneamente el tiempo de fraguado según la norma ASTM C 403-08 (ver apartado (5.6.4)).

Para determinar la retracción autógena, la mitad de las probetas fueron selladas con varias capas de película plástica para evitar la pérdida de humedad. Las que se utilizaron para medir la retracción total no fueron selladas. La retracción de secado se calcula por diferencia entre la retracción total y la autógena.

Las mediciones de retracción se realizaron mediante un reloj comparador de $1 \mu\text{m}$ de precisión, situado en la parte superior de la probeta (Fig. 4). El peso de las probetas se ha medido con una balanza de 0,1 gramos de precisión.

A continuación se profundiza en los ensayos realizados.

5.7.2. Ensayo de pérdida de peso en probetas

Las probetas destinadas al estudio de la pérdida de peso por evaporación de agua se introdujeron en una cámara climática. Tras ser desmoldadas (figura 5.59, izquierda), se han mantenido en posición vertical durante un año a 20 °C y HR del 50 %. El pesaje de las probetas se realizó de forma periódica con una balanza de 0,1 gramos de precisión (figura 5.59, derecha).



Figura 5.59. Izquierda, cámara climática modelo CTS. Derecha, balanza de pesaje

5.7.3. Evolución de temperatura del HAC durante el fraguado

Las probetas destinadas al estudio de la evolución de la temperatura se introdujeron, tras el hormigonado, en la cámara climática (figura 5.60, izquierda) donde se han mantenido durante 48 horas a 20 °C y HR del 50 %. La evolución de la temperatura, en el interior de la probeta, se determinó cada minuto con una sonda introducida en hormigón. El mismo dispositivo (termopar), modelo Data Logger de la marca Testo, además determina la temperatura ambiente (figura 5.60).



Figura 5.60. Izquierda, instalación en cámara climática. Derecha, termómetro digital

5.7.4. Ensayo de retracción a edad temprana

Para la realización del ensayo de retracción a edad temprana, las medidas se han empezado a tomar a partir del instante del final de fraguado del hormigón. Éste momento se determinó con el ensayo de inicio y final de fraguado (apartado 5.6.4). Se ensayaron 2 probetas por dosificación. Se colocaron en posición vertical en un cuarto con humedad y temperatura controlada. Se instaló sobre cada probeta un sensor para captar la deformación, con precisión de μm . Estos sensores son controlados por una unidad central con amplificador de la señal eléctrica, modelo midi LOGGR GL220 de la marca GRAPHTEC (figura 5.61). Éste registra y exporta las lecturas tomadas cada minuto durante las 40 horas del ensayo.



Figura 5.61. Derecha, montaje de las probetas con los sensores, unidad central y de amplificación. Izquierda, detalle de la unidad de control modelo midi LOGGR GL220 de la marca GRAPHTEC

5.7.5. Ensayo de retracción autógena y total

El objetivo de esta parte del trabajo es estudiar la retracción en los HAC fabricados con escorias siderúrgicas de alto horno como árido fino. Los ensayos realizados han sido, para cada uno de las siete dosificaciones, el ensayo de retracción total y el ensayo de retracción autógena. Para determinar la retracción autógena una probeta de cada tipo de hormigón se selló con varias capas de plástico para evitar la pérdida de humedad. La retracción total se midió en probetas sin sellar. El proceso de trabajo fue el siguiente:

-Tras el desmoldado de las probetas se protegen con bolsas de polietileno (figura 5.62a), para evitar pérdidas de humedad y se trasladan a una cámara climática.

- Se coloca cada probeta en posición vertical en un soporte con un comparador de $1\mu\text{m}$ de precisión situado en la parte superior de la probeta. Previamente se envuelve la probeta de retracción autógena con varias capas de film o plástico fino (figura 5.62).

-La probetas instaladas en el soporte se colocan en la cámara climática, de tal forma que sean visibles desde el exterior sin necesidad de abrir la cámara.

-Finalmente las 14 probetas, 7 para retracción autógena y 7 para total, con sus soportes y comparadores se encuentra ubicados en el interior de la cámara.



Figura 5.62 (a, b, c, d y e). Preparación de probetas para retracción

La cámara climática utilizada, modelo Dycometal CCK 480, se programó para toda la fase experimental a temperatura y humedad constante, 20°C y 50%, respectivamente. Además, el procesador de la cámara climática está conectado con un ordenador, al cual se le ha instalado un programa de control climático. Éste deja reflejado los cambios que pudieran surgir, bien por falta de suministro eléctrico o por apertura de la compuerta de la cámara. En la figura 5.63 se muestra la gráfica que se genera continuamente, 24 horas al día. La temperatura se representa en la parte inferior en verde y en rojo se representa la humedad, destacando en la imagen un gran pico (alteración de la humedad) producido al introducir en la cámara las dos últimas probetas.

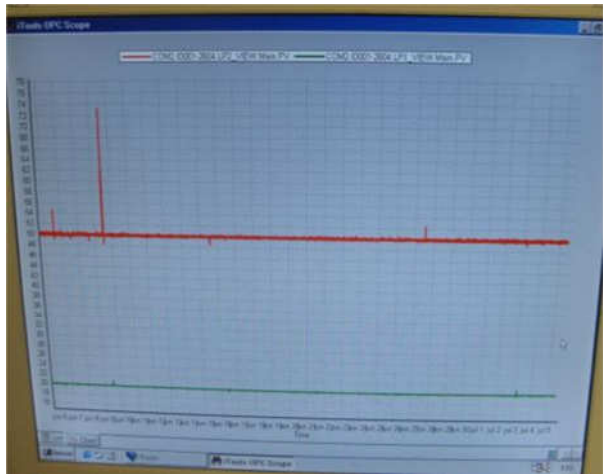


Figura 5.63. Gráfica de temperatura y humedad con el paso del tiempo de la cámara climática

En los primeros 20 días se realizó una toma de datos cada 24 horas, 7 días a la semana. Posteriormente se redujo la toma de datos a 5 veces por semana, reduciéndose a 2 a partir de los 4 meses. Las lecturas de cada comparador se hicieron con precisión de μm . Esta toma de datos se prolongó durante un periodo de 12 meses.

Capítulo 6. Resultados y discusión

A continuación se muestran los resultados y discusión de los ensayos de retracción realizados sobre los HAC con diferentes cantidades de árido fino de cantera sustituido por EGAH. Además, se ha analizado la reología, el acabo superficial, la resistencia a compresión, la resistencia a tracción, el módulo de deformación y la porosidad de las 7 dosificaciones realizadas, así como otros ensayos complementarios que ayudan a comprender los resultados de los ensayos anteriores. En los siguientes apartados se muestran los resultados de todos ellos.

6.1. ESTRUCTURA POROSA DE LOS HAC. POROSIMETRÍA CON INTRUSIÓN DE MERCURIO

Los ensayos de porosimetría con intrusión de mercurio (MIP) se realizaron a los 5 meses de la fabricación de los HAC. En la figura 6.1 se muestra la distribución de los diferentes tamaños de poros para cada sustitución de árido calizo fino por EGAH. En la figura 6.2 se muestra la distribución acumulativa de la porosidad de cada hormigón.

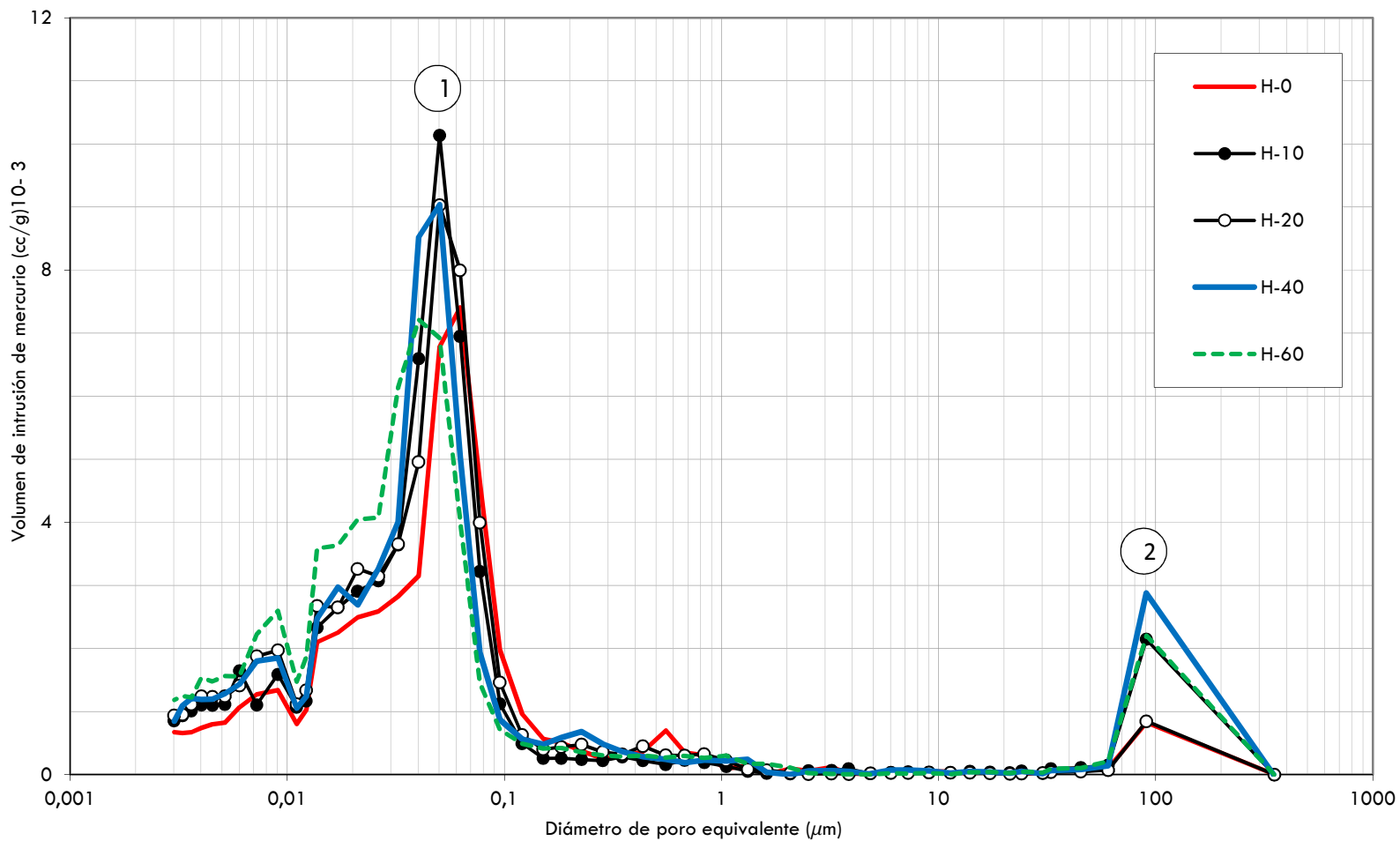


Figura 6.1. Distribución dimensional de los poros de las muestras de HAC

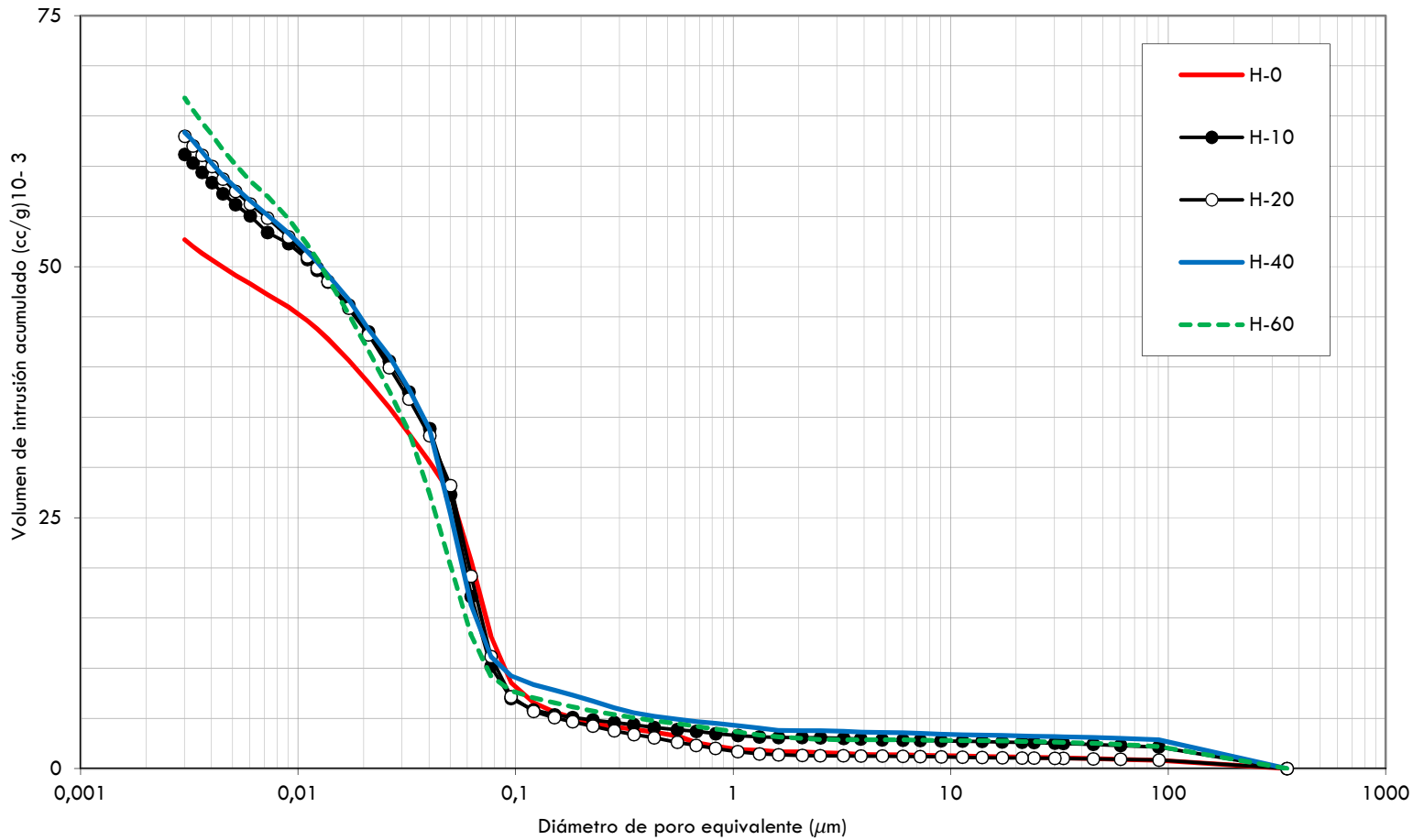


Figura 6.2. Distribución dimensional acumulativa de los poros de las muestras de HAC

En todos los HAC, la distribución de volumen del poro sigue un patrón similar, cada curva tiene dos picos: uno alrededor de tamaños de poro de 90 μm (pico N° 2) y otro, mucho más pronunciado, alrededor de tamaños 0.05 μm (pico N° 1). La estructura porosa de todos los hormigones analizados es muy similar. Las pequeñas diferencias entre las distintas dosificaciones sólo se observa en el volumen de poros capilares más pequeños (0,01 - 0,1 μm). El volumen de poros superiores a 0,1 μm de diámetro es muy similar en todos los hormigones, si bien la cantidad de poros más pequeños es mayor cuanto mayor es el porcentaje de árido sustituido por escoria (figura 6.6), lo que da lugar a un mayor volumen total de poros en los hormigones fabricados con más cantidad de escoria (figura 6.2 y tabla 6.1). Dado que la única diferencia entre los distintos hormigones es el tipo de arena utilizada (caliza o escoria), el incremento de porosidad en los hormigones con arena siderúrgica es debido principalmente a un peor empaquetamiento de los áridos, ya que las escorias tienen una forma muy angulosa (figura 3.6 del capítulo 3) y presentan una granulometría con escasa presencia de partículas inferiores a 0,5 mm, lo que da lugar a mezclas de menor compacidad. Además, la mayor porosidad de los HAC con EGAH es influida por la alta porosidad de ésta¹ (8% de absorción).

Ahora bien, gracias a la reactividad de las escorias, el volumen de productos hidratados aumenta con el paso del tiempo (formación lenta de CSH), densificándose la zona interfacial árido-pasta, que es la zona donde la porosidad es mayor y los poros capilares son más grandes que los de pasta de cemento (Ollivier, 1995; Valcuende et al., 2012). Los

¹La mayor absorción de la EGAH, frente al árido calizo, hace que la EGAH introduzcan en la mezcla gran cantidad de agua libre que terminara por evaporarse y producir una mayor interconexión capilar al migrar el agua en el interior del hormigón. Esto junto a la propia porosidad de la EGAH contribuyen a la mayor porosidad de los HAC fabricados con estos áridos siderúrgicos.

nuevos productos hidratados generados por la EGAH penetran y refinan los poros existentes inicialmente, por lo que a mayor cantidad de EGAH mayor es la formación de CSH y mayor es el refinamiento que se produce en los poros de los HAC. Esta hidratación de la escoria fue estudiada en los ensayos de microscopía electrónica de barrido (apartado 6.2.1) y en ensayos de compresión con morteros con EGAH molida en sustitución de parte del cemento portland (apartado 6.2.3), obteniendo en los morteros que a 365 días la escoria genera similares productos hidratados resistentes que el propio cemento portland utilizado. Es decir, la utilización de escoria como árido da lugar a mezclas ligeramente más porosas, pero con una estructura porosa algo más fina (tabla 6.1 y figura 6.5). Para los poros $<0,01 \mu\text{m}$, el H-60 cuenta con más del 180% (14,60 mm^3/g) del volumen de poros frente al H-0 (8,05 mm^3/g). Este aspecto es importante ya que según Kumar y Bhattacharjee (2003) los poros más pequeños no influyen en las propiedades resistentes del hormigón pero sí que están directamente relacionados con la retracción y la fluencia. De forma similar se pronuncia De Schutter et al. (2008), añadiendo que los poros capilares determinan principalmente el comportamiento permeable del hormigón.

Tabla 6.1. Volumen de intrusión ($\text{cc/g} \cdot 10^{-3}$), por grupos de poros

	H-0	H-10	H-20	H-40	H-60
3nm - 0,01 μm (Poros de gel)	8,05	10,46	11,98	11,91	14,60
0,01-0,1 μm (Capilares pequeños)	38,04	44,87	45,29	43,12	45,13
0,1-1 μm (Capilares medianos)	4,66	2,55	4,01	4,10	3,40
1-10 μm (Capilares grandes)	0,66	0,56	0,55	0,89	0,85
90 - 10 μm (Macroporos)	1,25	2,73	1,13	3,37	2,80
Total	52,67	61,17	62,97	63,39	66,79

También puede verse en la figura 6.1 que el diámetro de poro a partir del cual aumenta rápidamente la intrusión de mercurio varía ligeramente entre las mezclas. Este valor, conocido como el diámetro

umbral de poro, señala el límite a partir del cual se concentran el mayor número de poros y por lo tanto es un buen indicador de la finura de la estructura porosa. En este trabajo, el diámetro umbral es el diámetro más pequeño con una intrusión diferencial de volumen $> 0.001 \text{ cm}^3/\text{g}$ (Feldman, 1991). De nuevo se observa que a medida aumenta el contenido de escoria el diámetro umbral tiende a disminuir. Así, por ejemplo, en H-0, H-20, H-40 y H-60 el diámetro umbral es respectivamente igual a 0,10, 0,15, 0,12 y 0,09 μm . Otros dos parámetros importantes relacionados con la finura de la estructura porosa son el tamaño de poro correspondiente a la máxima concentración de poros y el tamaño medio de poro. En la figura 6.1 se observa que en el H-0 la máxima concentración de poros (pico N° 1) se produce para un tamaño de poro ligeramente mayor que en los HAC con escoria. Por ejemplo, en el H-0 este tamaño de poro es de 0,065 μm y para el H-10, H-20, H-40 y H-60 la máxima concentración de poros se sitúa en 0,05, 0,05 y 0,05 0,04 μm , respectivamente. Además, el tamaño medio de poro también es más pequeño en los HAC con escoria, y tanto más pequeño cuanto mayor es el contenido de escoria (tabla 6.2). De forma inversa ocurre con la porosidad total de los HAC, aumentando con el aumento de la cantidad de escoria utilizada, con la consecuente bajada de densidad aparente de las muestras.

Tabla 6.2. Características de la porosidad de las mezclas de HAC

	H-0	H-10	H-20	H-40	H-60
Volumen total de intrusión (mm^3/g):	52,7	61,2	62,3	63,4	66,8
Área total de los poros (m^2/g):	10,3	13,3	14,3	15	17,2
Diámetro medio de poro (μm):	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03
Diámetro Umbral (μm):	0,15	0,12	0,12	0,11	0,09
Porosidad total (%):	11,91	13,51	13,88	13,91	14,57

De forma similar a la porosidad total de los HAC, la menor densidad de la escoria frente a la del árido calizo y su peor empaquetamiento hace que la densidad aparente de las muestras analizadas con intrusión de mercurio (MIP) disminuya con el aumento de la cantidad de escoria, coincidiendo estos valores con los obtenidos en la medición de densidades realizadas a las probetas de HAC (tabla 6.3 y figura 6.3).

Tabla 6.3. Valores de densidad aparente (MIP) y densidad calculada en las probetas

	Nº	Promedio Densidad (Kg/m ³)	Desviación Estándar	Coefficiente Variación	Ensayo porosimetría. Densidad aparente (g/mL)
H-0	12	2330,5	13,55	0,58%	2,26
H-10	12	2316,1	11,68	0,50%	2,25
H-20	12	2316,9	11,66	0,50%	2,19
H-30	11	2300,3	6,32	0,27%	
H-40	10	2297,9	11,99	0,52%	2,19
H-50	12	2294,2	7,71	0,34%	
H-60	12	2292,3	9,42	0,41%	2,14
Total	81	2307,2	16,95	0,73%	

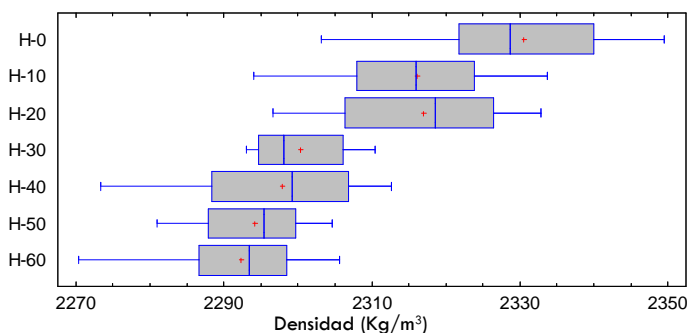


Figura 6.3. Gráfica de cajas y bigotes de densidades de los HAC

En la figura 6.4 se muestra la correlación entre ambas densidades, la medida sobre probetas de HAC y las obtenidas con técnicas de intrusión de mercurio.

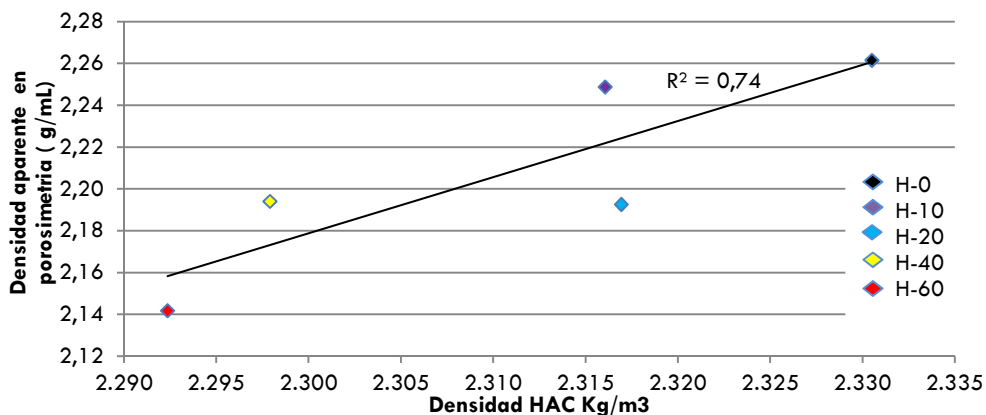


Figura 6.4. Relación entre densidad aparente obtenida en ensayos de porosimetría y densidad calculada en los HAC previos a la realización de ensayos a compresión

En la figura 6.5 se muestran los resultados de porosimetría (volumen de intrusión de mercurio en $(\text{cc/g})10^{-3}$), agrupándose los resultados por grupos de poro para cada HAC ensayado. En las columnas se muestran las cantidades de poros para cada grupo. Las alturas totales de cada columna representa la porosidad total de cada HAC sin incluir los poros menores de 3 nm (parte de los interlaminares o de gel) por que se encuentran fuera del rango analizable por la porosimetría con intrusión de mercurio (entre 3nm y 90 μm). Los grupos de poros formados son macroporos, capilares grandes, capilares medianos y capilares pequeños y poros de gel.

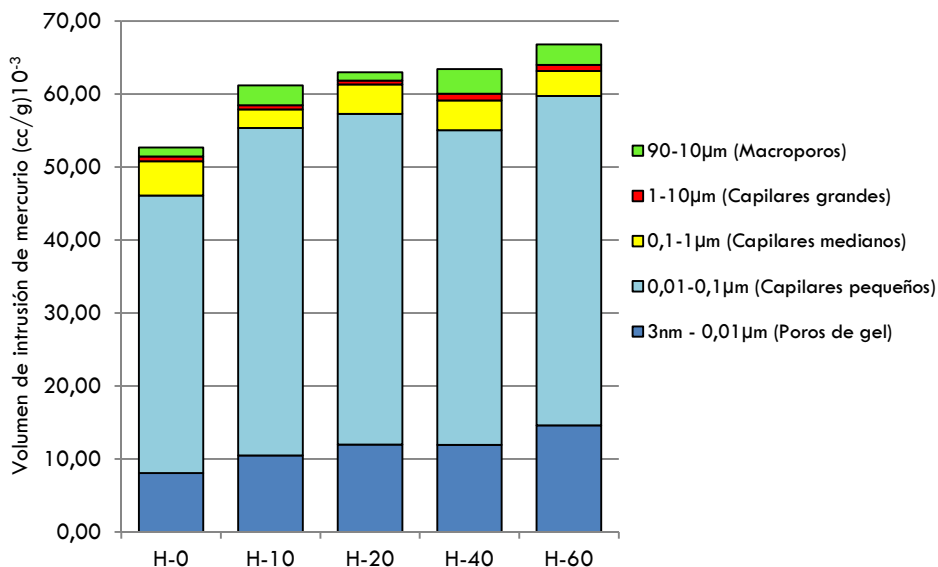


Figura 6.5. Porosidad acumulada de los diferentes HAC, por diámetros de poro

En la figura 6.6 se muestran los resultados de porosimetría en histograma para los poros capilares más pequeños y los de gel. Se observa como aumenta, con el aumento de la cantidad de EGAH, los poros menores de $0,01\mu\text{m}$, los que más influyen en la retracción de los hormigones.

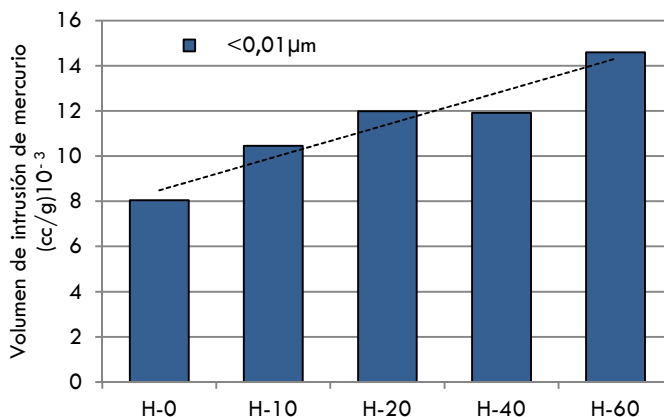


Figura 6.6. Volumen de poros $<0,01\mu\text{m}$ de los diferentes HAC

Como resumen de todo lo indicado se destaca que con la utilización de escoria como árido da lugar a hormigones más porosos, pero con un tamaño de poros menor, coincidente con lo indicado por Helmuth et al. (2006), influyendo esto significativamente en la retracción de los hormigones y no tanto en sus propiedades resistentes (Kumar and Bhattacharjee, 2003 y Mehta et al. 2006) y así se ha constatado en la investigación. Para el H-60, con la mayor porosidad total y su volumen mayor de poros capilares pequeños y medianos se han obtenido las mayores resistencias a compresión a 365 días a la vez que también se han obtenido las mayores retracciones, tanto autógena como total. Estos resultados son similares a los obtenidos en investigaciones que utilizan la EGAH como adicción (Aitcin, 2008 y Ambrosia, 2005), debido a que la resistencia mecánica se ven más influidas por los poros de mayor tamaño de forma inversa a lo que ocurre con la retracción que se ve influida por el radio medio del poro, el radio umbral del poro y el refinamiento de la estructura porosa, sobre todo de la retracción autógena (Seddik y Tagnit-Hamou, 2009).

6.2. REACTIVIDAD DE LOS ÁRIDOS

Esta parte experimental pretende estudiar cómo influye la microestructura y sobre todo la interfaz árido-pasta que se genera por el uso de la EGAH como árido. Esto permite una mejor interpretación al resto de ensayos realizados, en especial los de propiedades mecánicas, de porosidad y de retracción. Los ensayos a nivel microscópico se realizaron a las edades de 7, 28, 60 y 120 días, con el objeto de ver la evolución de la reactividad de la escoria y la participación de ésta en la fase resistente de la microestructura. Para el estudio de la interfaz árido-pasta se han utilizado técnicas de microscopía electrónica de barrido y de microscopía de fuerza atómica. En el anexo 8 se muestra una ampliación de lo mostrado en el punto 6.2.1 y 6.2.2.

Además, se realizaron ensayos de compresión sobre morteros para analizar la influencia de la EGAH molida en la formación de compuestos hidratados (actividad hidráulica) en presencia de cemento Portland. Se plantearon 4 dosificaciones y se ensayaron a 2, 8, 28, 90 y 365 días de su elaboración.

6.2.1. Microscopía electrónica de barrido

A continuación se muestran una serie de imágenes tomadas con el microscopio electrónico de barrido a diferentes aumentos y todas ellas de la zona de transición árido-pasta². Además, se muestra el

²Esta parte experimental, junto con la microscopía de fuerza atómica, pretende estudiar cómo influye en la microestructura, y sobre todo la interfaz árido-pasta, el uso de la EGAH como árido y dar una mejor comprensión al resto de ensayos.

difractograma de la zona inspeccionada, con todos los elementos químicos que la componen (análisis mineralógico). Hay que indicar que la presencia de oro (Au) en los resultados es únicamente por la preparación de la muestras, al hacerlas conductoras.

Como se indicó en el capítulo 5, para todas las muestras utilizadas en este ensayo se utilizó granulometrías de árido muy acotado, entre 0,063 y 0,085 μm , para una mejor identificación de los áridos a grandes aumentos. Se utilizó muestras de mortero con árido calizo, árido silíceo y EGAH.

En este apartado se muestra los resultados de 6 de las inspecciones realizadas. En el anexo 7 se muestran algunas otras.

Del análisis de todas las inspecciones realizadas se destaca la reactividad de la EGAH obtenida en las muestras que la utiliza. En las figuras 6.9 y 6.11 se muestra la interfaz EGAH-pasta a 28 días (a 1.300 aumentos) y su análisis comparativo de la composición de elementos significativos (Ca, Mg, Al y Si). En este análisis y en el mapping de la figura 6.12 se puede observar la presencia de Aluminio y Magnesio en la pasta junto a la EGAH³ (interfaz). En la figura 6.13 se observa la misma muestra a 28 días a 5.000 aumentos, donde se delimita claramente una franja de la zona interfaz de en torno a 2,5 μm de anchura en la que se han detectado gran cantidad de átomos de Al y Mg. A 120 días esta franja tiene unos 5 μm de anchura. Las mayores concentraciones de Al en esta franja equivalen al 50% de la concentración de estos átomos en la propia escoria. La concentración de átomos de Mg en torno a la EGAH es similar a la presente en ella.

³En la hidratación de la EGAH se forman nuevos compuestos con presencia de Al y Mg, como la mullita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) o la brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$).

La presencia de Al y Mg en la interfaz escoria-pasta es muy significativo para determinar la reactividad de la EGAH por la casi nula presencia de estos elementos en la composición original de la pasta, tal y como se observa en la muestran con árido silíceo en la figura 6.16. En ella se muestra la imagen de la interfaz de un árido de sílice a 120 días con su análisis comparativo de la composición elemental de Ca, Mg, Al y Si.

La presencia de nuevos compuestos en el ensayo de difracción de rayos X como la mullita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) en la pasta en la que se utilizó EGAH, a diferencia de en la que se utilizó árido de sílice inerte, hace que los nuevos compuestos que se forman rellenen, refinan y densifiquen la porosidad de la pasta situada junto a áridos de EGAH, tal y como se obtuvo en los ensayos de porosimetría con intrusión de mercurio. En los hormigones con más cantidad de EGAH se obtuvo una estructura porosa más fina. De igual forma, tanto en los ensayos de microscopía electrónica de barrido y de nanoindentación se comprobó, como se verá más adelante, una difusión de componentes de la EGAH y mejora de las propiedades mecánicas en una franja de $5 \mu\text{m}$ de la interfaz.

Además, la hidratación de la escoria fue estudiada en morteros con EGAH molida en sustitución de parte del cemento portland (apartado 6.2.3), obteniendo a 365 días que la escoria genera similares productos hidratados resistentes que el propio cemento portland utilizado.

a) Arena silícea. Interfaz árido-pasta (x1.000 y x3.500)

En la figura 6.7 se muestra la interfaz formada entono a un árido silicio, a 1.000 aumentos a la izquierda y a 3.500 a la derecha. En la figura 6.8 se muestra el difractograma con todos los elementos químicos que componen la muestra (análisis mineralógico).

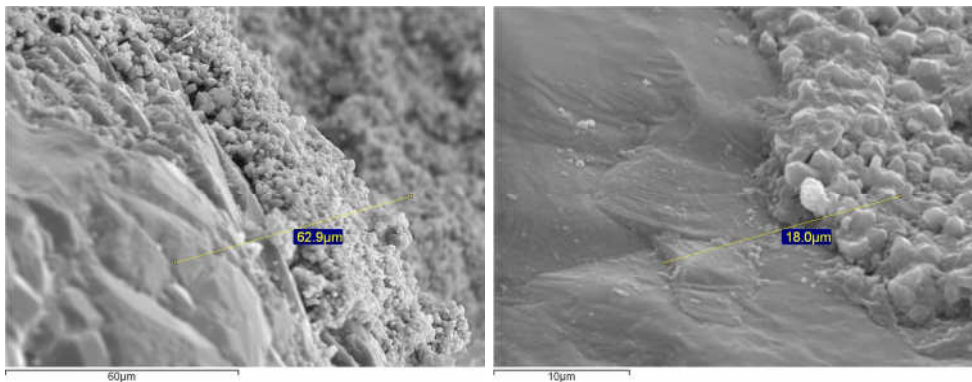


Figura 6.7. Izquierda y derecha, imagen SEM de la interfaz de un árido silicio a 1.000 y 3.500 aumentos respectivamente

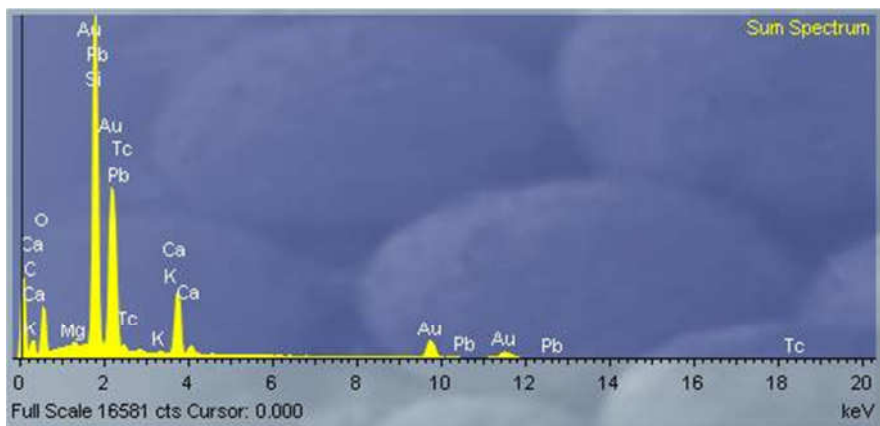


Figura 6.8. Difractograma con los elementos químicos que componen las muestra analizada

b) Arena caliza y EGAH. Interfaz árido-pasta (x 1.000)

En la figura 6.9 se muestra una comparativa entre un árido calizo y un árido de EGAH, ambos a 1.000 aumentos y a 7 días de su elaboración, con un tamaño de partícula muy similar. En la figura 6.10 se muestra el difractograma con todos los elementos químicos de la muestra de EGAH.

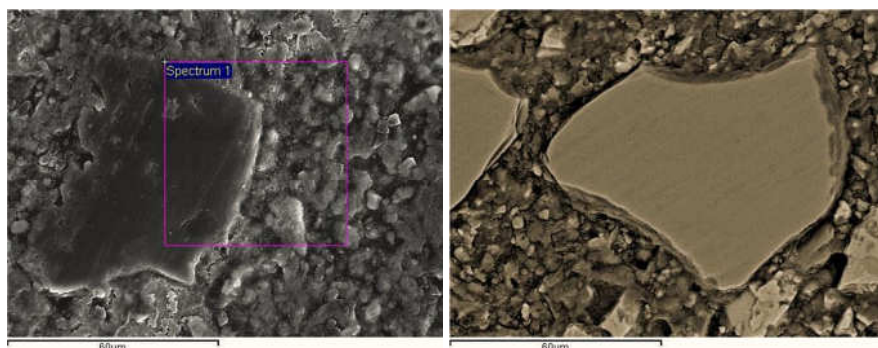


Figura 6.9. Imagen SEM a 1.000 aumentos de árido calizo y EGAH (izquierda y derecha respectivamente)

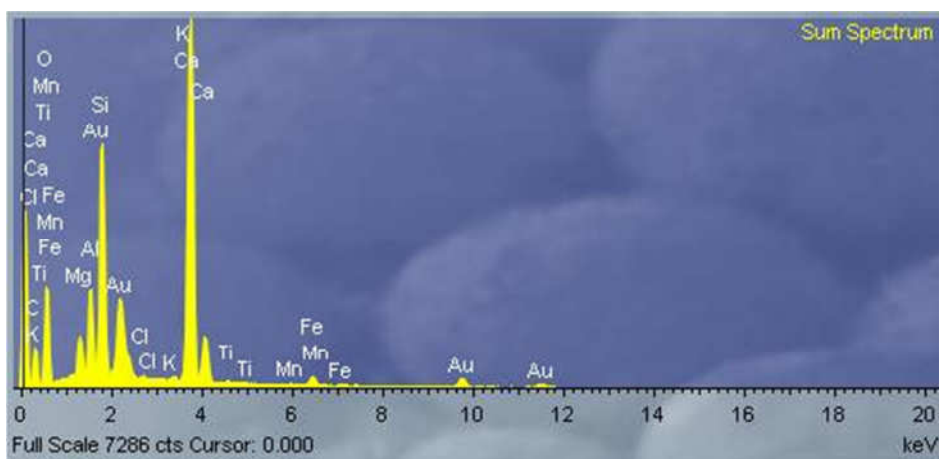


Figura 6.10. Difractograma con los elementos químicos que compone la muestra con EGAH

c) Interfaz EGAH-pasta a 28 días (x 1.300 y x 5.000)

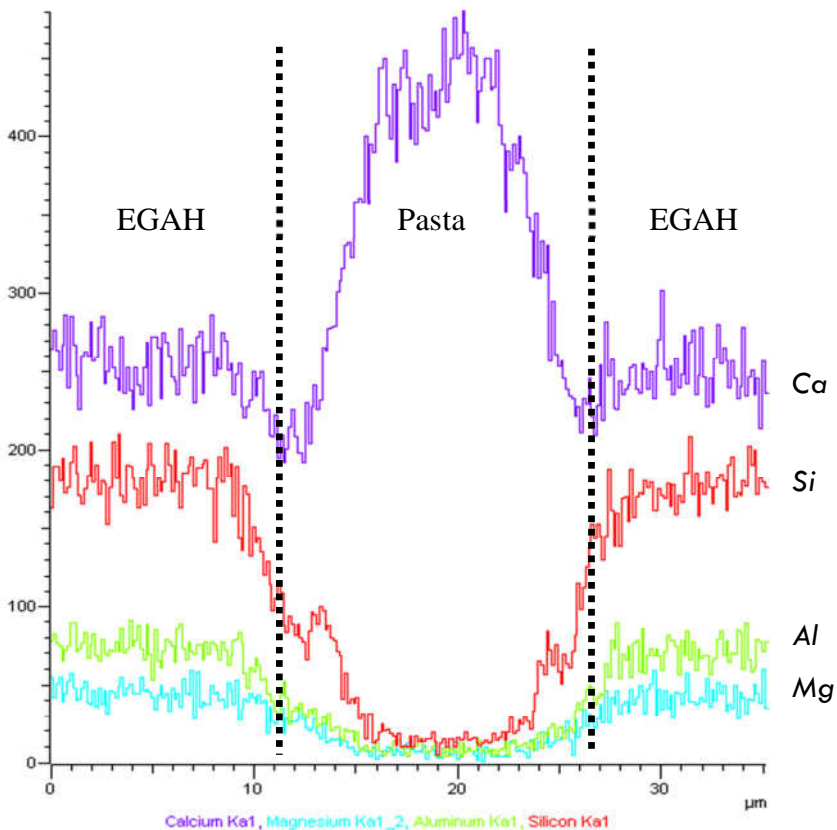
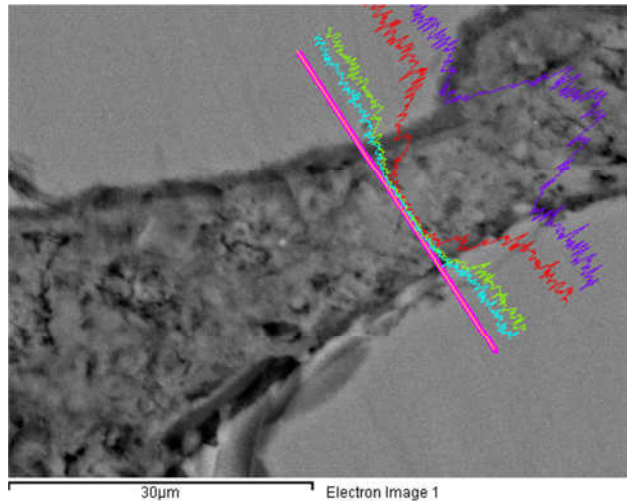


Figura 6.11. Arriba y abajo, imagen SEM de la interfaz de un árido de EGAH a 1.300 aumentos y su análisis comparativo de la composición elemental de Ca, Mg, Al y Si

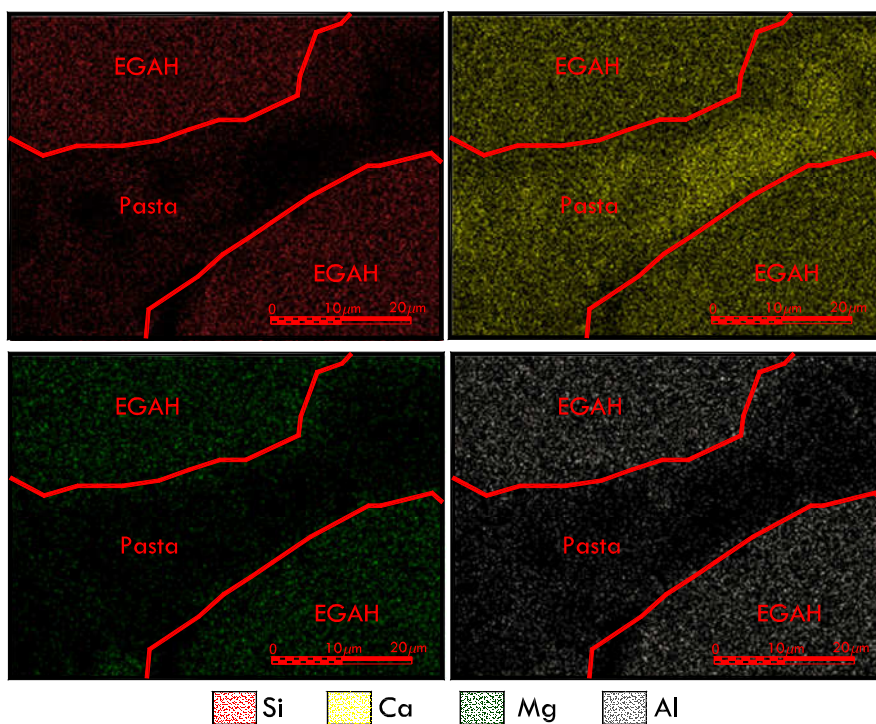
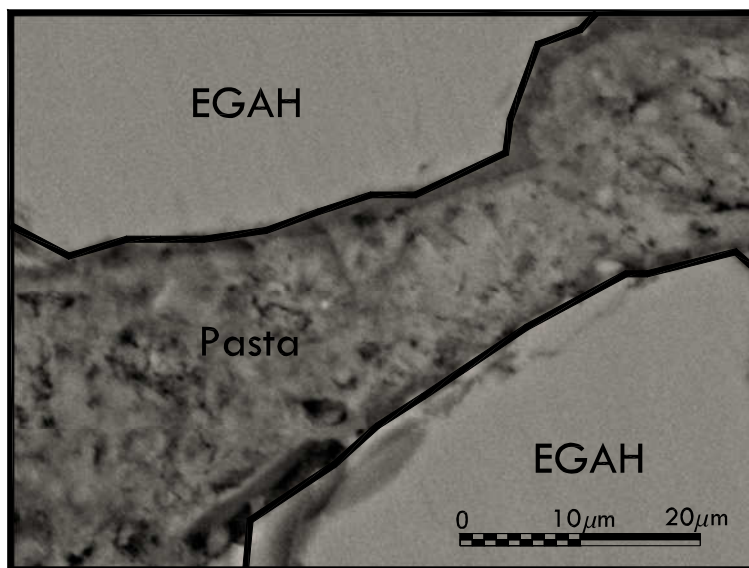


Figura 6.12. Arriba, imagen SEM a 1.300 aumentos del mortero con EGAH a los 28 días. Abajo, mapping de los principales átomos de la EGAH (Mg, Al, Si y Ca)

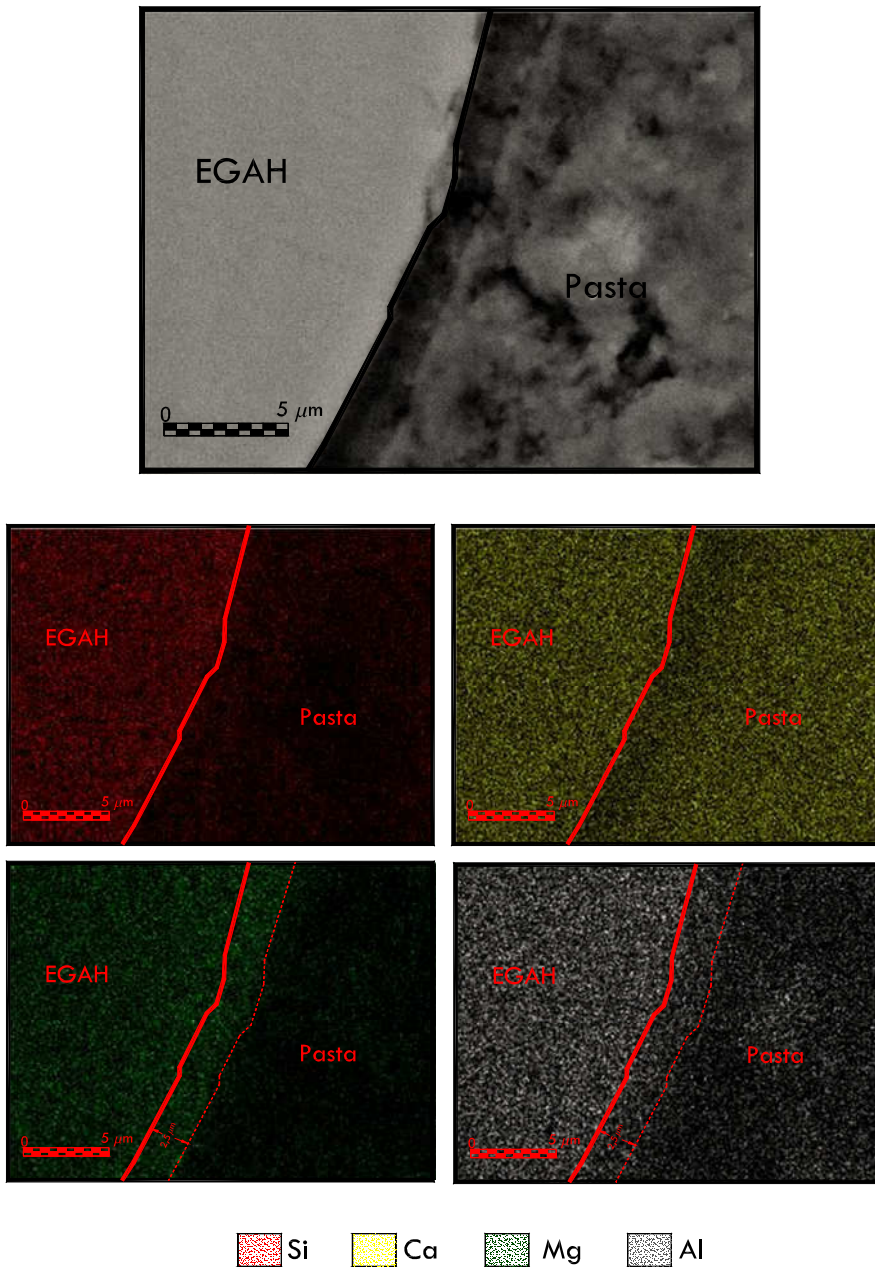


Figura 6.13. Arriba, imagen SEM a 5.000 aumentos del mortero con EGAH a los 28 días. Abajo, mapping de los principales átomos de la EGAH (Mg, Al, Si y Ca)

d) Interfaz EGAH-pasta a 120 días (x 1.300)

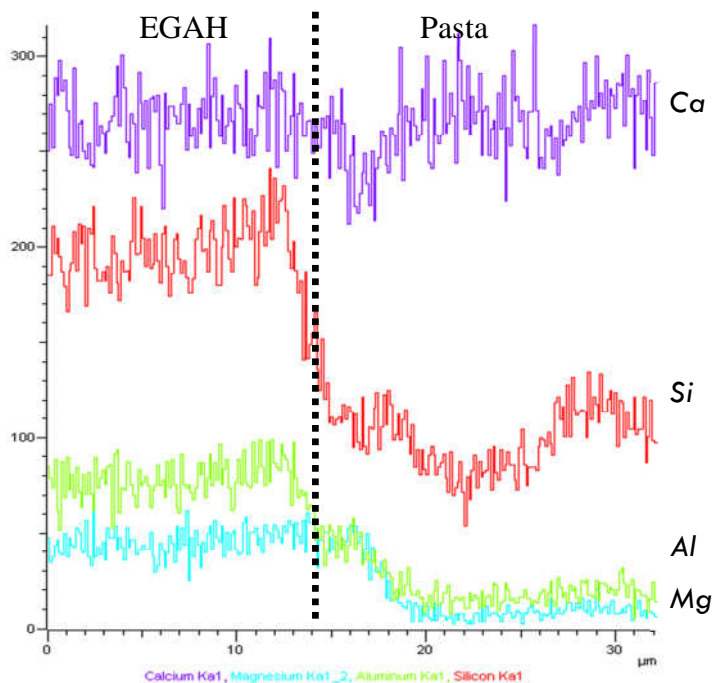
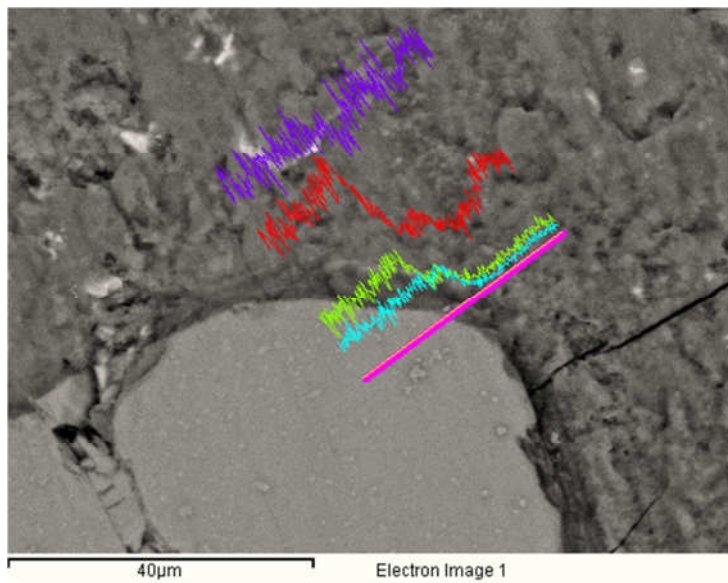


Figura 6.14. Arriba y abajo, imagen SEM de la interfaz de un árido de EGAH a 120 días a 1.300 aumentos y su análisis comparativo de la composición elemental de Ca, Mg, Al y Si

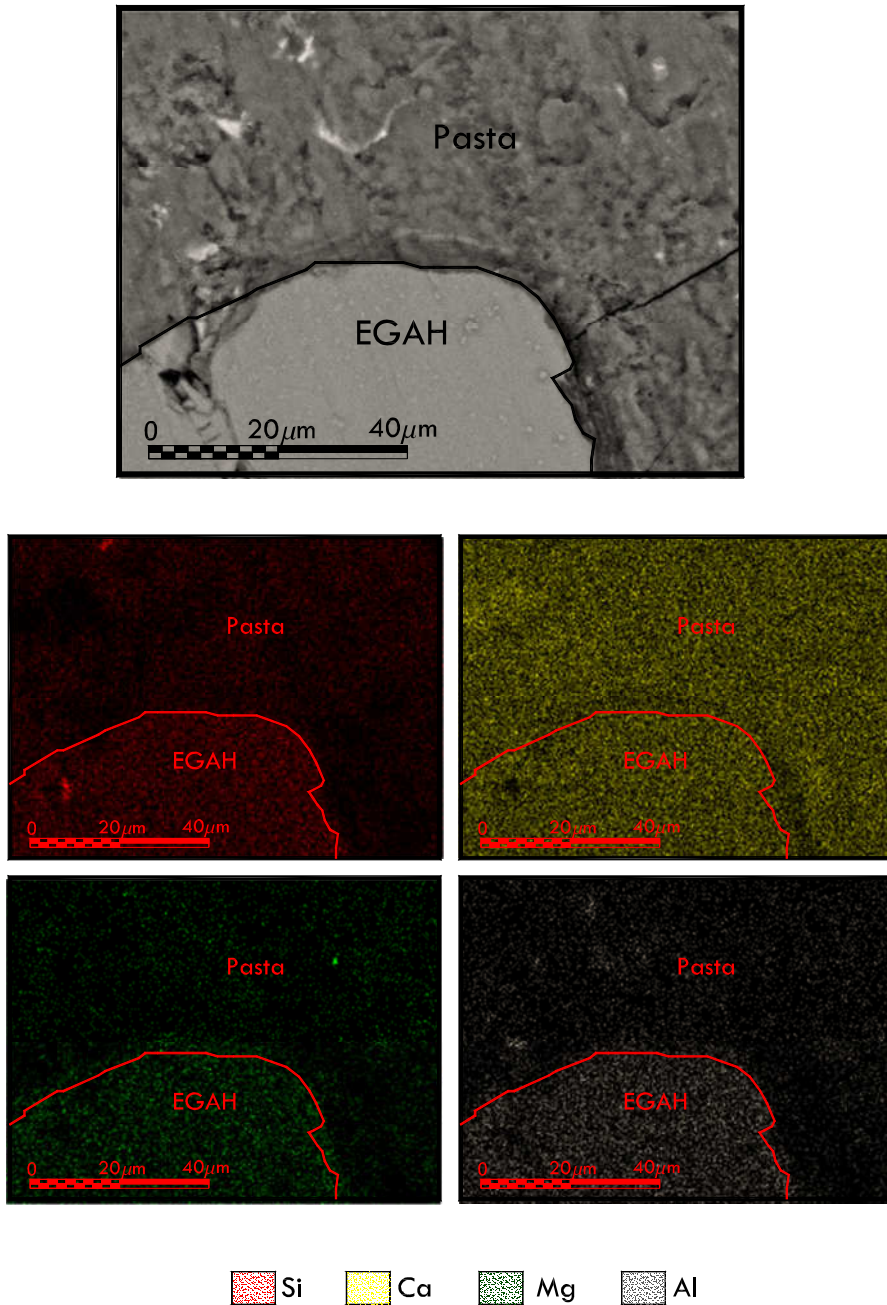
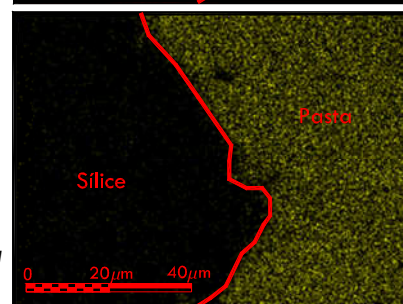
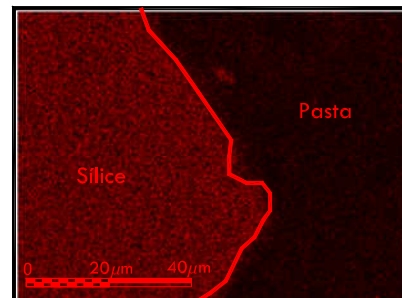
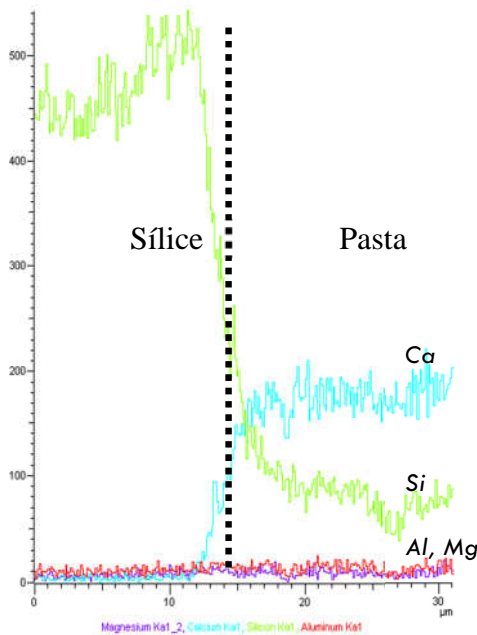
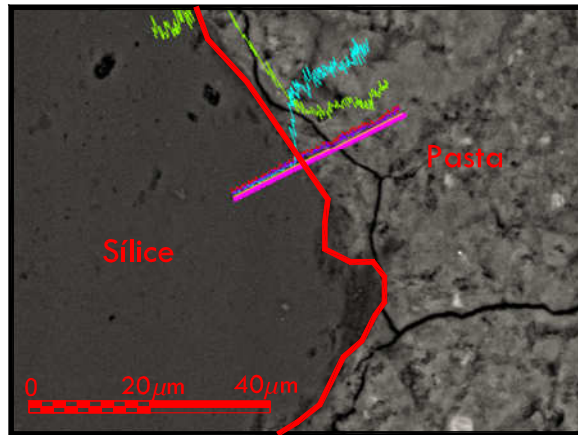


Figura 6.15. Arriba imagen SEM con 1.300 aumentos del mortero con EGAH a los 120 días. Abajo, mapping de los principales átomos de la EGAH (Mg, Al, Si y Ca)

e) Interfaz sílice-pasta a 120 días (x 1.300)



■ Si ■ Ca

Figura 6.16. Arriba y abajo, imagen SEM de la interfaz de un árido de sílice a 120 días a 1.300 aumentos, su análisis comparativo de la composición elemental de Ca, Mg, Al y Si y mapping con los elementos de Ca y Si

6.2.2. Microscopio de fuerza atómica

El Microscopio de fuerza atómica (Atomic Force Microscope, AFM, figura 6.17) es un instrumento mecano-óptico capaz de detectar fuerzas de atracción del orden de los nanonewtons, de registrar la topografía (nanométrica) de la muestra y de obtener el módulo de deformación de cada punto inspeccionado (Quantitative Nano-mechanical).

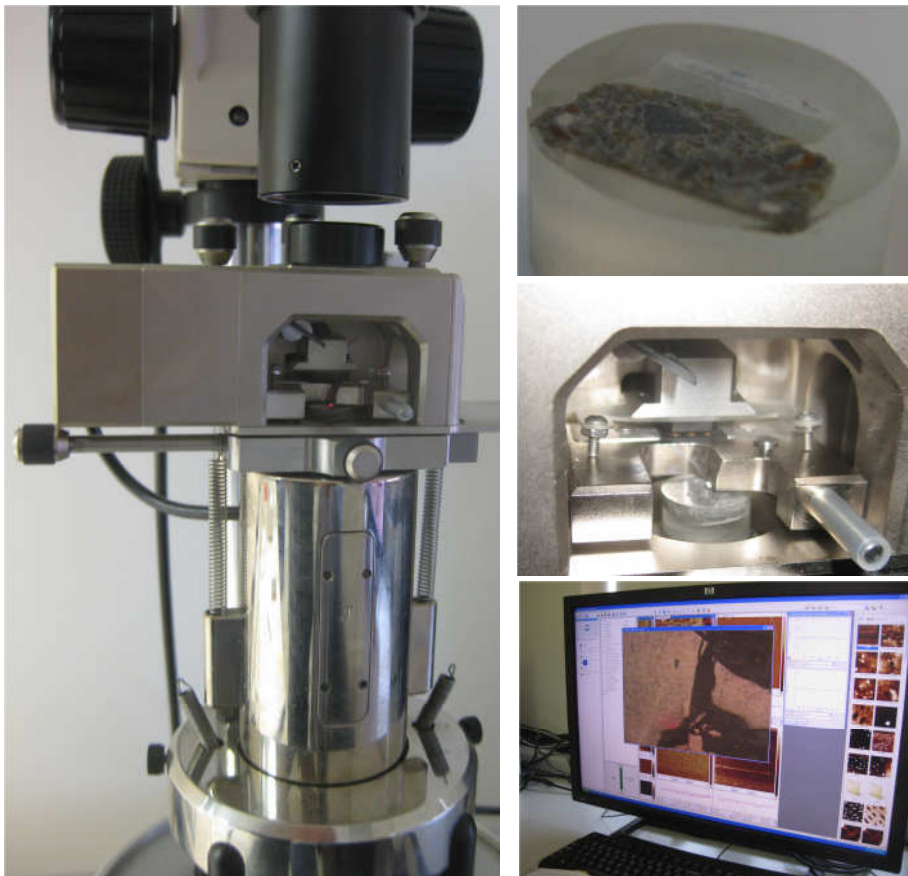


Figura 6.17. Vistas del microscopio de fuerza atómica y de una de las muestras utilizadas

Se han realizado varias inspecciones sobre muestras con árido calizo, árido silíceo y con EGAH. En la figura se muestran los resultados medios del módulo de deformación de dos de las muestras. Los resultados corresponden a un área de barrido de $30 \times 20 \mu\text{m}$. A la izquierda de la figura, en las primeras $5 \mu\text{m}$ de inspección, se representa el módulo de deformación obtenido del árido silíceo y el de la EGAH. El resto de inspección ($26 \mu\text{m}$) se realizó sobre la zona de pasta de las muestras. En general, entre ambas inspecciones, se observan resultados similares, observándose un incremento en el módulo de deformación de hasta 12 GPa en una franja de la interfaz de $5 \mu\text{m}$ de anchura, junto a la EGAH (figura 6.18).

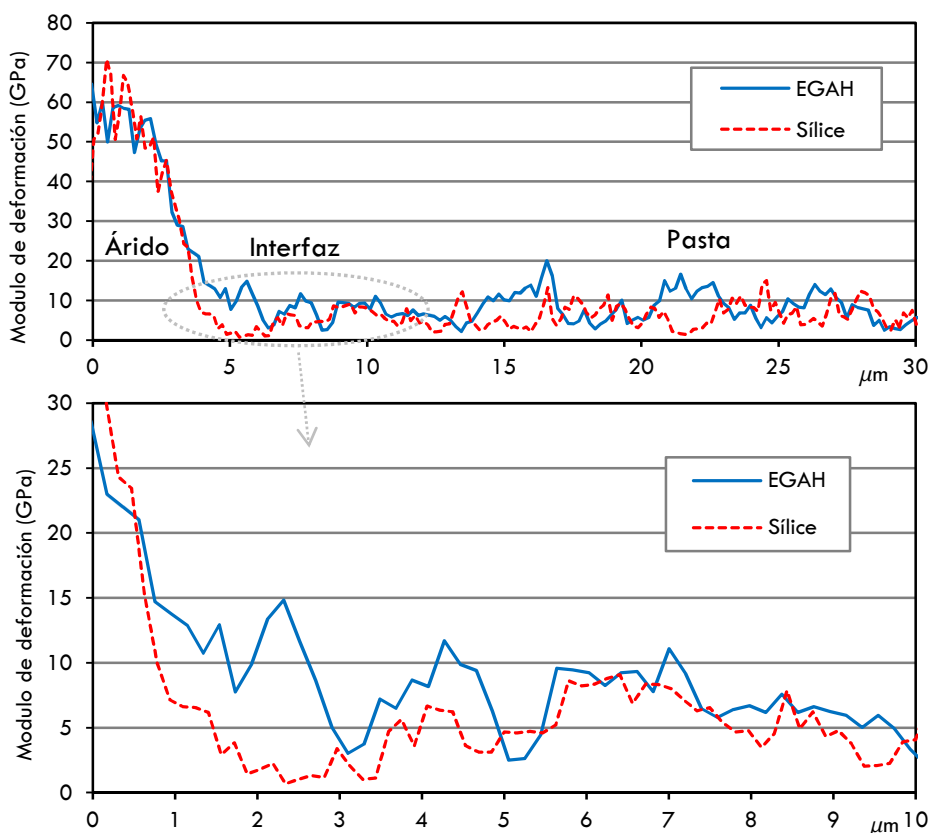


Figura 6.18. Arriba y abajo, resultados medios del módulo de deformación

Se ha observado una relación entre los valores topográficos de cada punto de la inspección y sus correspondientes valores de módulo de deformación. Esto se puede deber al proceso de preparación de las muestras, donde se realiza un pulido mecánico. Ante un mismo esfuerzo de pulido, cuanto menos resistentes son las partículas más se desprenden y por tanto la altura de esa zona desciende más que la zona de partículas más resistentes. En la figura 6.19 se observa lo indicado en una muestra de árido calizo (arriba) y otra de EGAH (abajo). En ambas muestras queda delimitado perfectamente los áridos inspeccionados, quedando la pasta en torno a $0,5\mu\text{m}$ más hundida que los áridos tras el pulido de la muestra. La zona de unión entre el árido y la pasta (interfaz), por su menor resistencia y mayor desprendimiento de partículas en el pulido, queda a menor altura que la pasta. Esta zona de menor altura de la interfaz árido-pasta es ligeramente más ancha en la muestra de árido calizo que en la de EGAH (zona sombreada de la figura 6.19).

En la figura 6.20 se muestra un estudio topográfico de las mismas muestras, arriba la muestra con árido calizo y abajo la de EGAH. En cada uno se incluye una imagen de la muestra donde se señalan 3 perfiles topográficos (trazos blancos horizontales). Estos son mostrados a su derecha y diferenciados por trazos de diferente color (azul, rojo y verde) con ejes de referencia en μm . Bajo el perfil se muestra una tabla con diferentes parámetros geométricos de la inspección topográfica realizada.

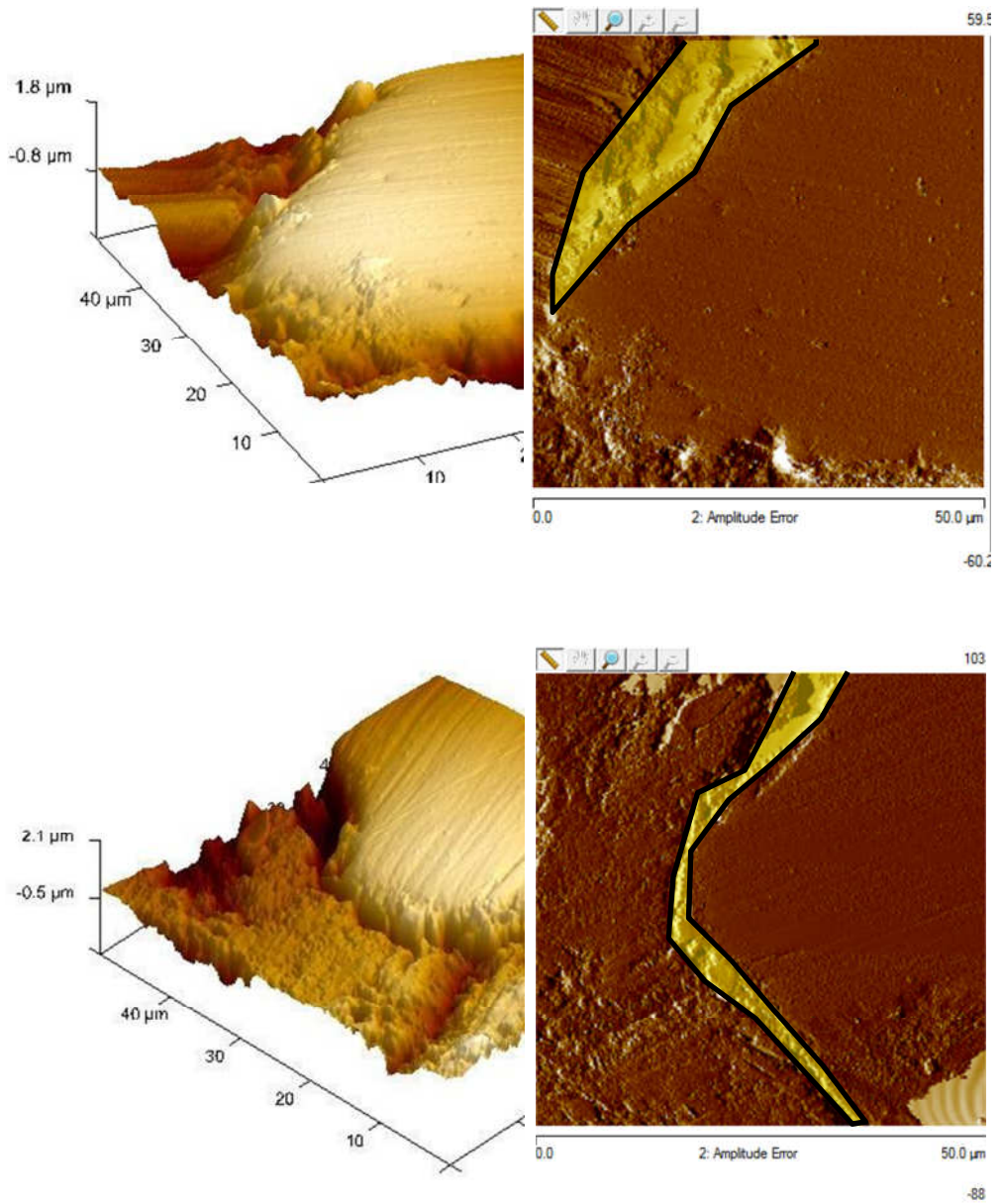


Figura 6.19. Arriba, muestra de árido calizo (izquierda en 3 dimensiones y a la derecha en planta). Abajo, de igual forma se muestra con EGAH como árido

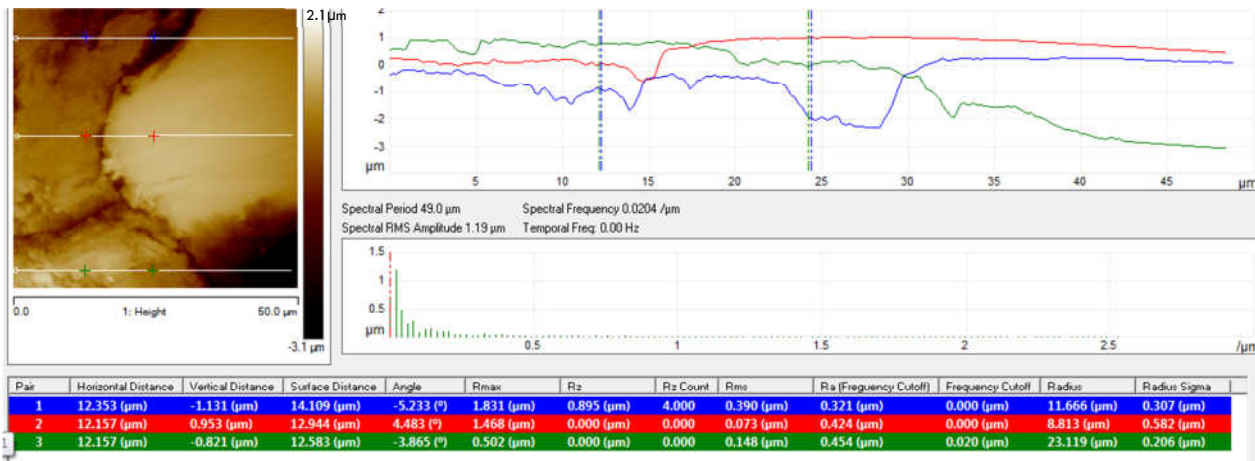
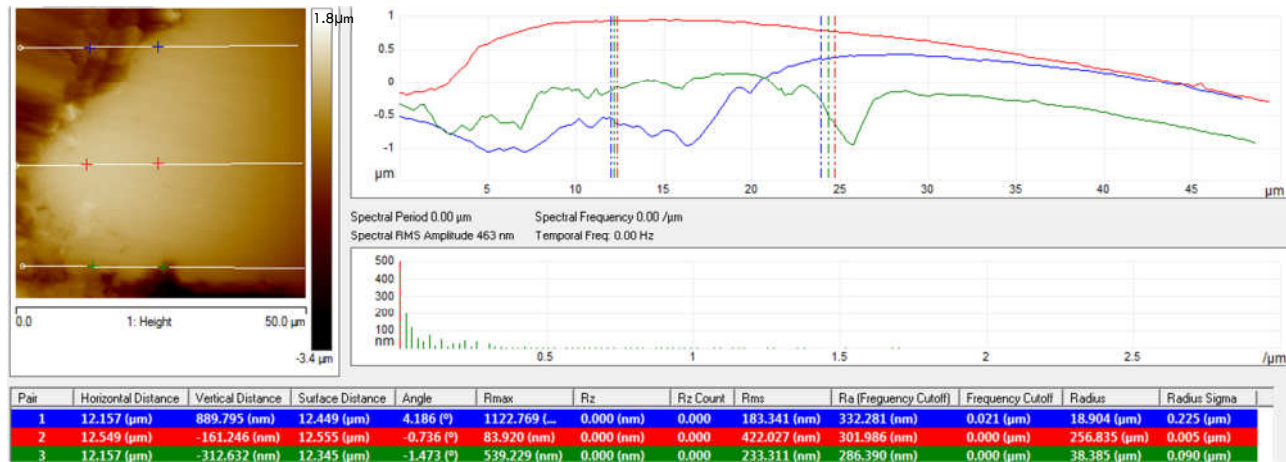


Figura 6.20. Perfiles nanométricos de las muestras analizadas. Arriba, la muestra de árido calizo y abajo la EGAH

6.2.3. Morteros para estudiar la hidratación de la EGAH molida.

Se ha estudiado la influencia de la EGAH molida en la formación de compuestos hidratados (actividad hidráulica) en presencia de cemento Portland. Se plantearon 4 dosificaciones y se ensayaron a 2, 8, 28, 90 y 365 días de su elaboración. Las probetas se mantuvieron sumergidas en agua hasta la edad de ensayo (figura 6.21). Los resultados obtenidos en los ensayos de compresión son los recogidos en la tabla 6.4 y en la figura 6.22.

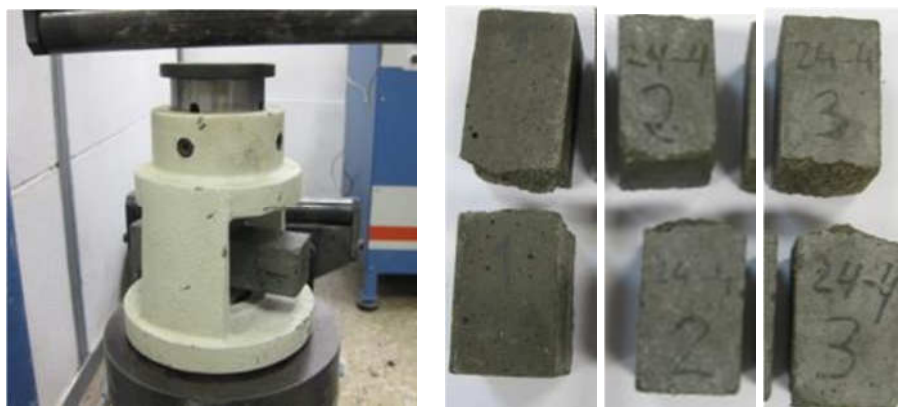


Figura 6.21. Rotura de probetas de mortero

Tal y como se observa en la figura 6.22 y en la tabla 6.4, el mortero fabricado con un 50% menos de cemento (mezcla M-2) que el del mortero patrón (mezcla M-1) presenta, como era de esperar, una importante pérdida de resistencia, del orden del 77%. No obstante, si la parte de cemento eliminado se sustituye por finos calizos (mezcla M-3), la pérdida de resistencia no es tan importante, ya que los finos ocupan los espacios disponibles y hacen la distribución de partículas más ancha, proporcionando una matriz cementante más densa (efecto filler). Algunos

autores señalan también que pequeñas cantidades de adiciones de finos calizos aumentan el volumen de los sólidos generados durante la hidratación del cemento (Matschei, 2007). Por otro lado, se puede ver que a edades tempranas la pérdida de resistencia es ligeramente menor porque el filler calizo acelera la hidratación del cemento, ya que proporciona una superficie adicional para la nucleación y el crecimiento de los productos de hidratación (Bosiljkov, 2003; Ye, 2007). A edades más avanzadas este efecto deja de ser relevante. Así, por ejemplo, a la edad de 2 días, la pérdida de resistencia en relación al mortero patrón es del 52% y sin embargo a las edades de 28, 90 y 365 días, la pérdida de resistencia se mantiene prácticamente constante, del orden del 62%.

En la figura 6.22 también se aprecia que la resistencia del mortero con escoria (mezcla M-4) es muy superior a la del mortero con filler calizo, siendo las diferencias entre ellos mayores cuanto mayor es la edad de las probetas. Esta diferencia es atribuible a la hidratación de la escoria. Es decir, la escoria finamente molida⁴, además de rellenar huecos y de actuar como centros de nucleación (como el filler calizo), es claramente reactiva⁵. La hidratación de la escoria es bastante lenta (Escalante et al., 2003), pues a edades tempranas gran parte de la escoria permanece inerte⁶, siendo la resistencia del mortero a la edad de 2 días del orden del 50% de la resistencia del mortero patrón (mortero

⁴Como en todos los materiales cementantes, la reactividad de la escoria se determina por la superficie específica de ésta (Mukjerhee y Pathak, 2005; Gjør, 1989; Öner, 2003; Wang et al., 1994).

⁵La EGAH interacciona con los productos de hidratación del cemento, diferenciándose de las puzolanas por la gran proporción de calcio de su composición química (Escalante, 2002).

⁶Los productos de hidratación se pueden generar después de muchos meses dado que la EGAH en contacto con el agua forma una capa impermeable de aluminosilicato sobre la superficie de los granos de escoria que inhibe la reacción de hidratación hasta que un activador químico como el cemento Pórtland o la cal pueda deshacer esta capa y continuar la reacción de hidratación.

con 100% de cemento, mezcla M-1). No obstante, con el paso del tiempo las reacciones de hidratación progresan y se forman silicatos cálcicos hidratados, alcanzándose al cabo de un año resistencias similares a las del mortero patrón.

Tabla 6.4. Resistencias a compresión (MPa) a 2, 7, 28, 90 y 365 días

Sustituciones de cemento:	2 días	7 días	28 días	90 días	365 días
M1=100%Cem	26,8	38,2	48,1	53,7	53,8
M2=50%Cem	5,7	8,5	11,6	12,3	13,8
M3=50%Cem.+50%Filler calizo	8,0	16,1	17,9	20,0	22,1
M4=50%Cem.+50%Escoria	14,0	27,2	41,3	48,5	55,8

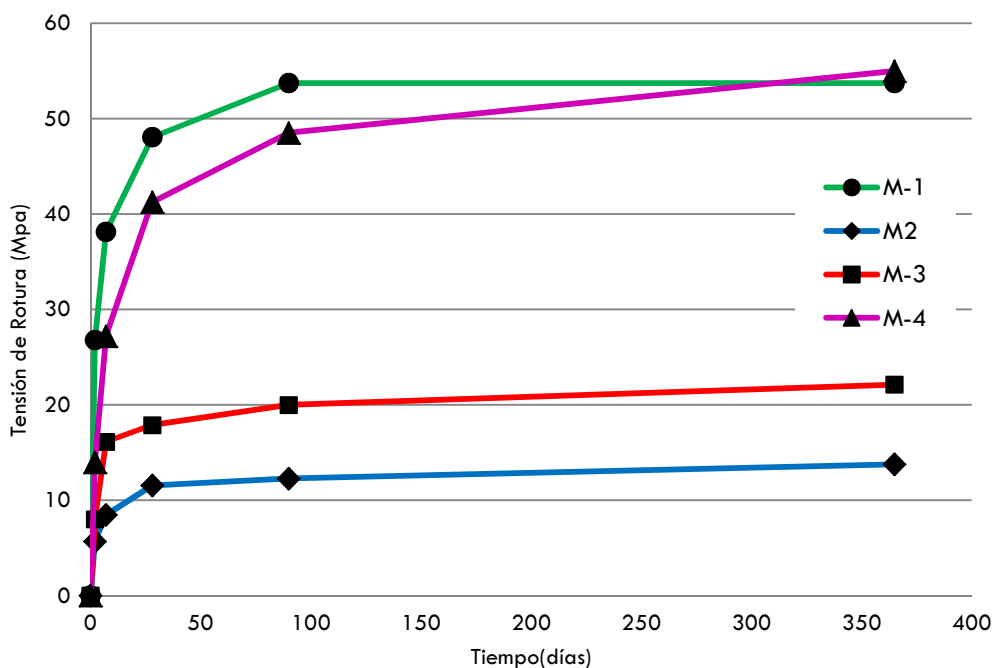


Figura 6.22. Gráfica evolución de resistencias a compresión

6.3. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO

El dispositivo utilizado en la fase experimental, 4C-Rheometer, controla por ordenador el ensayo de escurrimiento y calcula y representa los avances (mm) del hormigón para cada intervalo de tiempo (segundos) durante el desarrollo del ensayo (figura 6.23).

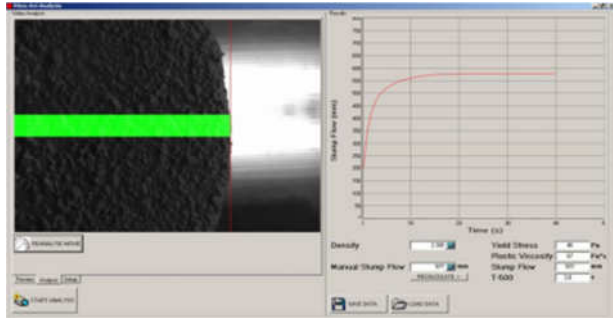


Figura 6.23. Interface del 4C-Rheometer

Con la información aportada por el dispositivo se representa gráficamente el avance del fluido y la velocidad máxima alcanzada (relacionados con la τ y μ del HAC), correspondiendo el pico máximo de velocidad con el cambio de pendiente en la gráfica del ensayo de escurrimiento. En la figura 6.24 se muestra los resultados correspondientes a la amasa nº1 del H-50. Para el resto de amasadas, los datos están en el anexo 6, donde se detallan y representan.

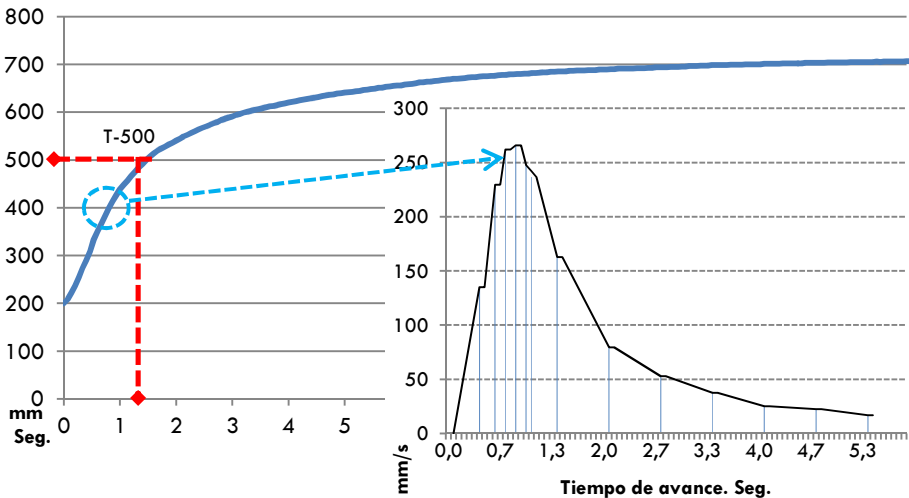


Figura 6.24. Avance del HAC con el paso del tiempo en el ensayo de escurrimiento a la izquierda y velocidad de avance del HAC con el paso del tiempo a la derecha

En la parte izquierda de la figura 6.24 se representa el avance del fluido en función del tiempo. En línea discontinua roja, se marcan el momento que el fluido alcanza los 500 mm de diámetro (T_{500}). En la parte derecha, superpuesta ligeramente a la anterior, se muestra la velocidad de avance del fluido en mm/s para cada intervalo de tiempo, destacándose que la máxima velocidad alcanzada es la correspondiente al pico de la gráfica, que indica el cambio de pendiente de la gráfica anterior (desaceleración del HAC) y éste señalada con línea discontinua azul claro. Así, por ejemplo, en la amasa nº1 del H-50, la velocidad máxima fue de 265,8 mm/segundo, habiéndose alcanzado este valor a los 0,867 segundos del inicio del ensayo de escurrimiento ($T_{V_{max}}$). Este dato es indicativo de una baja viscosidad (24 Pa.s), pasando rápidamente del estado en reposo al movimiento con $\tau=17$ Pa. Nielsson y Wallevik (2003) y Zerbino et al. (2006) marcan como límite inferior $\tau=10$ Pa, por debajo del cual aumenta el riesgo de segregación.

Aunque en algunos estudios se recomienda que el valor de T_{500} sea superior a 2 segundos por ejemplo, Domone y Chai (1996) de 4 a 10, Palacios et al. (2003) y Brite EuRam (2000) citado por Bravo (2007) entre 2 y 5 segundos y Parra (2005) entre 2 y 4 segundos, en las amasadas realizadas se han obtenido valores inferiores sin presentar ninguna indicios de exudación. Esto se debe, en parte, al ajuste realizado en la fase previa, donde se determinó la máxima cantidad de finos calizos admisible por la pasta para conseguir una adecuada fluidez. Además, los 25 kg/m³ de ceniza volante utilizada, por su geometría esférica, actúan como rodamientos entre las partículas mayores y hace disminuir el valor de la τ .

Tras estudiar las gráficas del avance del HAC con el paso del tiempo en el ensayo de escurrimiento y las secuencias de video del ensayo, se ha comprobado que la velocidad máxima del fluido se alcanza en los momentos previos al vaciado completo del cono, debido a la presión que genera el HAC, por su propio peso, confinado dentro del cono y por la inercia que genera el fluido en su movimiento. Esta inercia es ligeramente contrarrestada por el rozamiento generado entre el HAC y la superficie metálica del cono. Una vez vaciado el cono, la presión vertical disminuye (momento visualizado en la figura 6.25), desacelerándose entonces el avance del HAC hasta el momento en que la tensión tangencial se iguala con la tensión umbral de corte y en ese instante se detiene el fluido.

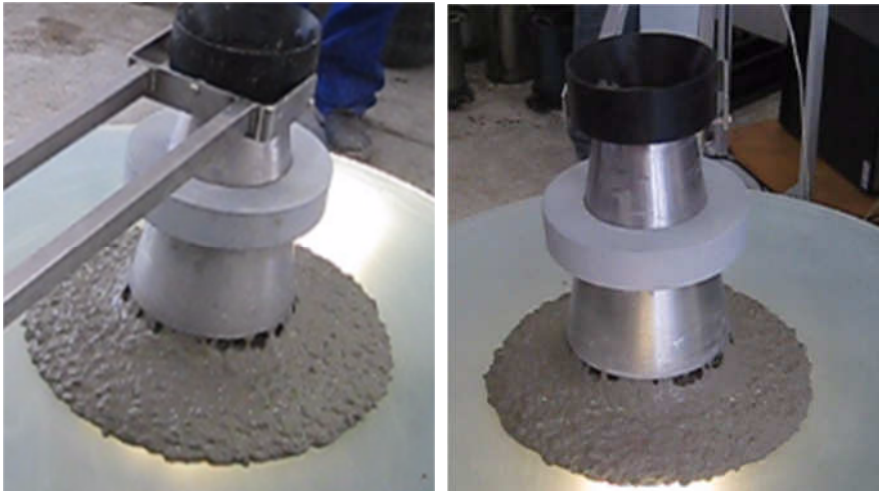


Figura 6.25. Momento que el cono queda vacío y se frena el fluido

En la tabla 6.5 se recogen los parámetros reológicos obtenidos de las 21 amasadas analizadas con el dispositivo 4C-Rheometer. En la figura 6.26 se han representado los valores de τ y μ así como los límites

recomendados por algunos autores (Nielsen y Wallevik, 2003; Zerbino et al., 2006; D.T. Institute, 2010).

Tabla 6.5. Datos reológicos

Cantidad EGAH	Nº Amasada	Viscosidad μ (Pa.s)	T. Corte τ (Pa)	\varnothing F mm	T ₅₀₀ seg.	Velocidad Máx. mm/s	T _{VMáx} seg.
H-0	1	19	15	718	1,3	296,4	0,80
H-0	2	17	17	700	1,2	306,1	0,93
H-0	3	14	22	670	1,2	-	-
H-10	1	14	15	720	1,1	332,6	0,93
H-10	2	21	15	720	1,4	285,7	1,00
H-10	3	22	20	680	1,4	275,5	0,93
H-20	1	42	20	680	2,3	-	-
H-20	2	43	18	690	2,2	-	-
H-20	3	42	20	680	2,2	211,5	0,87
H-30	1	34	26	660	1,9	177,8	0,83
H-30	2	35	16	707	1,7	234,1	0,93
H-30	3	35	22	670	1,9	246,0	0,55
H-40	1	41	20	680	2,0	239,0	0,60
H-40	2	27	18	691	1,8	251,9	0,93
H-40	3	58	26	650	3,4	182,3	0,87
H-50	1	24	17	700	1,4	265,8	0,87
H-50	2	32	24	660	2,2	169,8	1,07
H-50	3	46	17	703	2,5	244,5	0,63
H-60	1	11	17	700	1,2	345,1	0,73
H-60	2	21	14	723	1,3	287,0	0,87
H-60	3	11	14	728	1,0	359,5	0,80

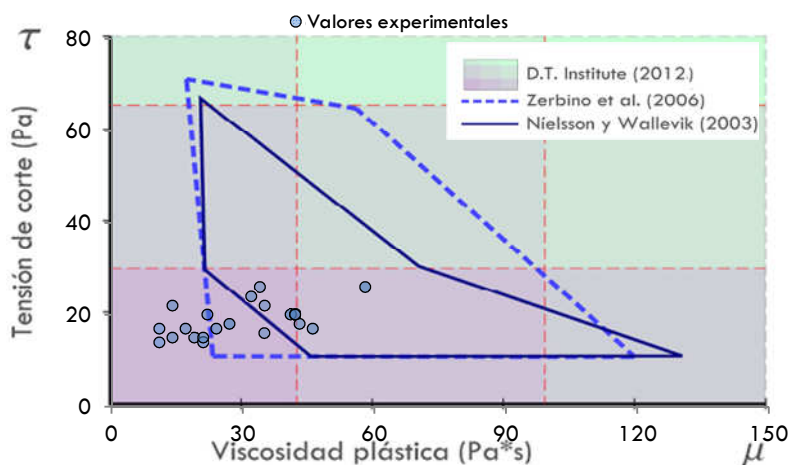


Figura 6.26. Comportamiento de HAC con EGAH según D.T. Institute (2010), Nielsen y Wallevik, (2003) y Zerbino et al.(2006)

De los resultados mostrados en la figura 6.26, un 38% de las amasadas se encuentran en las zonas marcadas por Nielsson y Wallevik, otro 15% se encuentran fuera del anterior estudio pero dentro de la zona marcada por Zerbino et al. (2006) y el resto se encuentra a la izquierda (μ inferiores a 24 Pa.s) de las zonas propuestas por ambos autores, aunque el D.T. Institute (2010) atribuye a esta zona de baja μ y τ una buena trabajabilidad y un buen acabado superficial de los HAC⁷. Con lo expuesto y en base a los resultados obtenidos en esta investigación, se propone una ampliación sobre la zona idónea indicada por Zerbino et al. (2006) para incluir HAC más fluidos y con menor viscosidad (figura 6.27)⁸. Para fabricar HAC en la zona propuesta, se debe estudiar minuciosamente la dosificación empleada para evitar problemas de segregación.

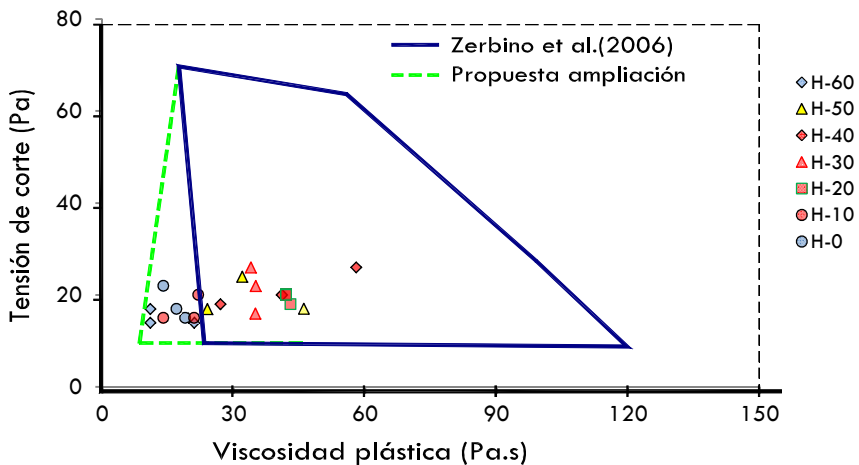


Figura 6.27. Propuesta de ampliación sobre la zona idónea de Zerbino et al. (2006)

⁷ El buen acabado superficial de los HAC para las amasadas con baja μ y τ se ha comprobado en fase experimental sobre un total de 97 probetas analizadas (ver apartado 6.4).

⁸ La ampliación sobre los estudios de Zerbino et al. (2006) se marca con línea discontinua verde llegando hasta $\mu=11$ Pa.s para las τ más bajas.

Es de destacar que una de las amasadas del hormigón H-40 con $\mu=58$ Pa.s y $\tau=26$ Pa queda fuera de la zona marcada como buen acabado superficial por el D.T. Institute (2010), pero dentro de la zona propuesta por Níelsson y Wallevik, es la que peor acabado superficial ha presentado, debido sobre todo a su alta viscosidad (ver apartado 6.4.2).

En la figura 6.28 se muestra la relación del \varnothing_f y la velocidad máxima que alcanza el HAC en su avance. A mayor velocidad alcanzada por el fluido, mayor es la inercia de sus partículas y más lejos llegan antes de detenerse.

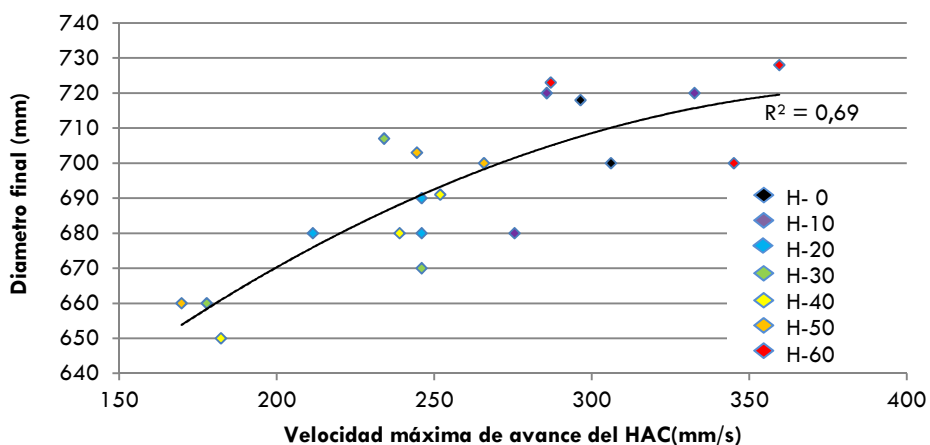


Figura 6.28. Correlación entre \varnothing_f y velocidad máxima de avance de los HAC

6.4. ACABADO SUPERFICIAL DE LOS HAC

6.4.1. Método ICB en los HAC fabricados

Se ha estudiado la calidad superficial de 97 probetas de $\varnothing 150$ mm y altura 300 mm, distribuidas en un total de 21 de las amasadas fabricadas con diferentes valores de viscosidad y tensión umbral de corte. Dicho método se ha aplicado de forma mixta, con inspección visual y tratamiento informático de los datos, en los HAC fabricados en esta investigación. Se introdujeron los datos de la inspección visual en una hoja de cálculo y se obtuvo, de forma porcentual, el área afectada por los poros respecto del área total inspeccionada.

Los valores ICB obtenidos en varias probetas de una misma dosificación permiten realizar un estudio sobre la influencia de varios parámetros, ya sean de dosificación o reológicos. Finalmente se puede extrapolar la información a otras campañas experimentales y al hormigón utilizado en obra.

En la tabla 6.6 se muestran los resultados de las inspecciones realizadas, indicando el n° de poros por \varnothing , superficie total y % de superficie de poro (ICB).

Tabla 6.6. Resultados de inspección. N° de poros, superficie y valor ICB

Dosificación- Amasada-n°	N° Ø 10mm	N° Ø 8mm	N° Ø 6mm	N° Ø 4mm	N° Ø 2mm	Superficie(mm ²) desperfectos	ICB
H-0-1a	0	0	2	18	11	815	1,73%
H-0-1b	0	0	1	15	14	895	1,90%
H-0-1c	0	0	0	22	6	567	1,20%
H-0-1d	0	0	1	24	5	572	1,21%
H-0-2a	0	0	3	22	9	797	1,69%
H-0-2b	0	0	3	23	7	713	1,51%
H-0-2c	0	0	2	11	7	534	1,13%
H-0-2d	0	0	5	12	4	486	1,03%
H-0-3a	0	0	3	23	8	761	1,62%
H-0-3b	0	0	0	22	6	567	1,20%
H-0-3c	0	0	0	26	13	956	2,03%
H-0-3d	0	0	0	16	15	927	1,97%
H-0-3e	2	0	0	20	12	989	2,10%
H-0-3f	0	0	1	21	9	728	1,54%
H-10-1a	0	0	0	10	3	271	0,57%
H-10-1b	0	0	2	15	6	536	1,14%
H-10-1c	0	0	5	11	7	619	1,31%
H-10-1d	0	0	1	24	8	717	1,52%
H-10-2a	0	0	1	11	9	602	1,28%
H-10-2b	0	1	1	24	12	961	2,04%
H-10-2c	0	0	1	8	9	565	1,20%
H-10-2d	0	0	0	9	7	452	0,96%
H-10-3e	0	0	2	13	10	704	1,49%
H-10-3f	0	1	0	13	11	746	1,58%
H-10-3g	0	2	8	41	14	1520	3,23%
H-10-3h	0	2	4	17	6	718	1,52%
H-10-3i	0	1	0	29	10	899	1,91%
H-10-3j	0	0	1	21	10	776	1,65%
H-20-1a	0	0	6	14	12	927	1,97%
H-20-1b	0	0	9	17	20	1436	3,05%
H-20-1c	0	0	4	21	21	1394	2,96%
H-20-1d	0	0	7	9	21	1328	2,82%
H-20-2a	2	4	5	23	15	1515	3,21%
H-20-2b	0	0	9	18	15	1207	2,56%
H-20-2c	2	6	4	23	7	1200	2,55%
H-20-2d	1	0	4	17	9	841	1,78%
H-20-3a	0	0	1	7	12	697	1,48%
H-20-3b	0	0	2	30	12	1015	2,15%
H-20-3c	0	0	0	11	16	913	1,94%
H-20-3d	0	0	0	44	13	1182	2,51%
H-20-3e	1	14	7	51	13	2250	4,78%
H-20-3f	0	0	0	26	11	859	1,82%
H-30-1a	0	2	1	40	12	1212	2,57%
H-30-1b	1	0	4	48	11	1327	2,82%
H-30-1c	0	0	15	38	4	1095	2,32%
H-30-1d	1	1	9	28	9	1171	2,48%
H-30-2a	0	4	8	24	10	1213	2,57%
H-30-2b	0	4	15	34	11	1585	3,36%
H-30-2c	0	0	0	14	7	515	1,09%
H-30-2d	0	2	4	4	11	796	1,69%
H-30-3a	0	0	1	35	6	759	1,61%

H-30-3b	0	6	1	27	9	1105	2,34%
H-30-3c	2	1	8	35	5	1115	2,37%
H-30-3d	2	4	2	37	10	1364	2,89%
H-30-3e	1	0	1	36	23	1673	3,55%
H-30-3f	0	3	9	26	13	1361	2,89%
H-40-1c	0	7	17	23	10	1606	3,41%
H-40-2d	0	0	8	11	20	1333	2,83%
H-40-2e	0	1	13	24	20	1688	3,58%
H-40-2f	0	1	2	17	15	1047	2,22%
H-40-2g	0	1	1	15	13	896	1,90%
H-40-2h	1	0	6	18	24	1636	3,47%
H-40-2i	0	0	0	38	11	1010	2,14%
H-40-3a	0	0	3	28	12	1018	2,16%
H-40-3b	0	0	7	52	29	2255	4,79%
H-40-3c	2	3	19	70	24	2887	6,13%
H-40-3d	4	1	18	64	19	2598	5,51%
H-40-3e	0	1	16	23	31	2293	4,87%
H-40-3f	2	1	15	48	26	2493	5,29%
H-50-1a	1	5	7	38	13	1635	3,47%
H-50-1b	0	2	1	53	18	1666	3,54%
H-50-1c	0	1	5	15	8	767	1,63%
H-50-1d	0	0	3	25	12	980	2,08%
H-50-2a	4	2	13	27	9	1557	3,30%
H-50-2b	1	1	6	33	8	1100	2,34%
H-50-2c	0	2	12	50	26	2327	4,94%
H-50-2d	0	3	22	44	25	2536	5,38%
H-50-2e	0	3	7	44	18	1773	3,76%
H-50-2f	0	0	7	29	25	1773	3,76%
H-50-2g	3	3	18	43	7	1775	3,77%
H-50-2h	4	4	23	29	20	2498	5,30%
H-50-3a	4	2	16	37	14	2010	4,27%
H-50-3b	1	6	15	39	13	1924	4,08%
H-60-1a	0	0	1	23	10	801	1,70%
H-60-1b	1	0	2	14	18	1183	2,51%
H-60-2a	0	0	0	18	8	614	1,30%
H-60-2b	0	0	0	18	11	759	1,61%
H-60-2c	0	0	0	32	23	1516	3,22%
H-60-2d	0	0	9	38	19	1652	3,51%
H-60-2e	1	0	3	17	9	813	1,72%
H-60-2f	0	0	1	20	4	473	1,00%
H-60-3a	1	0	9	28	7	1024	2,17%
H-60-3b	0	0	9	17	6	759	1,61%
H-60-3c	1	0	2	28	14	1165	2,47%
H-60-3d	1	0	3	37	17	1451	3,08%
H-60-3e	0	1	1	23	9	803	1,70%
H-60-3f	0	1	4	40	16	1441	3,06%

Como resumen a la anterior tabla, se han agrupado los valores por amasadas (21) y se ha calculado sus valores medios, mostrándose todos ellos en la tabla 6.7.

Tabla 6.7. Resultados medios por amasada

Probeta %-Amasada	Sup. medias Desperfectos (mm ²)	% desperfectos por amasada
H-0-1	712,21	1,51%
H-0-2	632,33	1,34%
H-0-3	821,49	1,74%
H-10-1	535,54	1,14%
H-10-2	644,99	1,37%
H-10-3	893,84	1,90%
H-20-1	1.271,13	2,70%
H-20-2	1.190,61	2,53%
H-20-3	1.152,80	2,45%
H-30-1	1.201,51	2,55%
H-30-2	1.027,34	2,18%
H-30-3	1.229,49	2,61%
H-40-1	1.605,71	3,41%
H-40-2	1.268,36	2,69%
H-40-3	2.505,16	5,32%
H-50-1	1.262,12	2,68%
H-50-2	1.917,47	4,07%
H-50-3	1.966,81	4,17%
H-60-1	991,99	2,11%
H-60-2	970,99	2,06%
H-60-3	1.107,09	2,35%

En la figura 6.29 se muestra la gráfica de Cajas y Bigotes de los 97 datos agrupados por amasadas correlativas según el orden de fabricación. La n°1, 2 y 3 pertenecen a la jornada de trabajo n°1 y así sucesivamente hasta la 19, 20 y 21 que pertenecen a la jornada 7. El orden de fabricación según la cantidad de EGAH fue: 50%, 40%, 30%, 20%, 10%, 0% y por ultimo 60%. De la amasada 12 y 15 se destacan un valor atípico para cada una, correspondiendo a los identificados anteriormente como H-10-3g y H-20-3e y marcados ambas con círculo verde en la figura 6.29. Estos valores atípicos estadísticamente suelen deberse a efectos ajenos a la inspección. En este caso una lubricación inadecuada de los moldes o suciedad en los mismos podría ser el motivo

de aumentar la cantidad de burbujas retenida. Otros datos a destacar, son los obtenidos en 5 de las 6 probetas de la amasada n° 6 (H-40-3) y marcadas con elipse roja en la misma figura 6.29, correspondiéndose con los valores más altos de ICB en toda la inspección, entre 4,79 y 6,13% y desmarcándose totalmente de la progresión detectada y de las otras amasadas del H-40. Esta amasada, la H-40-3, es la situada más a la derecha de la figura 6.30 (remarcada igualmente en rojo) y ya indicada como anómala en el apartado 6.3 por su alta viscosidad ($\mu=58$ Pa.s), principal motivo de la alta retención de burbujas de aire, además de contar con la tensión umbral de corte ($\tau=26$ Pa) más elevada de todas. Los resultados obtenidos en la amasada n°6 confirman lo indicado por el D.T. Institute (2010). Estos delimitan la zona de buen acabado superficial para τ y μ bajas. Con valores mayores, de ambos parámetros, los datos se acercan a la zona de daños superficiales o coqueas. En la figura 6.31 se ve lo indicado, sombreado en rojo la zona donde está situada la amasada n° 6, con valores de $\mu=58$ Pa.s y $\tau=26$ Pa.

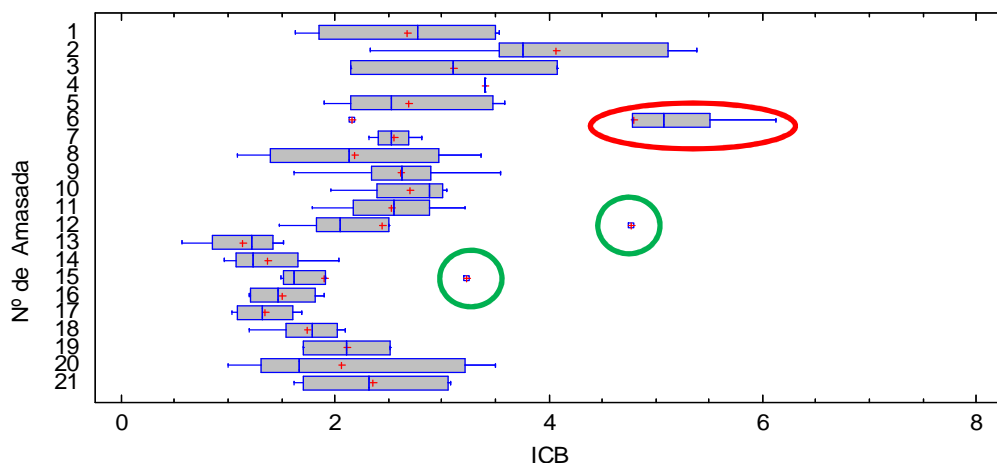


Figura 6.29. Cajas y Bigotes de los 97 valores ICB agrupados por amasado

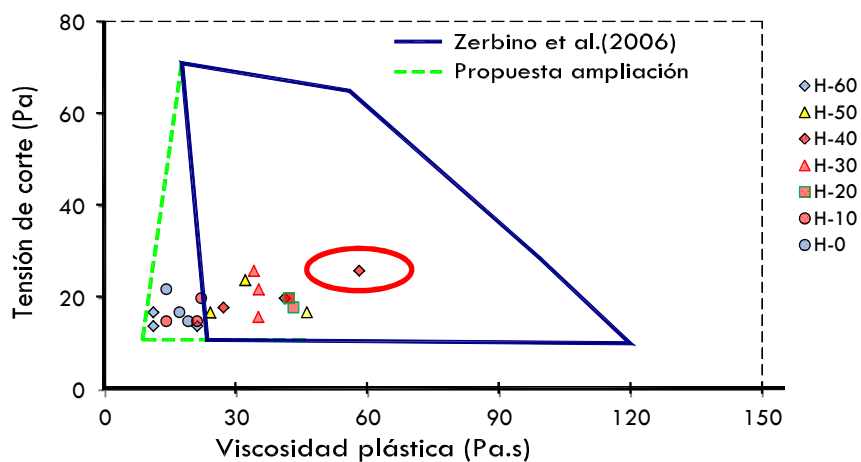


Figura 6.30. Datos reológicos de las 21 amasadas analizadas

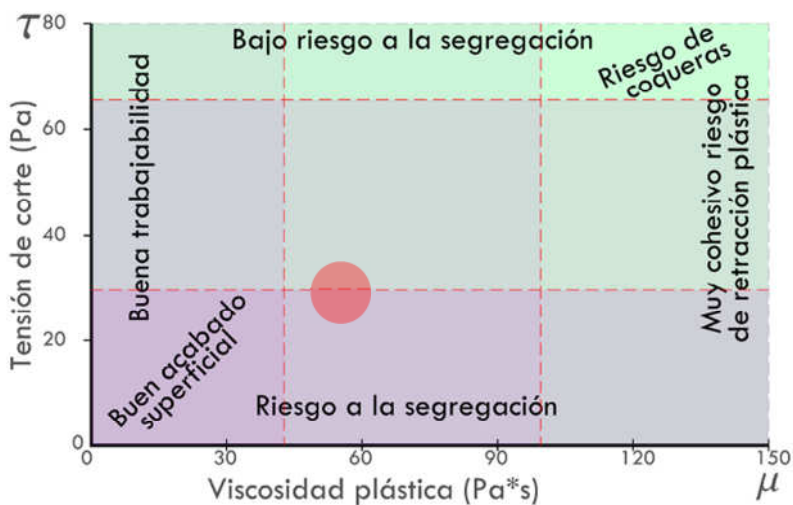


Figura 6.31. Comportamiento de la amasada n° 6, H-40, según el D.T. Institute (2010)

Con los 97 valores del índice ICB obtenidos se realizan varios cálculos estadísticos para su aceptación (figura 6.32). En la tabla 6.8 se muestran los diferentes datos estadísticos de ICB para cada uno de los 7 niveles (dosificación de los HAC). La intención principal del análisis de varianza de un factor es la de comparar las medias de los diferentes niveles.

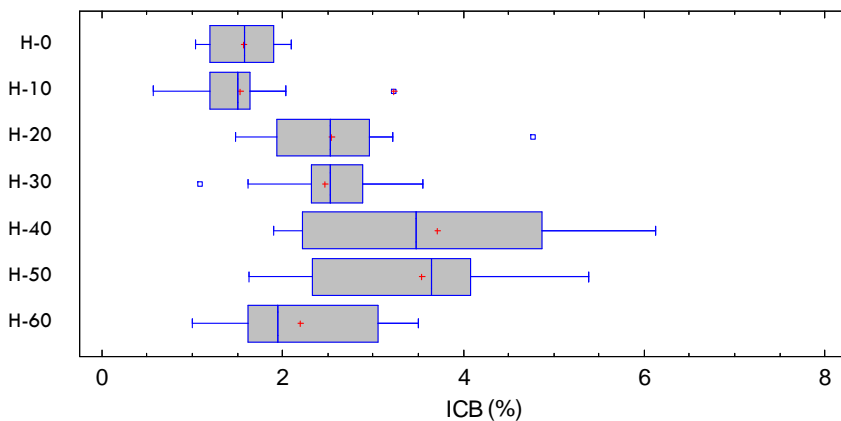


Figura 6.32. Cajas y Bigotes de los 97 ICB agrupados por % de EGAH

Tabla 6.8. Resumen Estadístico para ICB por % de EGAH de HAC

	Nº	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente Variación	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo Estándar	Curtosis Estándar
H-0	14	1,562	0,359	0,230	1,031	2,099	1,067	0,011	-1,070
H-10	14	1,529	0,614	0,402	0,575	3,226	2,650	2,306	3,201
H-20	14	2,541	0,833	0,328	1,479	4,775	3,296	2,187	2,383
H-30	14	2,469	0,665	0,269	1,093	3,550	2,457	-0,722	0,209
H-40	13	3,715	1,454	0,391	1,901	6,126	4,225	0,415	-1,031
H-50	14	3,535	1,181	0,334	1,628	5,382	3,754	0,026	-0,589
H-60	14	2,191	0,788	0,360	1,004	3,506	2,502	0,466	-0,921
Total	97	2,494	1,181	0,474	0,575	6,126	5,551	4,197	1,393

En la tabla 6.9 se transcriben los datos obtenidos en el estudio de ANOVA⁹ de los resultados. Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para ICB. Construye varias pruebas para comparar los valores medios de ICB para los 7 diferentes niveles de HAC, adoptando:

Variable dependiente: ICB

Número de observaciones: 97 con 7 niveles

Tabla 6.9. ANOVA para valores ICB por % de EGAH de HAC

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	61,0791	6	10,1798	12,56	0,0000
Intra grupos	72,929	90	0,810322		
Total (Corr.)	134,008	96			

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media del ICB entre un nivel de HAC y otro, con un nivel del 95,0% de confianza. Es decir, no existe linealidad en los resultados ICB con respecto a la dosificación (figura 6.32). Esto era de esperar dado que la liberación del aire ocluido está influido principalmente por los parámetros reológicos del fluido en estado fresco (Okamura, 1997; Helene et al., 2008; Valcuende et al., 20012b), como a continuación se detalla.

⁹ La tabla ANOVA descompone la varianza de ICB en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 12,56, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos.

6.4.2. Análisis del valor ICB por parámetros reológicos

En este apartado se estudia la influencia de los parámetros reológicos de los HAC fabricados (μ y τ) con los valores ICB obtenidos.

En la bibliografía estudiada queda constatado que la viscosidad del hormigón es el parámetro fundamental que se vincula con la facilidad o no de evacuar las burbujas de aire (Okamura, 1997; Helene et al., 2008; Valcuende et al., 20012b). La tensión de corte no es mencionado en la bibliografía estudiada y si analizada en esta investigación para ver sus implicaciones sobre el valor ICB. El estudio de ambos parámetros (μ y τ), con respecto al valor del ICB para las 97 probetas, se muestra en dos gráficas de cajas de bigotes (figura 6.33 y 6.34), considerado este gráfico como el más significativo para la gran cantidad de información que se manejó. En él se puede observar de forma sencilla la dispersión de los valores para cada grupo de datos con respecto a los percentiles 25 y 75%, la mediana y los valores máximos y mínimos, así como posibles valores atípicos. En abscisas se muestran los valores ICB en porcentaje y en ordenadas los diferentes valores de viscosidad y tensión umbral de corte (respectivamente en la figura 6.33 y 6.34). Para los valores anómalos señalados como (1) (en ambas figuras), con viscosidad de 32 Pa.s (para el H-50-2), y que rompen una ligera tendencia, puede deberse, además de por una μ ligeramente alta, a una de las más altas τ (24 Pa). Mientras que para los hormigones con los valores más altos de la μ y con una menor τ (como en el H-20-2 con μ de 43 Pa.s y una τ de 18 Pa), se obtienen valores ICB menores. De forma similar ocurre en lo señalado como (2) (H-40-3) y ya comentado anteriormente, con la μ y la τ más altas de todos los HAC analizados (58 Pa.s y 26 Pa

respectivamente). La combinación de ambos valores altos hace que la cantidad de poros superficiales se dispare (ICB hasta de un 6%). Por último lo señalado con (3) (para el H-60-3) que rompe la ligera tendencia del resto de valores con una μ de 11 Pa.s y una τ de 14 Pa y puede ser indicativo de una tendencia a la segregación, por la baja cohesión y alta fluidez del HAC.

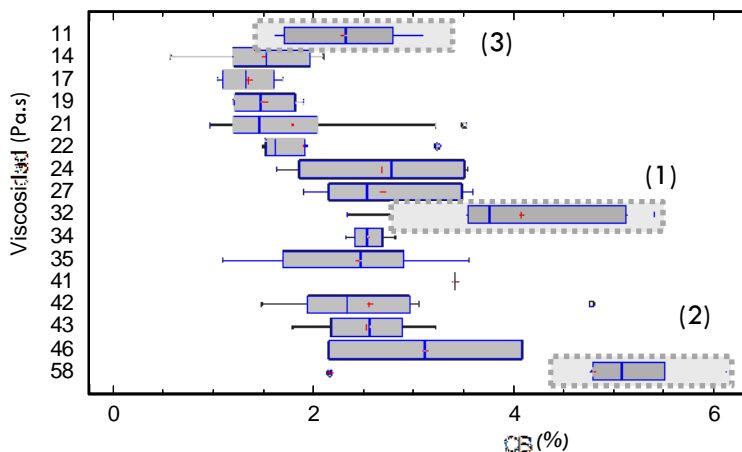


Figura 6.33. Cajas y Bigotes de los 97 valores ICB agrupados por Viscosidad (Pa.s)

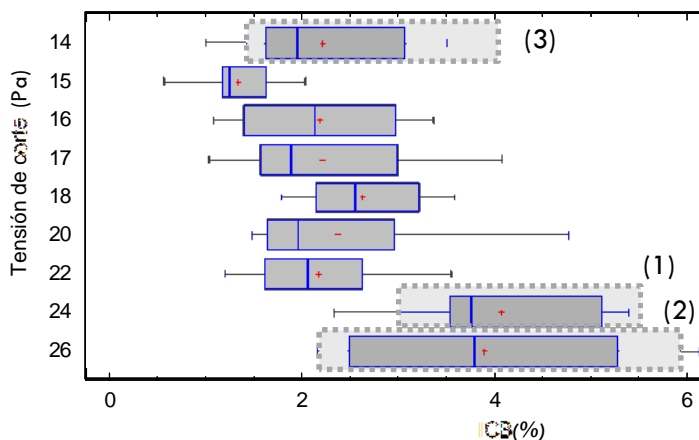


Figura 6.34. Cajas y Bigotes de los 97 valores ICB, por Tensión de corte (Pa)

A continuación se determina cuánto afecta cada parámetro anterior sobre los valores ICB. En la figura 6.35 se representan la tendencia de ajuste (señalando el rango de los percentiles 25 y 75%) de los 21 valores de la viscosidad para cada ICB medio. El valor del coeficiente de correlación para la serie de datos fue de 0,81 (81%).

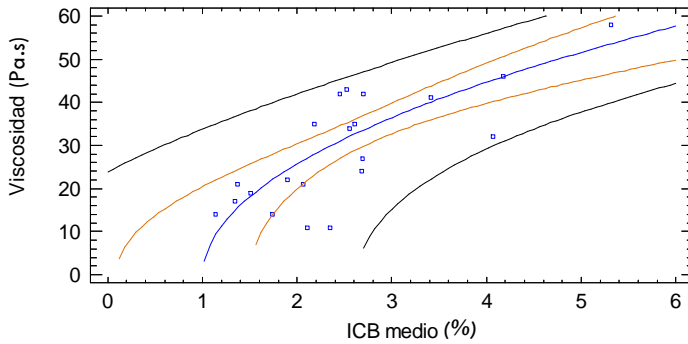


Figura 6.35. Relación entre Viscosidad y valores ICB de cada amasada

En la figura 6.36 se representan la tendencia de ajuste de los 21 valores del T_{500} (vinculada con la viscosidad) para cada ICB medio. En este caso, el valor del coeficiente de correlación es del 0,90.

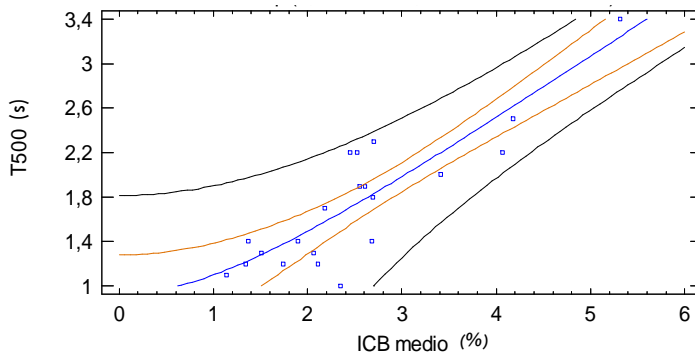


Figura 6.36. Relación entre T_{500} y valores ICB de cada amasada

En términos globales se puede indicar que mayor fluidez y menor viscosidad de los HAC facilita el movimiento de las burbujas de aire en el hormigón y, por tanto, pueden ascender y liberarse de forma más sencilla dejando las superficies con más calidad estética.

Para concluir este apartado, hay que destacar la alta correlación existente entre el T_{500} y los valores ICB medios de cada amasada. Resulta, por tanto, una forma sencilla de baremar, de antemano, la calidad superficial de los HAC, ya sea en laboratorio o en obra.

6.4.3. Conversión de valores ICB a la escala CIB N°24 W29

Tras los buenos resultados obtenidos con el método desarrollado, y coincidente con lo descrito por algunos investigadores (Okamura, 1997; Helene et al., 2008; Valcuende et al., 20012b), se pretende estandarizar los resultados obtenidos para comprobarlos con las plantillas propuestas por CIB N°24 W29. Para ello, sobre dichas plantillas (figura 6.37) se ha seguido el mismo procedimiento explicado para las probetas (ver anexo 7).

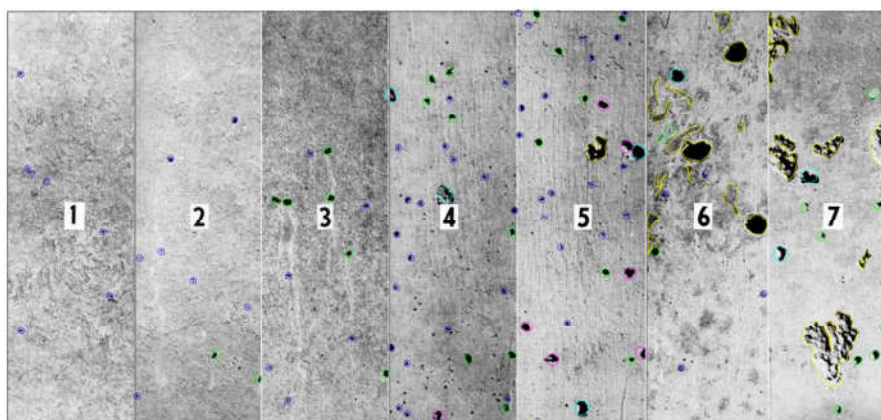


Figura 6.37. Digitalización del patrón del código CIB n° 24 W29

Con los resultados de analizar dichas plantillas y tras plantear unas premisas para la conversión de valores de daños superficiales a la escala numérica de 1 a 7 se obtiene la expresión matemática $y = 1,6902\ln(x) + 9,9884$ (desarrollada su obtención en anexo 7). Con ella se transforman los valores porcentuales ICB a la escala consolidada y propuesta por la comisión de trabajo n° 29 del CIB N°24. Esta transformación, por un lado permite mantener el uso de la escala aceptada de 1 a 7, y por otro, permite validar el método propuesto ICB con una inspección doble (por ambos métodos, ICB y CIB n° 24 W29) sobre elementos de hormigón. En las dos siguientes tablas, 6.10 y 6.11, se muestran los resultados, primero por amasada y después por probeta de la conversión realizada.

Tabla 6.10. Resultados medios por amasada según digitalización de la plantilla CIB

Probeta %-Amasada	% desperfectos por amasada	Valor según código CIB n°24
H-0-1	1,51%	2,9
H-0-2	1,34%	2,7
H-0-3	1,74%	3,1
H-10-1	1,14%	2,4
H-10-2	1,37%	2,7
H-10-3	1,90%	3,3
H-20-1	2,70%	3,9
H-20-2	2,53%	3,8
H-20-3	2,45%	3,7
H-30-1	2,55%	3,8
H-30-2	2,18%	3,5
H-30-3	2,61%	3,8
H-40-1	3,41%	4,3
H-40-2	2,69%	3,9
H-40-3	5,32%	5,0
H-50-1	2,68%	3,9
H-50-2	4,07%	4,6
H-50-3	4,17%	4,6
H-60-1	2,11%	3,5
H-60-2	2,06%	3,4
H-60-3	2,35%	3,7

Tabla 6.11. Resultados de las 97 probetas de HAC según plantilla del CIB

Probeta %-Ama-Letra	% desperfectos	Valor CIB			
H-0-1a	1,73%	3,1	H-30-3a	1,61%	3,0
H-0-1b	1,90%	3,3	H-30-3b	2,34%	3,6
H-0-1c	1,20%	2,5	H-30-3c	2,37%	3,7
H-0-1d	1,21%	2,5	H-30-3d	2,89%	4,0
H-0-2a	1,69%	3,1	H-30-3e	3,55%	4,3
H-0-2b	1,51%	2,9	H-30-3f	2,89%	4,0
H-0-2c	1,13%	2,4	H-40-1c	3,41%	4,3
H-0-2d	1,03%	2,3	H-40-2d	2,83%	4,0
H-0-3a	1,62%	3,0	H-40-2e	3,58%	4,4
H-0-3b	1,20%	2,5	H-40-2f	2,22%	3,6
H-0-3c	2,03%	3,4	H-40-2g	1,90%	3,3
H-0-3d	1,97%	3,4	H-40-2h	3,47%	4,3
H-0-3e	2,10%	3,5	H-40-2i	2,14%	3,5
H-0-3f	1,54%	2,9	H-40-3a	2,16%	3,5
H-10-1a	0,57%	1,3	H-40-3b	4,79%	4,9
H-10-1b	1,14%	2,4	H-40-3c	6,13%	5,3
H-10-1c	1,31%	2,7	H-40-3d	5,51%	5,1
H-10-1d	1,52%	2,9	H-40-3e	4,87%	4,9
H-10-2a	1,28%	2,6	H-40-3f	5,29%	5,0
H-10-2b	2,04%	3,4	H-50-1a	3,47%	4,3
H-10-2c	1,20%	2,5	H-50-1b	3,54%	4,3
H-10-2d	0,96%	2,1	H-50-1c	1,63%	3,0
H-10-3e	1,49%	2,9	H-50-1d	2,08%	3,4
H-10-3f	1,58%	3,0	H-50-2a	3,30%	4,2
H-10-3g	3,23%	4,2	H-50-2b	2,34%	3,6
H-10-3h	1,52%	2,9	H-50-2c	4,94%	4,9
H-10-3i	1,91%	3,3	H-50-2d	5,38%	5,1
H-10-3j	1,65%	3,1	H-50-2e	3,76%	4,4
H-20-1a	1,97%	3,3	H-50-2f	3,76%	4,4
H-20-1b	3,05%	4,1	H-50-2g	3,77%	4,4
H-20-1c	2,96%	4,0	H-50-2h	5,30%	5,0
H-20-1d	2,82%	4,0	H-50-3a	4,27%	4,7
H-20-2a	3,21%	4,2	H-50-3b	4,08%	4,6
H-20-2b	2,56%	3,8	H-60-1a	1,70%	3,1
H-20-2c	2,55%	3,8	H-60-1b	2,51%	3,8
H-20-2d	1,78%	3,2	H-60-2a	1,30%	2,7
H-20-3a	1,48%	2,9	H-60-2b	1,61%	3,0
H-20-3b	2,15%	3,5	H-60-2c	3,22%	4,2
H-20-3c	1,94%	3,3	H-60-2d	3,51%	4,3
H-20-3d	2,51%	3,8	H-60-2e	1,72%	3,1
H-20-3e	4,78%	4,8	H-60-2f	1,00%	2,2
H-20-3f	1,82%	3,2	H-60-3a	2,17%	3,5
H-30-1a	2,57%	3,8	H-60-3b	1,61%	3,0
H-30-1b	2,82%	4,0	H-60-3c	2,47%	3,7
H-30-1c	2,32%	3,6	H-60-3d	3,08%	4,1
H-30-1d	2,48%	3,7	H-60-3e	1,70%	3,1
H-30-2a	2,57%	3,8	H-60-3f	3,06%	4,1
H-30-2b	3,36%	4,3			
H-30-2c	1,09%	2,4			
H-30-2d	1,69%	3,1			

6.4.4. Verificación del método ICB con las plantillas CIB N°24 W29

En las siguientes 6 figuras (6.38 a 6.43) se muestran 12 probetas (dos a dos) situadas junto a la plantilla propuesta por el CIB para su cuantificación visual y comparación con los valores obtenidos por el método ICB y transformados a la escala de 1-7. En cada pie de figura se indica la numeración de la probeta según la tabla 6.11 y su valor adaptado a CIB para ser comparado visualmente con las plantilla CIB. El ajuste entre ambos métodos se puede considerar alto, aunque la inspección y cuantificación visual con las plantillas CIB dependen de la pericia y criterio de cada observador.



Figura 6.38. Izquierda H-0-1 con CIB=2,52%. Derecha H-0-1b con CIB=3,29%



Figura 6.39. Izquierda H-10-3h con CIB=2,92%. Derecha H-10-3g con CIB=4,19%



Figura 6.40. Izquierda H-20-1a con CIB=3,35%. Derecha H-20-3e con CIB=4,85%



Figura 6.41. Izquierda H-30-1a con CIB=3,80%. Derecha H-30-3d con CIB=4,00%



Figura 6.42. Izquierda H-40-2h con CIB=4,31%. Derecha H-50-2g con CIB=4,45%



Figura 6.43. Izquierda H-60-2a con CIB=2,65%. Derecha H-60-3d con CIB=4,11%

6.5. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

6.5.1. Resistencia a compresión en probeta cilíndrica

Se ha determinado la resistencia a compresión en probeta cilíndrica de los HAC fabricados de acuerdo a las norma UNE-EN 12390-3 a los 7, 28, 90 y 365 días de edad. En la tabla 6.12 y figura 6.44 se indican los valores medios obtenidos en cada ensayo (más detalles en anexo 7). Aunque los resultados son muy similares en todos los hormigones, a edades tempranas (7 días) los hormigones con mayor contenido de escoria tienden a dar resistencias más bajas, a pesar de que la escoria tiene mejores propiedades mecánicas que el árido calizo (tabla 5.4, ensayo de Micro-Deval). Teniendo en cuenta que el contenido de pasta cementante es el mismo en todas las dosificaciones, ello puede ser debido a un peor empaquetamiento de los áridos, ya que las escorias tienen una forma muy angulosa y presentan una granulometría con escasa presencia de partículas inferiores a 0,5 mm, lo que da lugar a mezclas de menor compacidad. De hecho, en los ensayos de MIP (apartado 6.1) se

observa que los hormigones fabricados con más escoria tienen un mayor volumen total de poros.

A edades más avanzadas el comportamiento es diferente. Dado que las escorias utilizadas en esta investigación son reactivas, a medida que progresa su hidratación se forman CSH alrededor de las partículas, densificándose la interfaz árido-pasta, mejorando la adherencia árido-pasta y contrarrestando así los efectos negativos derivados de un peor empaquetamiento de los áridos. De hecho, de acuerdo con los ensayos de MIP, las mezclas con más sustitución de arena por escoria presentan una estructura porosa más fina debido probablemente a la mayor formación de CSH. Ahora bien, tal y como se ha visto en el apartado 6.2.3, estas reacciones de hidratación son muy lentas y, por lo tanto, la mejora del comportamiento mecánico también lo es. Así, por ejemplo, a las edades de 28 y 90 días la resistencia a compresión de todos los hormigones se iguala, no existiendo diferencias estadísticamente significativas entre ellos (tabla 6.18 y 6.22). Por el contrario, a la edad de 365 días se observa que cuanto mayor es la cantidad de escoria utilizada como árido mayor tiende a ser la resistencia del hormigón (valor $P = 0,019$).

Tabla 6.12. Valores de resistencias a compresión a 7, 28, 90 y 365 días

	Resistencia media a compresión (MPa)			
	7 días	28 días	90 días	365 días
H-0	33,0	39,2	46,7	49,6
H-10	31,0	38,9	46,5	49,2
H-20	34,0	38,7	46,7	49,7
H-30	32,8	39,2	47,5	50,4
H-40	31,2	38,9	45,0	50,7
H-50	31,3	38,2	48,7	51,8
H-60	29,9	38,7	47,6	52,3

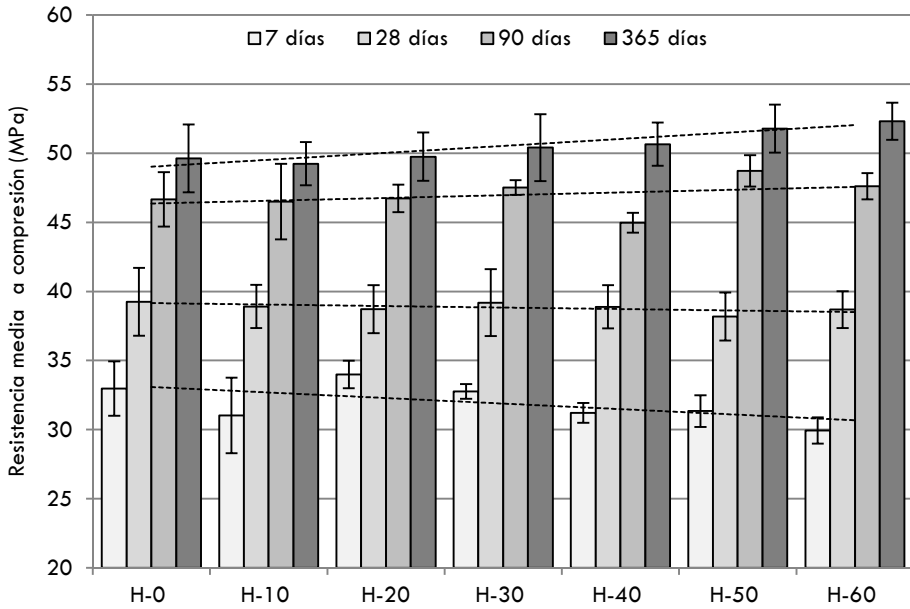


Figura 6.44. Histogramas de resistencias a compresión con dispersiones de resultados

Con objeto de valorar si son estadísticamente significativas las diferencias registradas entre las diferentes sustituciones del árido fino por escoria granulada de alto horno en los hormigones autocompactantes los datos de los ensayos han sido tratados estadísticamente. Se ha utilizado el análisis de la varianza (ANOVA)¹⁰.

En la figura 6.45 se muestran representados en gráfica de cajas y bigotes los datos de compresión a 7 días para las diferentes dosificaciones. Se observa que con el aumento de la cantidad de EGAH la resistencia a 7 días tiende ligeramente a disminuir.

¹⁰El ANOVA es un procedimiento que permite descomponer la variabilidad de un ensayo en variables independientes que puedan asignarse a causas distintas. El análisis de la varianza permite determinar si la media de la variable respuesta varía en diferentes niveles de cada factor experimental.

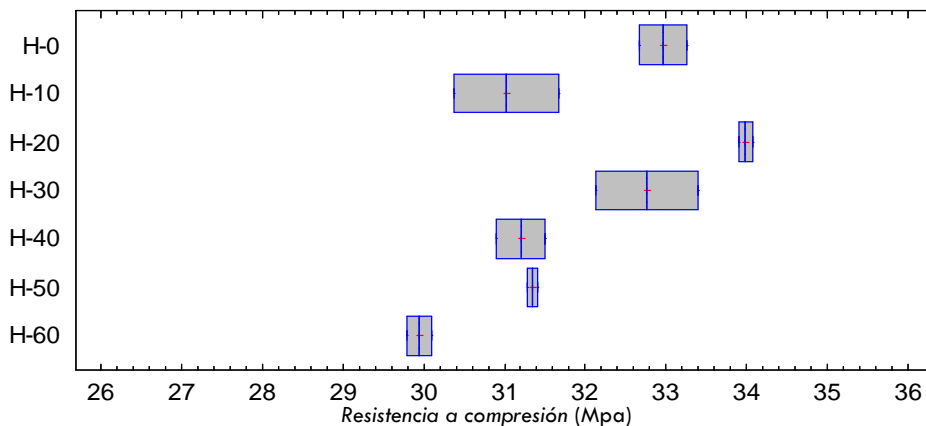


Figura 6.45. Gráfica de cajas y bigotes de resultados a compresión a 7 días

La tabla 6.13 ilustra el resumen estadístico para los datos de resistencia a compresión a 7 días. En la tabla 6.14 del ANOVA se indican los valores de variabilidad¹¹ entre y dentro de los grupos. El F-ratio es el valor de la media de cuadrados entre grupos dividido entre el valor de la media de cuadrados dentro de grupos. El valor P indica el nivel de significatividad (es el área a la derecha del valor F). Valores pequeños (menores que 0.05) indican que las medias de las muestras son significativamente diferentes.

Tabla 6.13. Resumen estadístico para compresión a 7 días

	N°	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación	Mínimo	Máximo	Rango
H-0	2	32,97	0,416	1,26%	32,67	33,26	0,59
H-10	2	31,03	0,908	2,93%	30,38	31,67	1,28
H-20	2	33,98	0,115	0,34%	33,90	34,07	0,16
H-30	2	32,77	0,893	2,73%	32,14	33,40	1,26
H-40	2	31,21	0,428	1,37%	30,90	31,51	0,61
H-50	2	31,34	0,088	0,28%	31,28	31,41	0,13
H-60	2	29,95	0,213	0,71%	29,80	30,10	0,30
Total	14	31,89	1,394	4,37%	29,80	34,07	4,27

¹¹ La tabla del ANOVA muestra la suma de cuadrados entre y dentro de cada grupo de valores. Mide la variabilidad entre las medias de los grupos de factores. La suma de cuadrados totales mide la variabilidad de todos los datos con respecto a una media.

Tabla 6.14. *Tabla ANOVA para compresión a 7 días por dosificación*

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	23,2235	6	3,87058	13,25	0,0016
Intra grupos	2,04478	7	0,292112		
Total (Corr.)	25,2683	13			

Se obtiene un valor-P de 0,0016 para los datos a 7 días. Esto indica que existen diferencias significativas entre los diferentes resultados de HAC, entre una dosificación y otra, con un nivel del 95,0% de confianza. A continuación se determina cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Para ello se realiza un estudio de “Pruebas de Múltiples Rangos” mediante el programa Statgraphics Plus, mostrándose los resultados en la tabla 6.15. Para ello se ha aplicado un procedimiento de comparación múltiple para determinar que medias son significativamente diferentes de otras. El asterisco mostrado indica que esas parejas de hormigón muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza¹². De los resultados se obtiene 3 grupos homogéneos de valores, A, B y C (tabla 6.16). Con todo ello indicar que, aunque no se puede garantizar que realmente hay una pérdida de resistencia si se observa una cierta tendencia negativa (disminución de la resistencia con el aumento de la cantidad de EGAH).

¹² El método empleado para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher.

Tabla 6.15. Prueba de múltiple rangos para compresión a 7 días

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
H-0 - H-10	*	1,9435	1,27802
H-0 - H-20		-1,015	1,27802
H-0 - H-30		0,202	1,27802
H-0 - H-40	*	1,763	1,27802
H-0 - H-50	*	1,626	1,27802
H-0 - H-60	*	3,023	1,27802
H-10 - H-20	*	-2,9585	1,27802
H-10 - H-30	*	-1,7415	1,27802
H-10 - H-40		-0,1805	1,27802
H-10 - H-50		-0,3175	1,27802
H-10 - H-60		1,0795	1,27802
H-20 - H-30		1,217	1,27802
H-20 - H-40	*	2,778	1,27802
H-20 - H-50	*	2,641	1,27802
H-20 - H-60	*	4,038	1,27802
H-30 - H-40	*	1,561	1,27802
H-30 - H-50	*	1,424	1,27802
H-30 - H-60	*	2,821	1,27802
H-40 - H-50		-0,137	1,27802
H-40 - H-60		1,26	1,27802
H-50 - H-60	*	1,397	1,27802

Tabla 6.16. Grupos homogéneos

Dosificación	Casos	Media	Grupos homogéneos
H-60	2	29,9455	A
H-10	2	31,025	AB
H-40	2	31,2055	AB
H-50	2	31,3425	B
H-30	2	32,7665	C
H-0	2	32,9685	C
H-20	2	33,9835	C

La resistencia a compresión a la edad de 7 días no depende por tanto de la cantidad de EGAH utilizada. Esto es debido a la nula participación, a esta edad, de la EGAH en la formación de nuevos productos hidratados, aunque por la menor compacidad de los HAC con EGAH si se aprecia un ligero descenso de la resistencia con el aumento de la cantidad de EGAH utilizada. Además, a edades tempranas el CaO y

MgO presente en la EGAH expanden en gran medida al formar CaCO_3 y $\text{Mg}(\text{OH})_2$ respectivamente, pudiendo dañar inicialmente parte de la microestructura de forma proporcional a la cantidad de EGAH utilizada (Machado, 2000; Costa, 2006). A este respecto, hay que destacar el estudio llevado a cabo por Lauber (2009) que establece que cuanto mayor es la sustitución de EGAH, menor es la resistencia a compresión respecto a un hormigón convencional a edad temprana por la presencia de numerosos compuestos de CaO y MgO que expanden y dañan la microestructura del hormigón. A edades posteriores, con la hidratación de la EGAH y la formación de más silicatos hidratados resistentes, puede revertir la tendencia negativa de 7 días, haciendo que la resistencia de los hormigones con EGAH mejore con respecto a los que no la tienen.

Los datos obtenidos a 28 días, en este caso 6 ensayos para cada dosificación, se muestran en la figura 6.46 en gráfica de cajas y bigotes. En este caso no se aprecia la variabilidad de resultados obtenida a los 7 días, no quedando reflejadas diferencias significativas entre los diferentes HAC.

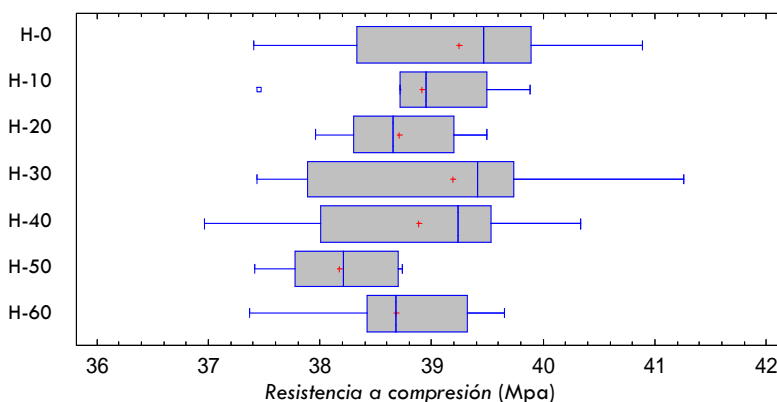


Figura 6.46. Gráfica de cajas y bigotes de los resultados a compresión a 28 días

La tabla 6.17 muestra el resumen estadístico para los datos de resistencia a compresión a 28 días. En la tabla 6.18 se muestran los valores del ANOVA. El valor P obtenido es igual a 0,5809 mayor que 0.05, indicando que entre las medias de las muestras no existen diferencias significativas, con un nivel de confianza del 95,0%, ratificándose así la prácticamente nula tendencia de la figura 6.46.

La tabla 6.19 confirma que las 7 dosificaciones pertenecen a un mismo grupo homogéneo llamado "A". Es decir, no existen diferencias estadísticamente significativas entre todos ellos (método de diferencia mínima significativa de Fisher). Esto puede indicar, en comparación a los resultados a 7 días, que en los HAC con mayor contenido de EGAH (los de menor resistencia a 7 días) se adquiere mayor resistencias en el periodo entre los 7 y 28 días, llegando a incrementos del 29,4% para el H-60, frente al 18,8% del H-0 (tabla 6.20). Esto significa que la EGAH ha empezado a contribuir en la resistencia mecánica con su hidratación y que su efecto negativo a los 7 días es neutralizado a los 28 días.

Tabla 6.17. Resumen estadístico de valores a compresión a 28 días

	Nº	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación	Mínimo	Máximo	Rango
H-0	6	39,24	1,230	3,14%	37,41	40,89	3,48
H-10	6	38,91	0,828	2,13%	37,46	39,88	2,42
H-20	6	38,71	0,575	1,49%	37,96	39,49	1,53
H-30	6	39,19	1,382	3,53%	37,44	41,26	3,82
H-40	6	38,89	1,202	3,09%	36,97	40,33	3,37
H-50	6	38,18	0,531	1,39%	37,42	38,74	1,32
H-60	6	38,69	0,794	2,05%	37,37	39,65	2,28
Total	42	38,83	0,971	2,50%	36,97	41,26	4,29

Tabla 6.18. ANOVA para compresión a 28 días por dosificación

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	4,62741	6	0,7712	0,79	0,5809
Intra grupos	33,9954	35	0,9712		
Total (Corr.)	38,6228	41			

Tabla 6.19. Prueba de múltiple rangos para compresión a 28 días. Método LSD

Dosificación	Casos	Media	Grupos Homogéneos
H-50	6	38,18	A
H-60	6	38,69	A
H-20	6	38,71	A
H-40	6	38,89	A
H-10	6	38,91	A
H-30	6	39,19	A
H-00	6	39,24	A

Tabla 6.20. Incrementos de resistencia a compresión entre 7 y 28 días

	Resistencia media a compresión (MPa)		Incremento de resistencias entre 7 y 28 días
	7 días	28 días	
H-0	33,0	39,2	18,8%
H-10	31,0	38,9	25,5%
H-20	34,0	38,7	13,8%
H-30	32,8	39,2	19,5%
H-40	31,2	38,9	24,7%
H-50	31,3	38,2	22,0%
H-60	29,9	38,7	29,4%

En la figura 6.47 se muestran los resultados de resistencia a compresión a los 90 días en gráfica de cajas y bigotes.

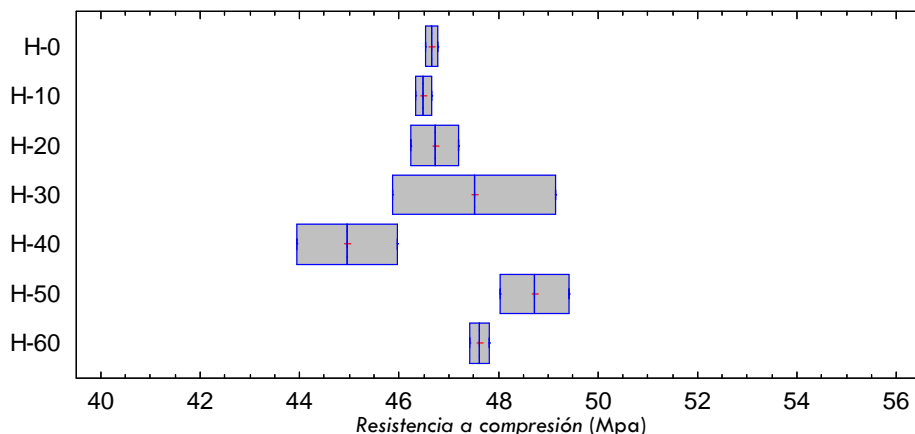


Figura 6.47. Gráfica de cajas y bigotes de resultados a compresión a 90 días

La tabla 6.21 ilustra el resumen estadístico para los datos de resistencia a compresión a 90 días. En la tabla 6.22 se muestran los valores del ANOVA, con un valor $P=0,1742$ mayor que 0.05, lo que indica que entre las medias de las muestras no existen diferencias significativas para las diferentes cantidades de EGAH remplazada por árido fino, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 6.21. Resumen estadístico de valores a compresión a 90 días

	N°	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
H-0	2	46,65	0,184	0,39%	46,52	46,78	0,26
H-10	2	46,49	0,228	0,49%	46,33	46,65	0,32
H-20	2	46,72	0,682	1,46%	46,24	47,21	0,97
H-30	2	47,51	2,321	4,88%	45,87	49,15	3,28
H-40	2	44,96	1,433	3,19%	43,95	45,87	2,03
H-50	2	48,72	0,985	2,02%	48,03	49,42	1,39
H-60	2	47,61	0,276	0,58%	47,42	47,81	0,39
Total	14	46,95	1,399	2,98%	43,95	49,42	5,47

Tabla 6.22. ANOVA para compresión a 90 días por dosificación

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	16,4165	6	2,73608	2,12	0,1742
Intra grupos	9,03766	7	1,29109		
Total (Corr.)	25,4542	13			

Los resultados del hormigón H-40 rompen la posible linealidad del resto. Esta anomalía podría deberse a la alta viscosidad obtenida en este hormigón, produciendo una mayor retención de aire ocluido o macroporos¹³ que afecta significativamente a la resistencia mecánica (Kumar y Bhattacharjee, 2003 y De Schutter et al., 2008). Esto se ha constatado en los ensayos de porosimetría con intrusión de mercurio, en concreto en lo referente a los macroporos (mayores de $10\mu\text{m}$) con un volumen de $3,37\text{cc/g}^{10-3}$ para este hormigón, frente a $1,25\text{cc/g}^{10-3}$ para el H-0. Igualmente, los resultados de acabado superficial (apartado 5.6.7) confirman el mayor volumen de macroporos presentes en el H-40. Para éste se obtuvo las mayores cantidades de poros en la superficie de las probetas, llegando a un 3,81% de media para las 13 probetas analizadas, muy por encima del 1,53% para el H-0. Esta alta acumulación de poros superficiales en los H-40 se debe a su alta viscosidad (42 Pa*s de media para el H-40, frente a los 17 Pa*s para el H-0), lo que también podría explicar la mayor cantidad de macroporos obtenidas en ensayo de porosimetría con intrusión de mercurio. Todo ello hace al hormigón menos denso (por su menor parte sólida) y con una menor capacidad resistente.

De forma similar a lo ocurrido entre los 7 y 28 días, en el periodo de 28 a 90 días en general, los HAC con mayor contenido de EGAH han

¹³ De todos los tamaños de poros estudiados, los macroporos son uno de los que más afectan a las propiedades mecánicas.

adquirido mayores resistencias, llegando a incrementos del 27,5% para el H-50, frente al 19,1% del H-0 (tabla 6.23).

Tabla 6.23. Incrementos de resistencia a compresión entre los 28 y 90 días

	Resistencia media a compresión (MPa)		Incremento de resistencias entre 28 y 90 días
	28 días	90 días	
H-0	39,2	46,7	19,1%
H-10	38,9	46,5	19,5%
H-20	38,7	46,7	20,7%
H-30	39,2	47,5	21,2%
H-40	38,9	45,0	15,7%
H-50	38,2	48,7	27,5%
H-60	38,7	47,6	23,0%

Por último, la figura 6.48 muestra los resultados a 365 días. En este caso, se aprecia una tendencia alcista de la resistencia con el aumento de la cantidad de EGAH. Esto coincide con lo obtenido por Scanduzzi y Battagin (1990) en morteros con escorias granuladas de alto horno como árido fino (15% superiores) en comparación con morteros con arena natural.

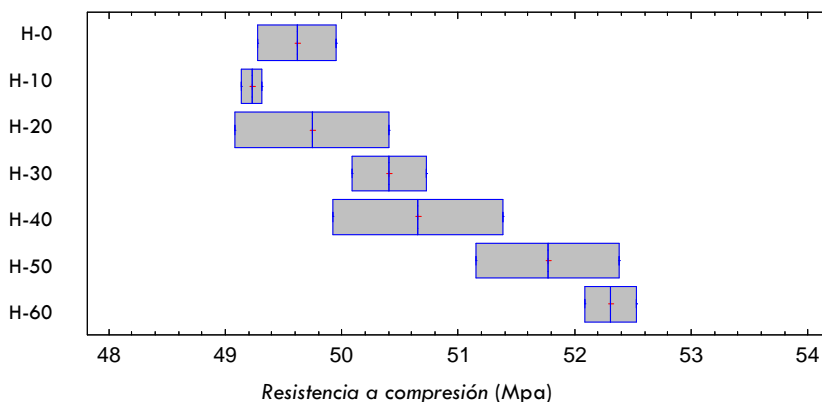


Figura 6.48. Gráfica de cajas y bigotes de los resultados a compresión a 365 días

La tabla 6.24 muestra el resumen estadístico para los datos de resistencia a compresión a 365 días. En la tabla 6.25 el ANOVA presenta los valores de variabilidad entre y dentro de grupos. En este caso el valor $P=0,0190$ menor que 0.05 indica que entre las medias de las muestras existen diferencias significativas para las diferentes cantidades de EGAH remplazada por árido fino, con un nivel del 95,0% de confianza. Esto es constatado con el R^2 del 97% obtenido, indicando una relación alta entre las variables (figura 6.49).

Tabla 6.24. Resumen estadístico para compresión a 365 días

	Nº	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
H-0	2	49,61	0,479	0,96%	49,28	49,95	0,68
H-10	2	49,23	0,123	0,25%	49,14	49,32	0,17
H-20	2	49,75	0,935	1,88%	49,09	50,41	1,32
H-30	2	50,41	0,450	0,89%	50,09	50,72	0,64
H-40	2	50,65	1,032	2,04%	49,92	51,38	1,46
H-50	2	51,77	0,865	1,67%	51,16	52,38	1,22
H-60	2	52,31	0,311	0,59%	52,09	52,53	0,44
Total	14	50,53	1,208	2,39%	49,09	52,53	3,44

Tabla 6.25. ANOVA para compresión a 365 días por dosificación

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	15,7327	6	2,62211	5,68	0,0190
Intra grupos	3,23085	7	0,461551		
Total (Corr.)	18,9635	13			

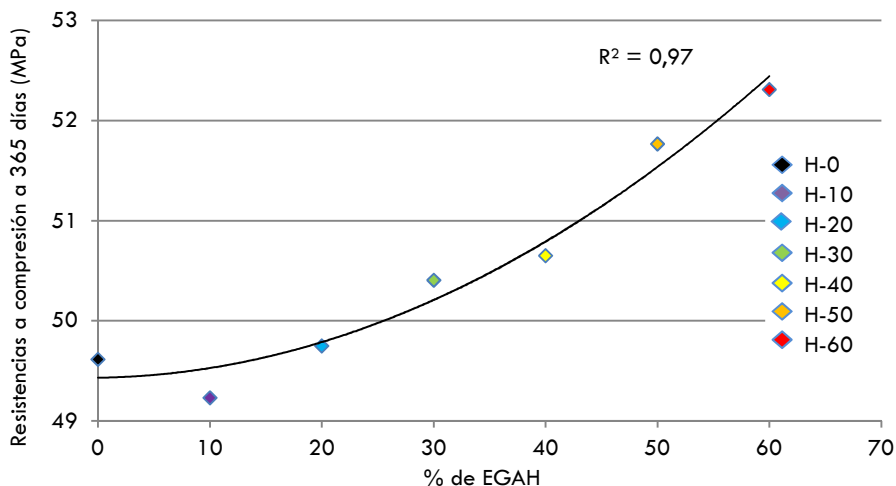


Figura 6.49. Relación entre % de EG AH y resistencia a compresión a 365 días

A esta edad avanzada, donde claramente la EG AH participa en la formación de nuevos productos resistentes, generalmente CSH, se constata la mayor evolución de la resistencia para los hormigones con mayor cantidad de árido calizo fino sustituido por EG AH. Dichos resultados ratifican la actividad hidráulica tardía de la EG AH y comprobada en los morteros con EG AH molida.

Como resumen a todo lo descrito en este apartado, indicar que a los 7 días se obtienen ligeras pérdidas de resistencia para las mayores cantidades de escoria por su peor compacidad y posible expansión del CaO y MgO. A los 28 días estas pérdidas prácticamente se neutralizan para los hormigones con escoria, al contribuir ésta en la formación de nuevos productos hidratados, llegando a aumentar la resistencia a compresión un 10% más en los H-60, frente a los H-0, en el periodo de 7 a 28 días. A los 90 días siguen formándose nuevos productos hidratados por la presencia de la EG AH y eso hace que la ligera tendencia inicial se invierta. Es decir, con el aumento de la cantidad de escoria utilizada

mayor es el aumento de la resistencia con respecto al H-0. A los 365 días es de destacar la evolución superior de los hormigones con mayor contenido de escoria, observándose la tendencia alcista con el aumento de la cantidad de escoria, lo que confirma que la EGAH tiene propiedades cementantes a edades muy posteriores a la del cemento portland (figura 6.50), mejorando su microestructura por un refinamiento de la red porosa (ensayo MIP).

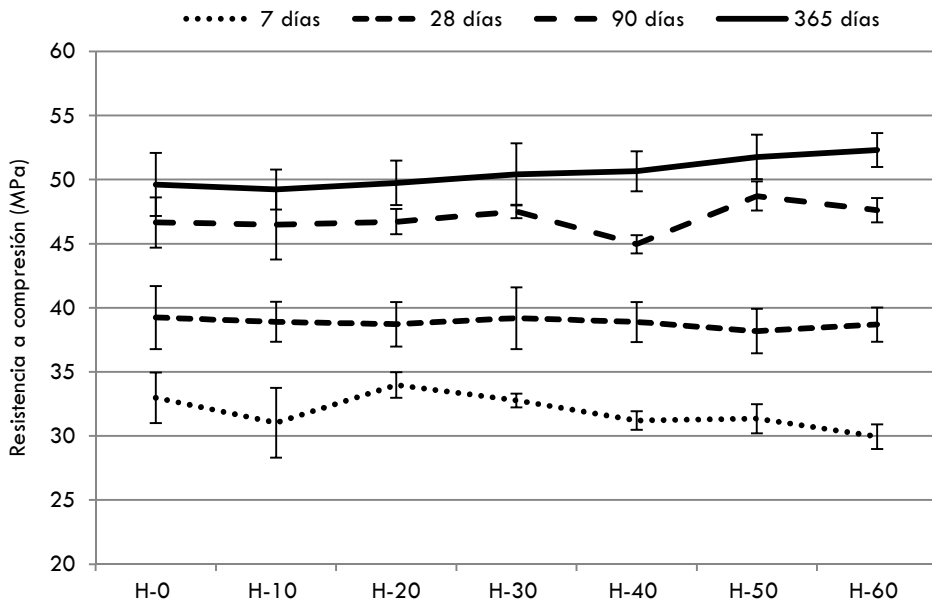


Figura 6.50. Evolución de la resistencia a compresión a los 7, 28, 90 y 365 días

Esta evolución con la participación de la EGAH en la resistencia de los hormigones es coincidente con la obtenida en morteros con la misma escoria molida y como sustitución del cemento (apartado 6.3.3), alcanzando el mortero con el 50% de cemento sustituido por EGAH (M-4) una resistencia igual a la del mortero de referencia con el 100% de cemento a los 365 días de su fabricación. A diferencia de la EGAH

molida, la utilizada como árido cuenta con una superficie específica mucho menor, lo que disminuye la superficie de reacción y la formación de nuevos productos hidratados a una misma edad (Mukjerhee y Pathak, 2005; Gjorv, 1989; Öner, 2003; Wang et al., 1994). En numerosos trabajos de Escalante (2002 y 2008, entre otros) se constata que con el incremento de la hidratación de la EGAH resulta una mayor cantidad de gel de sílice que polimeriza, densificando la matriz, disminuyendo la porosidad e incrementando la resistencia a compresión. Esto mismo se ha detectado en los hormigones con mayor cantidad de escoria. El H-60, a pesar de contar con la mayor porosidad total, cuenta con la red porosa más fina de todos los hormigones debido al refinamiento producido por la hidratación de la escoria, obteniendo a los 365 días¹⁴ la mayor resistencia a compresión de todos los hormigones.

De forma similar, Scandiuzzi y Battagin (1990) obtuvieron a los 91 días mejores resistencias a compresión en morteros con escorias granuladas de alto horno como árido fino que con arena natural (15% superiores), mientras que a 28 días la resistencia era mayor en los morteros con arena natural, justificando dichos resultados por la actividad hidráulica tardía de la EGAH. Esto es totalmente coincidente con lo obtenido en esta investigación, aunque en menor magnitud (5,5%) a 365 días. Esto puede deberse a la alcalinidad del hormigón de esta investigación, en la que se ha usado un cemento con el 27% de clínker sustituido por adiciones calizas y escoria (CEM II /B-M (S-L) 42,5R) reduciendo la cantidad de portlandita y la alcalinidad del hormigón, disminuyendo, por tanto, la velocidad de activación y participación de la

¹⁴ A edades avanzadas los álcalis de la pasta de cemento actúan como activadores de la escoria y penetran en la estructura vesicular de ésta, produciendo su hidratación de forma similar, pero más lenta, que la producida con otros activadores químicos (Escalante, 2002).

EGAH en la formación de CSH. Berridi (2008) con un cemento CEM I 52,5R y EGAH obtiene incrementos del 20% al 25% para las mayores sustituciones (50%, 75% y 100%) de árido grueso (4/20) por EGAH. Todos ellos llegan a la conclusión de que es viable el uso de la escoria granulada de alto horno como árido en los hormigones.

La activación de la EGAH por los álcalis del cemento (hidróxido de calcio) produce dos efectos que mejoran la resistencia mecánica de la pasta de cemento. Por un lado, se disminuye el tamaño de los poros debido a la formación de productos secundarios de hidratación (principalmente silicato de calcio hidratado) que rellenan parte de los poros de la interfaz escoria-pasta. En este sentido Numata et al. (1986) confirmó a través del microscopio de barrido la presencia de una capa hidratada de C-S-H en la interfase de los granos de escoria (como árido fino). Por otro lado, se reduce la cantidad y el tamaño de los cristales de hidróxido de calcio, fortaleciendo la pasta de cemento, y sobre todo la interfaz árido-pasta y, por tanto, la del hormigón, además de las mejoras producidas en la permeabilidad de los hormigones y por tanto de su durabilidad (Neville, 1997; Soares, 2003; Yüksel et al., 2006; Numata et al., 1986; Rodríguez et al., 2008 y Miñano, et al., 2012). Además, el consumo de hidróxido de calcio liberado en la reacción de cemento Portland por la hidratación de la EGAH reduce la posibilidad de su lixiviación en presencia de agua y disminuye la porosidad de la matriz de la pasta de cemento. Este efecto es muy determinante en la resistencia mecánica y en la durabilidad de los hormigones por el alto contenido de cristales de hidróxido cálcico que constituyen el volumen sólido de la pasta hidratada de cemento (20 - 25 %). En contraste con el CSH, el hidróxido cálcico es un compuesto con una estequiometría definida y sus cristales se presentan muy definidos con formas planas y hexagonales.

Debido al gran tamaño de estos cristales cuentan con una baja superficie específica, disminuyendo las fuerzas de enlace entre los propios cristales o entre éstos con otros sólidos, haciendo que su contribución a la resistencia total sea mínima frente a la del CSH. Además, con el uso de la EGAH y su consumo de Ca(OH)_2 se reduce los posibles ataques sulfáticos y disminuye la reacción álcali-árido al bajar la alcalinidad del hormigón (Mehta, 1998). Con el descenso de la alcalinidad de la pasta de cemento baja la capacidad de fijar CO_2 por el hormigón (menos carbonatación al contar con menos portlandita para formar carbonato cálcico). Este efecto de menor carbonatación se ve potenciado con una matriz más densa e impermeable por el refinado de los poros al utilizar las EGAH en los HAC (Miñano et al., 2012b). Altos descensos de alcalinidad deben ser analizadas para evitar la despasivación de las armaduras metálicas en las estructuras. En general, y como resumen de lo indicado, la hidratación de la EGAH a tiempos posteriores a la del cemento portland mejoran la interfaz debido a que los nuevos compuestos ocupan parte de los poros generados a las primeras edades. Además, las partículas de EGAH se combinan en su hidratación con parte del hidróxido cálcico (de menor adherencia y resistencia que el CSH) de la pasta, para producir más CSH. La incorporación EGAH como sustitución parcial del árido fino en el hormigón beneficia la zona de transición pasta-árido, traduciéndose en mayores resistencias a los 365 días.

6.5.2. Evolución de la resistencia a compresión de los HAC

La evolución de la resistencia a compresión es un parámetro muy importante a la hora de estudiar las propiedades mecánicas a largo plazo, y sobre todo en hormigones con adiciones activas. En los hormigones fabricados para esta investigación se ha utilizado cemento CEM II /B-M (S-L) 42,5R (un 12% de finos calizos y un 15% escorias granuladas de alto horno molidas) además de 25kg de ceniza volante por m³ de hormigón. Por otro lado, la EGAH utilizada como sustitución de árido fino participar de forma más lenta que el cemento portland en la formación de productos hidratados¹⁵.

En la figura 6.51, se muestra la evolución de la resistencia a compresión de los diferentes HAC fabricados a 7, 28, 90 y 365 días en función del contenido de escoria. Es de destacar la evolución de los HAC con mayor contenido de escoria, H-50 y H-60, que pasan de un ratio del 96,3% y 92,0% a 7 días (con respecto al H-0) al 104,3% y 105,4% a los 365 días, respectivamente. Esta mayor evolución para los hormigones con mayor contenido de escoria confirma lo ya indicado sobre la hidratación de ésta y el refinamiento de la estructura porosa, obteniéndose la estructura porosa más fina en el H-60 (ensayo de MIP). En la tabla 6.26 se muestra la totalidad de los ratios calculados (referencia del 100% para el H-0).

¹⁵ La EGAH utilizada como árido fino en esta investigación es considerada como material cementante a diámetros de molindas similares a la del cemento (ver apartado 6.2.3). En estado natural, la EGAH cuenta con mucha menor superficie de contacto, frente a la molida, lo que dificulta y reduce la posibilidad de su hidratación.

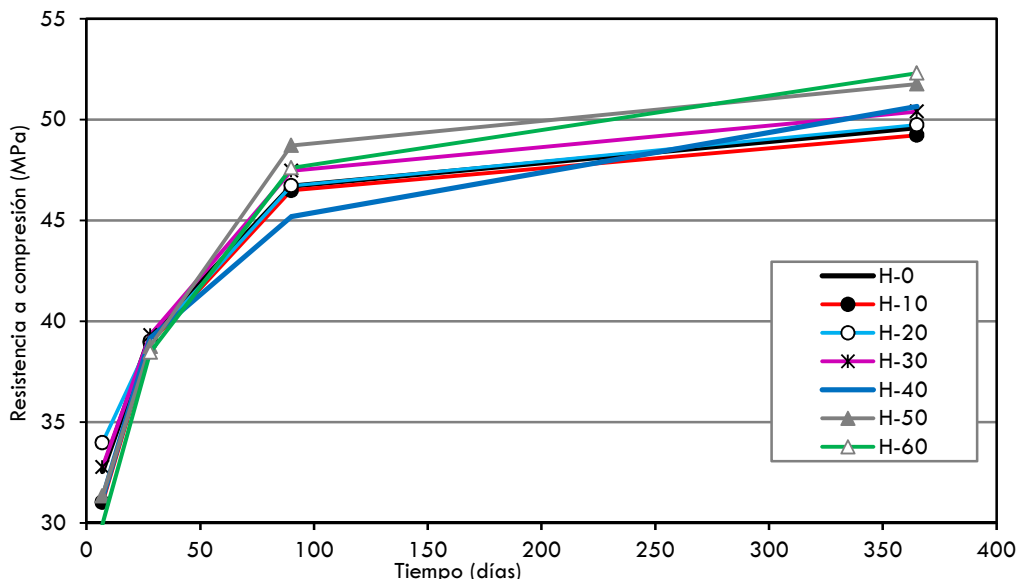


Figura 6.51. Evolución de la resistencia a compresión en función del contenido de EGAH

Tabla 6.26. Ratio de la resistencia a compresión a los 7, 28, 90 y 365 días

	Ratios a 7 días	Ratios a 28 días	Ratios a 90 días	Ratios a 365 días
H-0	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
H-10	95,3%	99,1%	99,6%	99,2%
H-20	104,4%	99,3%	100,1%	100,3%
H-30	100,6%	100,1%	101,6%	103,1%
H-40	95,8%	99,7%	96,8%	101,1%
H-50	96,3%	98,7%	104,3%	104,3%
H-60	92,0%	97,9	102,0	105,4%

La diferencia de resistencia a compresión en los diferentes hormigones a la edad de 7 días llega hasta un 8% para el H-60. Con el paso del tiempo estas diferencias negativas se anulan hasta el punto de superar al HAC de referencia a los 90 y 365 días y en mayor medida cuanto más escoria se utilizó como árido en los HAC. Para pequeñas sustituciones, las variaciones son menos significativas y evolucionan de forma similar al H-0. Esto se observa con claridad en la figura 6.52, donde se representa la evolución de los ratios con el paso del tiempo tomando como referencia los resultados a 28 días (100%) de cada HAC.

Estos ratios se expresan como el cociente entre la resistencia a una edad i y la resistencia a 28 días. La evolución de resistencias para el H-60 pasa del 77,8% a 7 días al 136,0% a 365 días, muy similar a lo ocurrido en H-50, constatando nuevamente que los HAC con mayor cantidad de EGAH han sido los que más han aumentado de resistencia con el paso del tiempo y sobre todo en el último periodo estudiado (tabla 6.27).

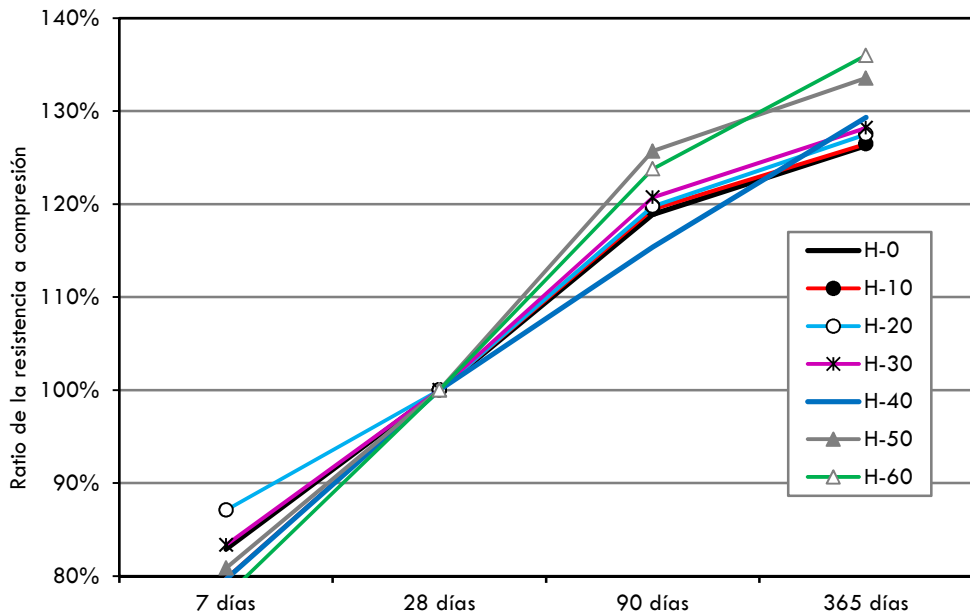


Figura 6.52. Ratios de la resistencia a compresión a los 7, 28, 90 y 365 días

Tabla 6.27. Ratios de la resistencia a compresión a 7, 90 y 365 días de cada hormigón con respecto a la resistencia a compresión a 28 días

	f_i/f_{28}			
	7 días	28 días	90 días	365 días
H-0	82,9%	100,0%	118,9%	126,3%
H-10	79,7%	100,0%	119,4%	126,5%
H-20	87,1%	100,0%	119,8%	127,5%
H-30	83,3%	100,0%	120,7%	130,1%
H-40	79,7%	100,0%	115,4%	128,0%
H-50	80,9%	100,0%	125,7%	133,6%
H-60	77,8%	100,0%	123,8%	136,0%

6.6. RESISTENCIA A TRACCIÓN

6.6.1. Resistencia a tracción indirecta

Se determinó la resistencia a tracción indirecta a los 28 y 90 días de edad en 2 probetas cilíndricas para cada dosificación, siendo a 28 días los valores expuestos en la tabla 6.28.

Tabla 6.28 Resultado de los ensayos a tracción indirecta a los 28 días

HAC	Tensión de Rotura (MPa)	Resistencia media a tracción indirecta(MPa)
H-0	3,42	3,52
	3,62	
H-10	3,28	3,34
	3,40	
H-20	3,32	3,76
	4,19	
H-30	2,78	3,49
	4,19	
H-40	4,25	3,77
	3,29	
H-50	3,36	3,28
	3,20	
H-60	3,42	3,41
	3,40	

En la figura 6.53, en gráfica de cajas y bigotes, se muestran los resultados. No se obtiene ninguna tendencia pero si se aprecia una gran dispersión de valores en el H-20, H-30 y H-40. La tabla 6.29 ilustra el resumen estadístico de los datos obtenidos, confirmándose la alta dispersión de valores de H-20, H-30 y H-40 con coeficiente de variación de 16,38%, 28,61% y 18,01% respectivamente. En la tabla 6.30 se muestra los datos del ANOVA con un valor $P=0,9321 >> 0.05$, indicando que entre las medias de las muestras no existen diferencias significativas

para los diferentes cantidades de EGAH remplazada por árido fino, con un nivel del 95,0% de confianza.

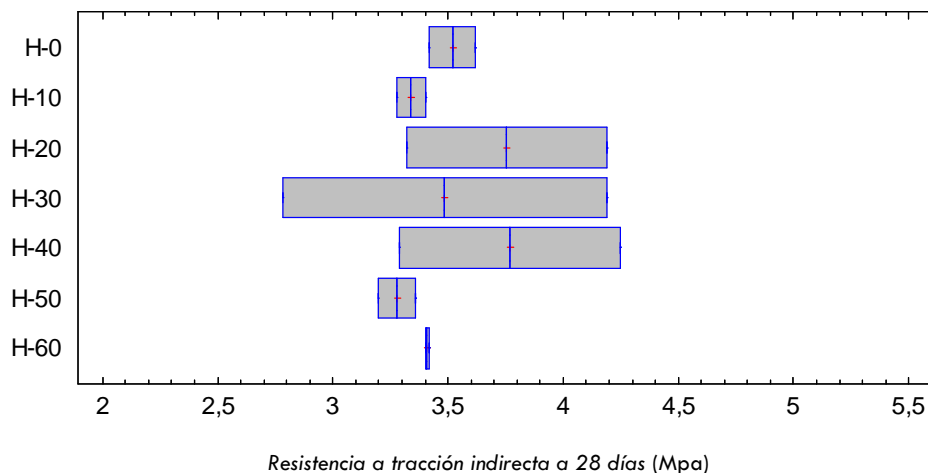


Figura 6.53. Gráfica de cajas y bigotes de resultados a tracción indirecta a 28 días

Tabla 6.29. Resumen estadístico de los resultados a tracción indirecta a 28 días

	N°	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación	Mínimo	Máximo	Rango
H-0	2	3,52	0,141	4,02%	3,42	3,62	0,20
H-10	2	3,34	0,084	2,54%	3,28	3,4	0,12
H-20	2	3,75	0,615	16,38%	3,32	4,19	0,87
H-30	2	3,48	0,997	28,61%	2,78	4,19	1,41
H-40	2	3,77	0,678	18,01%	3,29	4,25	0,96
H-50	2	3,28	0,113	3,45%	3,20	3,36	0,16
H-60	2	3,41	0,0141	0,41%	3,40	3,42	0,02
Total	14	3,51	0,421	12,02%	2,78	4,25	1,47

Tabla 6.30. ANOVA para los resultados a tracción indirecta a 28 días

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,440271	6	0,0733786	0,27	0,9321
Intra grupos	1,8735	7	0,267643		
Total (Corr.)	2,31377	13			

De la verificación por el método de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher se obtiene que las 7 dosificaciones pertenecen a un mismo

grupo homogéneo llamado “A”, no existiendo diferencias estadísticamente significativas entre todos ellos. Es decir, a los 28 días se puede considerar que la EGAH no afecta a la resistencia a tracción de los HAC.

En la tabla 6.31 y 6.32 se muestran los resultados a tracción indirecta a 90 días. En la figura 6.54, en gráfica de cajas y bigotes, se muestran los resultados. Al igual que a los 28 días, de los resultados obtenidos no obtenido ninguna tendencia y se obtiene una dispersión media similar a la obtenida a los 28 días. En la tabla 6.33 se muestra los datos del ANOVA con un valor $P=0,6388 >> 0.05$, indicando que entre las medias de las muestras no existen diferencias significativas para los diferentes cantidades de EGAH remplazada por árido fino, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 6.31. Resultado de los ensayos a tracción indirecta a 90 días

HAC	Tensión de Rotura (MPa)	Resistencia media a tracción indirecta(MPa)
H-0	3,50	3,19
	2,88	
H-10	3,05	3,13
	3,20	
H-20	2,68	3,07
	3,45	
H-30	2,74	2,58
	2,42	
H-40	2,95	3,21
	3,48	
H-50	3,15	3,18
	3,22	
H-60	3,57	3,19
	2,82	

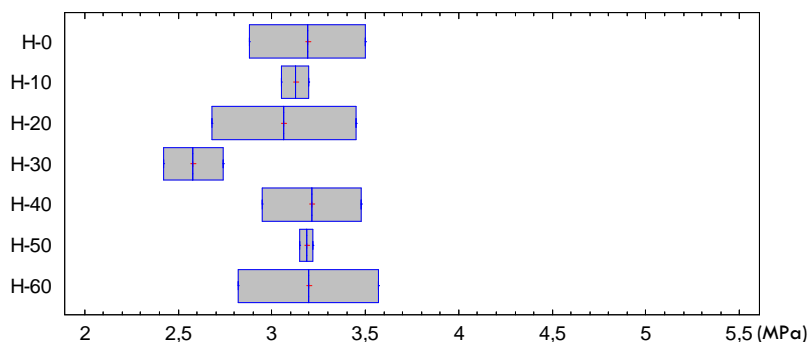


Figura 6.54. Gráfica de cajas y bigotes de resultados a tracción indirecta a 90 días

Tabla 6.32. Resumen estadístico de los resultados a tracción indirecta a 90 días

	N°	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación	Mínimo	Máximo	Rango
H-0	2	3,19	0,438	13,74%	2,88	3,50	0,62
H-10	2	3,13	0,106	3,39%	3,05	3,20	0,15
H-20	2	3,07	0,544	17,76%	2,68	3,45	0,77
H-30	2	2,58	0,226	8,77%	2,42	2,74	0,32
H-40	2	3,22	0,375	11,66%	2,95	3,48	0,53
H-50	2	3,19	0,049	1,55%	3,15	3,22	0,07
H-60	2	3,20	0,530	16,60%	2,82	3,57	0,75
Total	14	3,08	0,350	11,35%	2,42	3,57	1,15

Tabla 6.33. ANOVA para los resultados a tracción indirecta a 90 días

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,613	6	0,1022	0,73	0,6388
Intra grupos	0,975	7	0,1393		
Total (Corr.)	1,588	13			

En los resultados a tracción indirecta a 28 y 90 días no se han obtenido diferencias significativas para las diferentes cantidades de EGAH remplazada por árido fino. La gran similitud de los valores obtenidos en ambas fechas (tabla 6.34) constata que en el periodo de 28 a 90 días los HAC no obtienen incrementos significativos a tracción indirecta (figura 6.55). La tabla 6.35 ilustra el resumen estadístico de los datos obtenidos a 28 a 90 días tratados de forma conjunta. En la tabla

6.36 se muestra los datos del ANOVA con un valor $P=0,8732 \gg 0.05$, indicando que no existen diferencias significativas en lo HAC con diferentes cantidades de EGAH (95,0% de confianza).

Tabla 6.34 Resultado de los ensayos a tracción indirecta a 28 y 90 días

HAC	Tensión de rotura a 28 días (MPa)	Tensión de rotura a 90 días (MPa)
H-0	3,42	3,50
	3,62	2,88
H-10	3,28	3,05
	3,40	3,20
H-20	3,32	2,68
	4,19	3,45
H-30	2,78	2,74
	4,19	2,42
H-40	4,25	2,95
	3,29	3,48
H-50	3,36	3,15
	3,20	3,22
H-60	3,42	3,57
	3,40	2,82

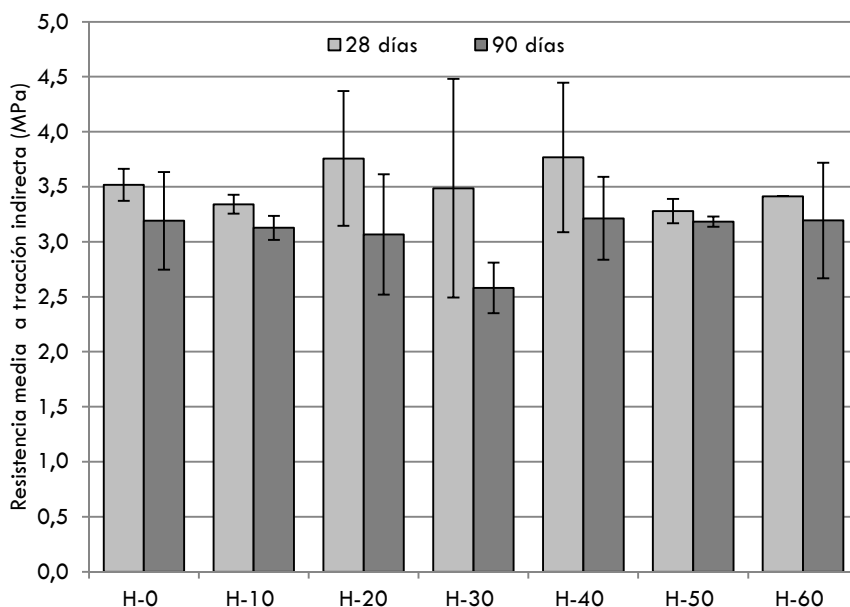


Figura 6.55. Histograma de resistencias a tracción indirecta a 28 y 90 días

Tabla 6.35. Resumen estadístico de los resultados de tracción ind. a 28 y 90 días

	N°	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación	Mínimo	Máximo	Rango
H-0	4	3,35	0,327	9,76%	2,88	3,62	0,74
H-10	4	3,23	0,148	4,57%	3,05	3,40	0,35
H-20	4	3,41	0,619	18,15%	2,68	4,19	1,51
H-30	4	3,03	0,788	25,97%	2,42	4,19	1,77
H-40	4	3,49	0,550	15,76%	2,95	4,25	1,30
H-50	4	3,23	0,088	2,73%	3,15	3,36	0,21
H-60	4	3,30	0,331	10,02%	2,82	3,57	0,75
Total	28	3,29	0,438	13,31%	2,42	4,25	1,83

Tabla 6.36. ANOVA para resultados a tracción indirecta a 28 y 90 días

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,527	6	0,0878	0,40	0,8732
Intra grupos	4,659	21	0,2218		
Total (Corr.)	5,187	27			

La verificación por el método de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher indica que las 7 dosificaciones pertenecen a un mismo grupo homogéneo llamado "A", no existen diferencias estadísticamente significativas entre todos ellos. Es decir, a los 28 y 90 días se puede considerar que la EGAH ni el paso del tiempo afecta significativamente a la tracción de los HAC. Es de destacar el alto coeficiente de variación medio obtenido a las diferentes edades para el ensayo de tracción indirecta, obteniendo un coeficiente de variación medio del 13,31% con los datos tratados de forma conjunta.

6.6.2. Resistencia a flexotracción

Se determinó la resistencia a flexotracción, a los 28 días de edad, en 3 probetas prismáticas para cada dosificación, siendo los valores expuestos en la tabla 6.37. En la figura 6.56 se muestran los resultados en gráfica de cajas y bigotes. No se obtiene ninguna tendencia. La tabla 6.38 muestra el resumen estadístico de dichos resultados. En la tabla 6.39 se muestran los valores del ANOVA. Se ha obtenido un valor P de 0,4416, indicando que no existen diferencias significativas entre los diferentes HAC, con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 6.37. Resultado de los ensayos a flexotracción a 28 días

HAC	Resistencia a flexotracción (MPa)	Resistencia media a flexotracción (MPa)
H-0	6,71	6,05
	6,31	
	5,14	
H-10	6,27	6,22
	6,67	
	5,72	
H-20	6,78	6,62
	7,02	
	6,05	
H-30	5,22	5,49
	5,80	
	5,46	
H-40	5,82	5,66
	5,31	
	5,86	
H-50	6,47	5,73
	4,82	
	5,89	
H-60	5,01	6,00
	6,08	
	6,90	

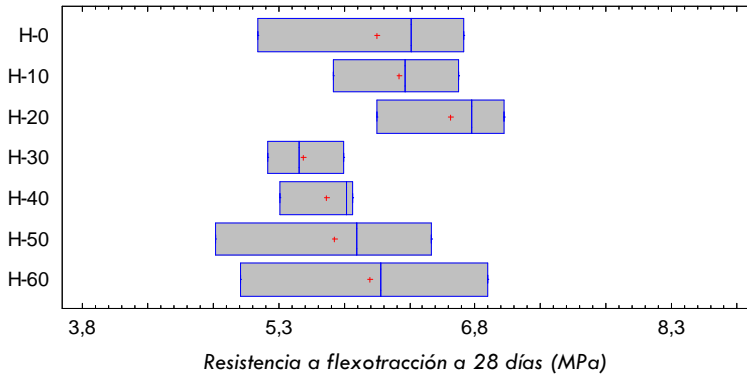


Figura 6.56. Gráfica de cajas y bigotes de resultados a flexotracción a 28 días

Tabla 6.38. Resumen estadístico para los resultados a flexotracción a 28 días

	N°	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación	Mínimo	Máximo	Rango
H-0	3	6,05	0,817	13,49%	5,14	6,71	1,57
H-10	3	6,22	0,479	7,70%	5,72	6,67	0,95
H-20	3	6,62	0,506	7,65%	6,05	7,02	0,97
H-30	3	5,49	0,290	5,27%	5,22	5,80	0,58
H-40	3	5,66	0,307	5,43%	5,31	5,86	0,55
H-50	3	5,73	0,834	14,57%	4,82	6,47	1,64
H-60	3	6,00	0,948	15,81%	5,01	6,90	1,89
Total	21	5,97	0,650	10,90%	4,82	7,02	2,20

Tabla 6.39. ANOVA para los resultados a flexotracción a 28 días

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2,604	6	0,434	1,04	0,4416
Intra grupos	5,851	14	0,417		
Total (Corr.)	8,455	20			

A los 90 días de edad se analizaron a flexotracción 3 probetas prismáticas para cada dosificación (tabla 6.40). La tabla 6.41 muestra el resumen estadístico de dichos resultados. En la tabla 6.42 se muestran los valores del ANOVA. Se ha obtenido un valor P de 0,0022, menor que 0.05 indica que entre las medias de las muestras existen diferencias significativas para las diferentes cantidades de EGAMH reemplazada por

árido fino, con un nivel del 95,0% de confianza. En la figura 6.57 se muestran, en gráfica de cajas y bigotes, una ligera tendencia negativa rota principalmente por el H-0.

Tabla 6.40. Resultado de los ensayos a flexotracción a 90 días

HAC	Resistencia a flexotracción (MPa)	Resistencia media a flexotracción (MPa)
H-0	6,05	5,71
	5,49	
	5,58	
H-10	6,54	6,55
	6,45	
	6,66	
H-20	7,13	6,86
	6,77	
	6,68	
H-30	7,04	6,56
	6,05	
	6,59	
H-40	6,94	6,39
	6,52	
	5,70	
H-50	5,29	5,57
	6,26	
	5,16	
H-60	5,49	5,29
	5,10	
	5,28	

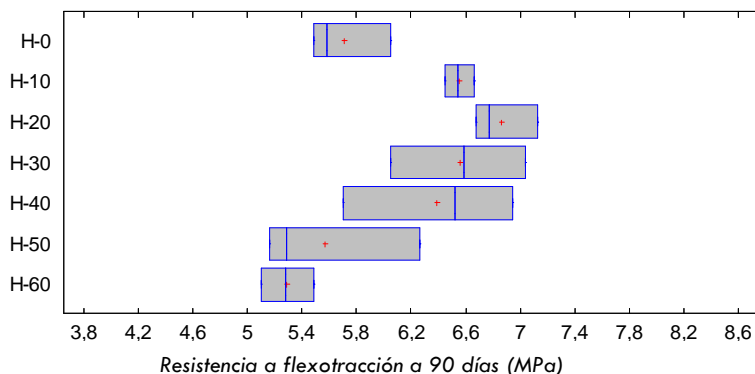


Figura 6.57. Gráfica de cajas y bigotes de los resultados a flexotracción a 90 días

Tabla 6.41. Resumen estadístico para resultados a flexotracción a 90 días

	N°	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación	Mínimo	Máximo	Rango
H-0	3	5,71	0,301	5,27%	5,49	6,05	0,56
H-10	3	6,55	0,105	1,61%	6,45	6,66	0,21
H-20	3	6,86	0,238	3,47%	6,68	7,13	0,45
H-30	3	6,56	0,496	7,56%	6,05	7,04	0,99
H-40	3	6,39	0,631	9,87%	5,70	6,94	1,24
H-50	3	5,57	0,601	10,79%	5,16	6,26	1,10
H-60	3	5,29	0,195	3,69%	5,10	5,49	0,39
Total	21	6,13	0,666	10,87%	5,10	7,13	2,03

Tabla 6.42. ANOVA para resultados a flexotracción a 90 días

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	6,475	6	1,079	6,29	0,0022
Intra grupos	2,402	14	0,171		
Total (Corr.)	8,877	20			

Para determinar la posible evolución de la resistencias entre los 28 y 90 días se analizan todos los resultados de forma conjunta (figura 6.58). La tabla 6.43 ilustra el resumen estadístico de los datos obtenidos a 28 a 90 días tratados de forma conjunta. En la tabla 6.44 se muestra los datos del ANOVA con un valor $P = 0,4416 \gg 0,05$, indicando que no existen diferencias significativas en lo HAC con diferentes cantidades de EG AH (95,0% de confianza).

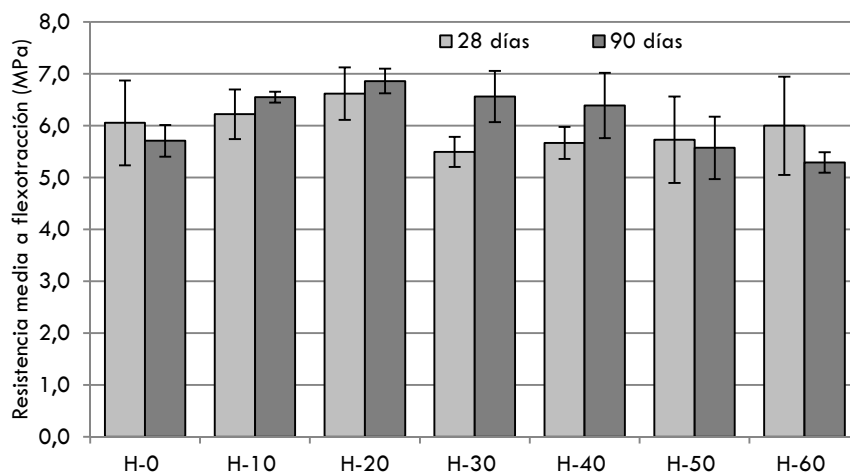
**Figura 6.58.** Histogramas de las resistencias a flexotracción a 28 y 90 días

Tabla 6.43. Resumen estadístico de los resultados a flexotracción a 90 días

	N°	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación	Mínimo	Máximo	Rango
H-0	3	6,053	0,816669	13,49%	5,139	6,711	1,572
H-10	3	6,219	0,478808	7,70%	5,718	6,672	0,954
H-20	3	6,615	0,505845	7,65%	6,048	7,02	0,972
H-30	3	5,491	0,289501	5,27%	5,22	5,796	0,576
H-40	3	5,664	0,307291	5,43%	5,31	5,862	0,552
H-50	3	5,726	0,834476	14,57%	4,821	6,465	1,644
H-60	3	5,996	0,948068	15,81%	5,007	6,897	1,89
Total	21	5,96629	0,650205	10,90%	4,821	7,02	2,199

Tabla 6.44. ANOVA para resultados a flexotracción a 90 días

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	6,475	6	0,434054	1,04	0,4416
Intra grupos	2,402	14	0,41793		
Total (Corr.)	8,877	20			

Con el tratamiento conjunto de los resultados a los 28 y 90 días se considera que la EGAH no afecta significativamente a la flexotracción de los HAC.

Es de destacar nuevamente el alto coeficiente de variación medio obtenido a las diferentes edades para el ensayo de flexotracción, obteniendo un coeficiente de variación medio del 10,90% con los datos tratados de forma conjunta, algo menor que el 13,31% de los ensayos de tracción indirecta.

De los resultados y análisis realizados, tanto del ensayo de tracción indirecta como de flexotracción, se obtienen similares conclusiones. La cantidad de EGAH utilizada en los diferentes HAC no afecta significativamente en los resultados de ambos ensayos relacionados con la tracción de los hormigones.

6.6.3. Resistencia a tracción según varias instrucciones.

El cálculo teórico de la resistencia a tracción según la EHE-08 (Artículo 39.1°), a los 28 días, se realiza mediante la ecuación siguiente.

$$f_{ct,m} = 0,30 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \text{ para } f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$$
$$f_{ct,m} = 0,58 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \text{ para } f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2$$

Donde;

$f_{ct,m}$ resistencia media a tracción.

f_{ck} resistencia característica a compresión a 28 días.

En la tabla 6.45 se recogen las expresiones de cálculo para otras instrucciones analizadas. En la tabla 6.46 y figura 6.59 se muestran todos los resultados obtenidos a 28 días y en la tabla 6.47 se indican el cociente entre los valores experimentales y los obtenidos con las diferentes normativas.

Los resultados a los 28 días muestran que las expresiones propuestas por la EHE-08 y el CM-2010 infravaloran hasta un 15% los resultados experimentales. El ACI 2008 los sobrevalora hasta un 18% y el CM-1993 y el EC-2 son los que más se ajustan a los resultados experimentales, con valores superiores e inferiores a los experimentales que se pueden considerar dentro de los errores propios del ensayo (diferencias máximas del 9%).

Tabla 6.45. Fórmulas para determinar la resistencia a tracción según diferentes normativas

Norma	Formula de la resistencia a tracción(MPa)
CEB-FIB Model Code (2010), ≤ C50	$0,3 \cdot (f_{ck})^{2/3}$
CEB-FIB Model Code (1993), para $f_c < 80$ MPa	$1,56 \sqrt[3]{\left(\frac{f_{cm}-8}{10}\right)^2}$
ACI Committee 363R (2008):	$0,59 \cdot \sqrt{f_{cm}}$
Eurocódigo 2	$1/3 \cdot (f_{cm}-8)^{2/3}$

Tabla 6.46. Comparación de la resistencia a tracción experimental y la calculada teóricamente según diferentes normativas, a la edad de 28 días

	Valores experimentales		fctm(Mpa)	fct,m(Mpa)				
	fcti(Mpa)	fck(Mpa)		EHE-08	ACI 2008	CM-1993	CM-2010	EC-2
H-0	3,52	39,24	3,17	2,98	3,70	3,33	2,98	3,31
H-10	3,34	38,91	3,01	2,95	3,68	3,31	2,95	3,28
H-20	3,75	38,71	3,38	2,94	3,67	3,30	2,94	3,27
H-30	3,48	39,19	3,13	2,97	3,69	3,33	2,97	3,30
H-40	3,77	38,89	3,39	2,95	3,68	3,31	2,95	3,28
H-50	3,28	38,18	2,95	2,91	3,65	3,26	2,91	3,23
H-60	3,41	38,69	3,07	2,94	3,67	3,29	2,94	3,27

* $f_{ct} = 0,9 \cdot f_{cti}$

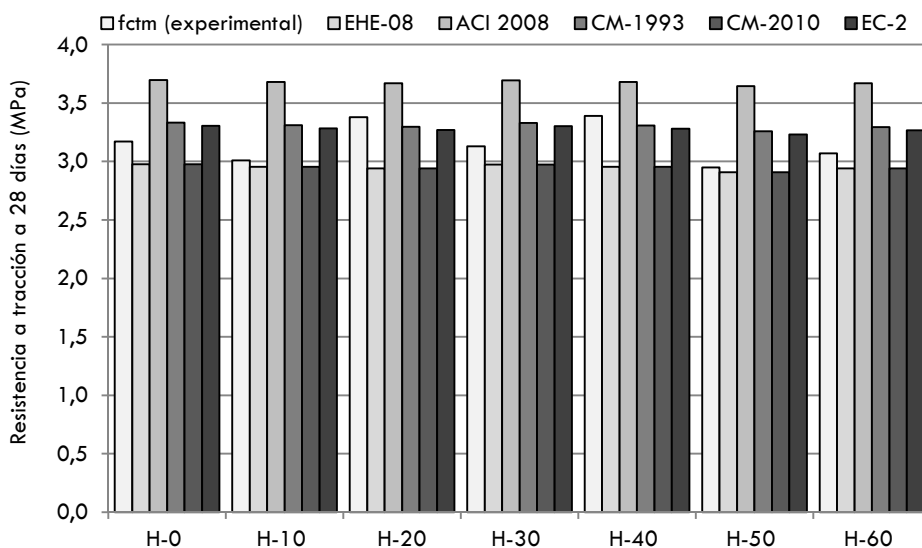


Figura 6.59. Resultados comparativos entre la diferentes normativas a 28 días

Tabla 6.47. Cociente entre los valores experimentales y según normativas a 28 días

	$f_{c, \text{exp}} / f_{\text{EHE-08}}$	$f_{c, \text{exp}} / f_{\text{ACI 2008}}$	$f_{c, \text{exp}} / f_{\text{CM-1993}}$	$f_{c, \text{exp}} / f_{\text{CM-2010}}$	$f_{c, \text{exp}} / f_{\text{EC-2}}$
H-0	1,07	0,86	0,95	1,07	0,96
H-10	1,02	0,82	0,91	1,02	0,92
H-20	1,15	0,92	1,02	1,15	1,03
H-30	1,05	0,85	0,94	1,05	0,95
H-40	1,15	0,92	1,03	1,15	1,03
H-50	1,01	0,81	0,91	1,01	0,91
H-60	1,04	0,84	0,93	1,04	0,94

Los resultados que se obtienen con las mismas expresiones a los 90 días se muestran en la tabla 6.48 y figura 6.60. En la tabla 6.49 se indican el resultado del cociente entre los valores experimentales y los obtenidos con las diferentes normativas analizadas.

En este caso, todas las expresiones analizadas sobrevaloran en gran medida los resultados experimentales. Esto sugiere que las expresiones analizadas no son válidas para edades diferentes a 28 días.

Tabla 6.48. Comparación de la resistencia a tracción experimental y la calculada teóricamente según diferentes normativas, a la edad de 90 días

	Valores experimentales		$f_{ctm}(\text{Mpa})$	$f_{ct,m}(\text{Mpa})$				
	$f_{cti}(\text{Mpa})$	$f_{ck}(\text{Mpa})$		EHE-08	ACI 2008	CM-1993	CM-2010	EC-2
H-0	3,19	46,65	2,87	3,43	4,03	3,84	3,43	3,81
H-10	3,13	46,49	2,82	3,42	4,02	3,83	3,42	3,80
H-20	3,07	46,72	2,76	3,43	4,03	3,85	3,43	3,82
H-30	2,58	47,51	2,32	3,48	4,07	3,90	3,48	3,87
H-40	3,22	44,96	2,90	3,33	3,96	3,73	3,33	3,70
H-50	3,19	48,72	2,87	3,55	4,12	3,98	3,55	3,95
H-60	3,20	47,61	2,88	3,49	4,07	3,91	3,49	3,87

* $f_{ct} = 0,9 \times f_{cti}$

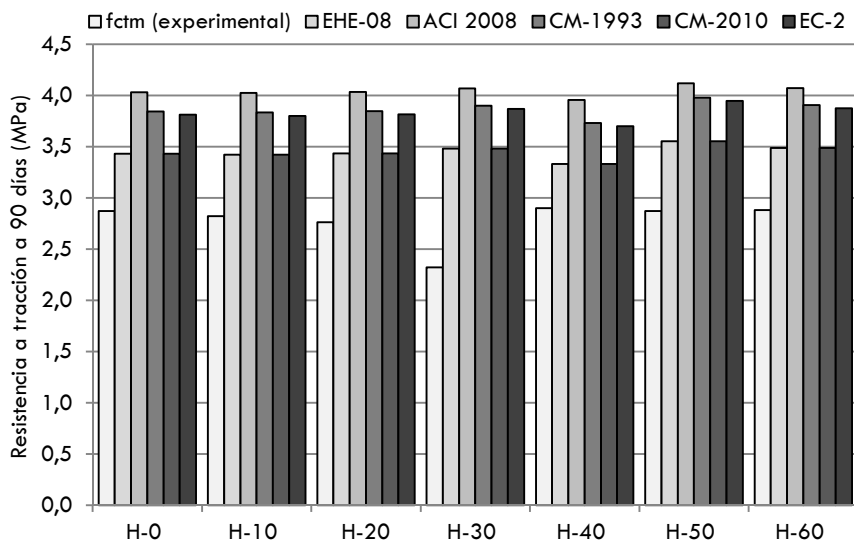


Figura 6.60. Resultados comparativos entre la diferentes normativas a 90 días

Tabla 6.49. Cociente entre los valores experimentales y según normativas a 90 días

	$f_{c, \text{exp}} / f_{\text{EHE-08}}$	$f_{c, \text{exp}} / f_{\text{ACI 2008}}$	$f_{c, \text{exp}} / f_{\text{CM-1993}}$	$f_{c, \text{exp}} / f_{\text{CM-2010}}$	$f_{c, \text{exp}} / f_{\text{Ec-2}}$
H-0	0,84	0,71	0,75	0,84	0,75
H-10	0,82	0,70	0,74	0,82	0,74
H-20	0,80	0,69	0,72	0,80	0,72
H-30	0,67	0,57	0,60	0,67	0,60
H-40	0,87	0,73	0,78	0,87	0,78
H-50	0,81	0,70	0,72	0,81	0,73
H-60	0,83	0,71	0,74	0,83	0,74

6.7. MÓDULO DE DEFORMACIÓN

6.7.1. Módulo de deformación del mortero

Se han ensayado tres probetas de mortero con cada árido utilizado en los HAC. La EGAH y la piedra caliza utilizadas contaban con una granulometría cerrada de entre 1,15 y 2,50 mm. Las probetas se llevaron hasta la rotura en el ensayo para obtener el módulo de deformación estático en compresión. En la figura 6.61 se representan los resultados medios de los 3 ensayos realizados con cada árido. Se destaca que las tres probetas con árido calizo han resistido mayores esfuerzos a compresión para una misma deformación, frente a los morteros fabricados únicamente con EGAH como árido.

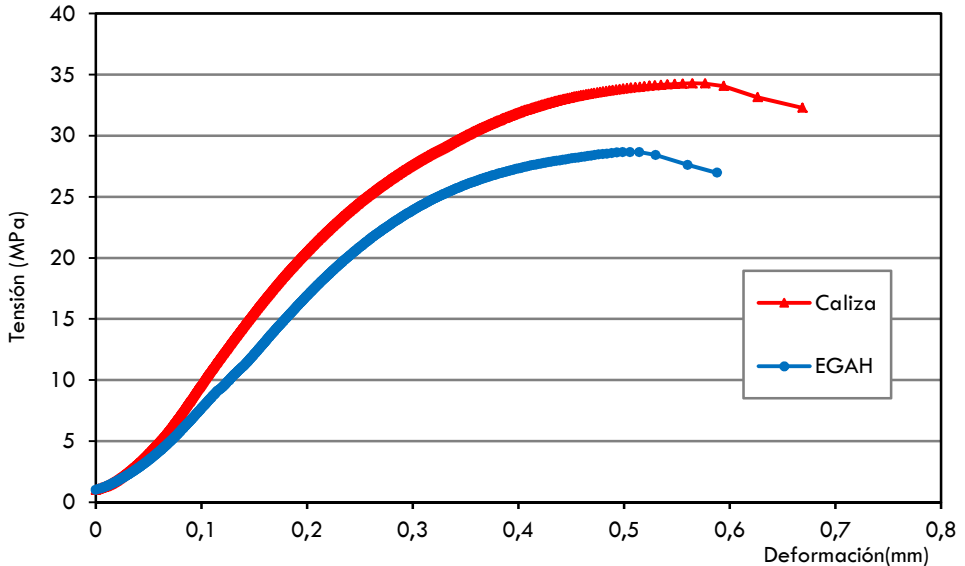


Figura 6.61. Resultados medios del módulo de deformación de los morteros

Para el cálculo del módulo de deformación (E_c) se utiliza el tramo de la curva entre las tensiones de 0,5 MPa y el 40% de la tensión media de rotura. Se utiliza la expresión:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = (\text{MPa})$$

dónde:

$\Delta\sigma$ incremento de tensión.
 $\Delta\varepsilon$ incremento deformación.

Los valores E_c resultantes para ambos morteros son los indicados en la tabla 6.50. De los datos se desprende que el mortero fabricado con arena caliza es un 25% más rígido, y por tanto menos deformable, que el fabricado con EGAH¹⁶.

Tabla 6.50. Valores de E_c resultantes para ambos morteros

Mortero con 100%de :	Módulo de deformación (GPa) a 28 días
Arena Caliza	10,10
EGAH	8,04

¹⁶ El artículo 39.6 de la EHE se indica que se puede corregir el valor del módulo de deformación con un coeficiente α en función del tipo de árido utilizado. Para áridos muy poroso α puede ser igual a 0,9.

6.7.2. Módulo de deformación de los HAC

Los ensayos del módulo de deformación se realizaron a los 28 días sobre dos probetas por dosificación. En la tabla 6.51 se presentan los valores obtenidos para cada hormigón autocompactante y la media en función de la sustitución de EGAH.

Tabla 6.51. Resultados del módulo de deformación a 28 días

	Módulo de deformación (MPa) a 28 días	Módulo medio de deformación (MPa)	Ratio del módulo de deformación
H-0	30.868,3	30.538,6	1,00
	30.209,0		
H-10	29.070,4	29.017,0	0,95
	28.963,6		
H-20	29.435,2	29.404,4	0,96
	29.373,6		
H-30	29.906,1	28.750,1	0,94
	27.594,1		
H-40	27.982,0	28.445,4	0,93
	28.908,9		
H-50	28.536,7	28.803,8	0,94
	29.070,9		
H-60	29.139,0	28.651,6	0,94
	28.164,3		

En la figura 6.62, en grafica de cajas y bigotes, se muestran los datos para cada sustitución de EGAH. Con el incremento de la cantidad de EGAH el módulo de deformación de los HAC disminuye ligeramente y por tanto también su rigidez.

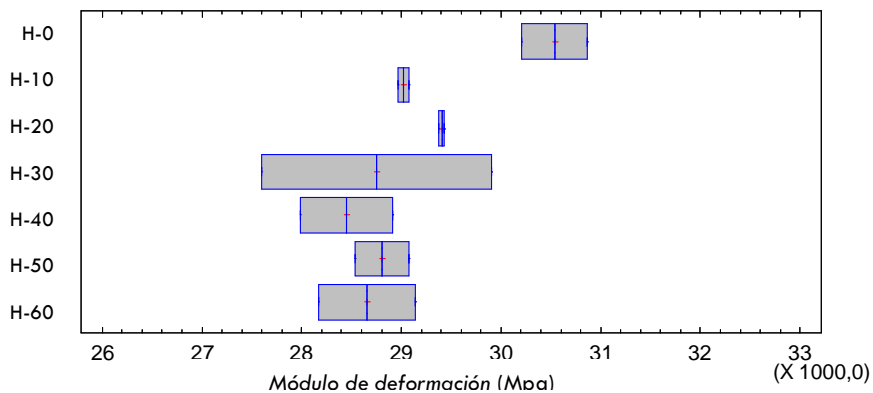


Figura 6.62. Gráfica de cajas y bigotes de los resultados del módulo de deformación

La tabla 6.52 ilustra el resumen estadístico para los datos del módulo de elasticidad a 28 días. En la tabla 6.53 del ANOVA se presentan los valores de variabilidad entre y dentro de grupos. En este caso el valor $P=0,234$ mayor que 0.05 indica que entre las medias de las muestras no existen diferencias significativas para los diferentes cantidades de EGAH remplazada por árido fino, con un nivel del 95,0% de confianza. Existe una ligera tendencia descendente, si bien las diferencias no son estadísticamente significativas (tabla 6.53).

Tabla 6.52. Resumen estadístico de los resultados del módulo de deformación

	N°	Promedio	Desviación Est.	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
H-0	2	30538,7	466,1	1,53%	30209,0	30868,3
H-10	2	29017	75,5	0,26%	28963,6	29070,4
H-20	2	29404,4	43,5	0,15%	29373,6	29435,2
H-30	2	28750,1	1634,8	5,69%	27594,1	29906,1
H-40	2	28445,5	655,4	2,30%	27982,0	28908,9
H-50	2	28803,8	377,7	1,31%	28536,7	29070,9
H-60	2	28651,7	689,2	2,41%	28164,3	29139,0
Total	14	29087,3	875,3	3,01%	27594,1	30868,3

Tabla 6.53. ANOVA para los resultados del módulo de deformación

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	6,02E+06	6	1,00E+06	1,78	0,234
Intra grupos	3,94E+06	7	563555		
Total (Corr.)	9,96E+06	13			

El módulo de deformación obtenido es ligeramente menor, aunque no significativo, entre un 3,71% a 6,85% en los HAC con sustitución de escoria granulada de alto horno con respecto al de referencia (H-0). Esto se puede justificar en parte por el uso de la EGAH como árido fino en el hormigón autocompactante. En los ensayos de módulo de deformación realizados sobre morteros con EGAH y arena caliza se obtuvo que el mortero fabricado con arena caliza fue un 25% más rígido que el de EGAH, a pesar de que la escoria tiene mejores¹⁷ propiedades mecánicas que el árido calizo (tabla 5.4, ensayo de Micro-Deval). Esta menor rigidez para las muestras de EGAH repercute¹⁸ en los diferentes dosificaciones de HAC, los cuales cuentan con similares contenidos de pasta cementante. Con todo ello se puede determinar que la menor rigidez de las mezclas con EGAH, tanto de mortero como de HAC, es atribuible en mayor parte a su peor empaquetamiento por la gran angulosidad de la EGAH, lo que da lugar a mezclas de menor compacidad. Esto se comprobó en los ensayos de MIP, observando que los hormigones fabricados con más escoria tienen un mayor volumen total de poros.

¹⁷La microestructura del hormigón presenta una estructura heterogénea que exhibe diferentes comportamientos durante el proceso de carga debido a las diversas fases de los áridos, la matriz de pasta y a la interfase de árido-pasta (Topcu y Ugurlu, 2007). De esta manera, un cambio en la calidad de cualquiera de los componentes fundamentales representa un cambio en la respuesta del módulo y en general en el comportamiento del hormigón.

¹⁸La composición de la EGAH y su forma son los que determinan la mayor resistencia a la abrasión obtenida, a la vez su forma vesicular y su gran porosidad explican su alta absorción (8%, muy superior al 1% de los áridos calizo), repercutiendo en la deformabilidad elástica de los mismos (Neville 1983).

Una disminución en la porosidad de los áridos, o de cualquier otro componente de los hormigones, hace incrementar el módulo de deformación del hormigón (Neville, 1983; Mata, 2004; Koehler y Fowler, 2007).

La menor compacidad de los HAC con más cantidad de EGAH, tanto por su angulosidad como por su mayor absorción, se traduce en la densidad de los HAC elaborados y así se constata en la figura 6.63, obteniendo un descenso de la densidad y del módulo de deformación de los HAC con el aumento de la utilización de EGAH.

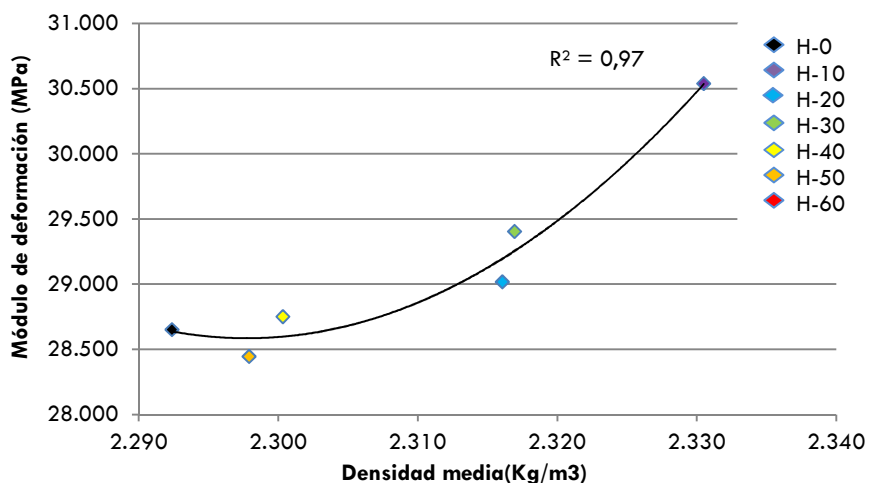


Figura 6.63. Relación entre densidad (Kg/m^3) y módulo de deformación (MPa)

Se puede establecer una relación entre la resistencia a compresión y el módulo de deformación, y así se ha establecido en estudios recientes (Domone, 2007; De Schutter et al., 2010). En la tabla 6.54 se muestran los valores del módulo de deformación y resistencia a compresión a 28

días. Se observa que a una mayor deformación de los HAC menor es su resistencia, motivado este efecto por numerosos fenómenos ya descritos, entre ellos la compacidad, la porosidad y las características de los materiales utilizados. La sustitución de parte de arena caliza, menos deformable y menos porosa (menor absorción), por EGAH influye en las propiedades mecánicas de los hormigones, con descenso del módulo de deformación y de la resistencia a compresión.

Tabla 6.54. Relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión a 28 días

	Módulo de deformación experimental(MPa)	Resistencia a compresión a 28 días (MPa)
H-0	30.539	39,2
H-10	29.017	38,9
H-20	29.405	38,7
H-30	28.750	39,2
H-40	28.446	38,9
H-50	28.804	38,2
H-60	28.652	38,7

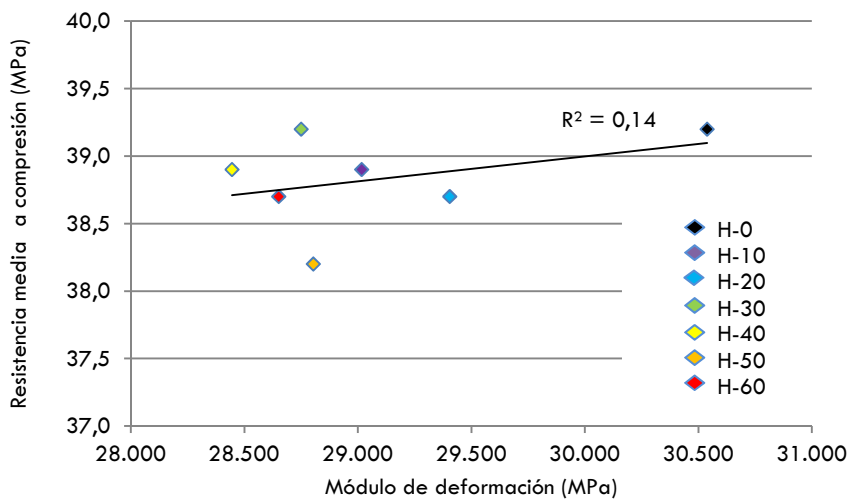


Figura 6.64. Relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión

6.7.3. Módulo de deformación según diferentes instrucciones.

En la tabla 6.55 se muestran las expresiones de las normativas analizadas (EHE-08, CM-2010, CM-1993, EC-2 y ACI 2008) para predecir el módulo de deformación teórico a 28 días, en donde f_{cm} es la resistencia media a compresión a 28 días de la fase experimental en MPa.

En la tabla 6.56 y figura 6.65 se muestran todos los resultados obtenidos a 28 días y en la tabla 6.57 se indican el cociente entre los valores experimentales y los obtenidos con las diferentes normativas.

Todos los resultados a los 28 días muestran que las expresiones propuestas por las instrucciones analizadas, salvo la del EC-2, infravaloran ligeramente los resultados experimentales, pudiendo considerarse las diferencias dentro de los errores propios del ensayo (diferencias máximas del 9%). El EC-2 sobrevalora hasta un 18% los hormigones analizados.

Tabla 6.55. Fórmulas para determinar el módulo de la deformación según diferentes normativas

Norma	Formula del módulo de deformación (MPa)
EHE-08	$8500 \cdot (f_{cm})^{1/3}$
CM-2010	$E_{co} \cdot \alpha_E \cdot (f_{cm}/10)^{1/3}$
CM-1993, para $f_c < 80$ MPa	$2,15 \times 10^4 (f_{cm}/10)^{1/3}$
EC-2	$22(f_{cm}/10)^{0,3}$
ACI 2008	$4700 \sqrt{f_{cm}}$

Tabla 6.56 Comparación del módulo de deformación experimental y el calculada teóricamente según diferentes normativas a la edad de 28 días

	Valores experimentales		E _{cm} (Mpa)				
	E _{cm} (Mpa)	f _{ck} (Mpa)	EHE-08	ACI 2008	CM-1993	CM-2010	EC-2
H-0	30538,5	39,24	28884,3	29441,7	28122,0	28122,0	33154,4
H-10	29017,0	38,91	28803,1	29317,6	27885,5	27885,5	33070,5
H-20	29404,5	38,71	28753,7	29242,2	27742,2	27742,2	33019,4
H-30	28750,0	39,19	28872,0	29422,9	28086,2	28086,2	33141,7
H-40	28445,5	38,89	28798,2	29310,1	27871,2	27871,2	33065,4
H-50	28804,0	38,18	28621,8	29041,3	27362,3	27362,3	32883,2
H-60	28651,5	38,69	28748,7	29234,6	27727,8	27727,8	33014,3

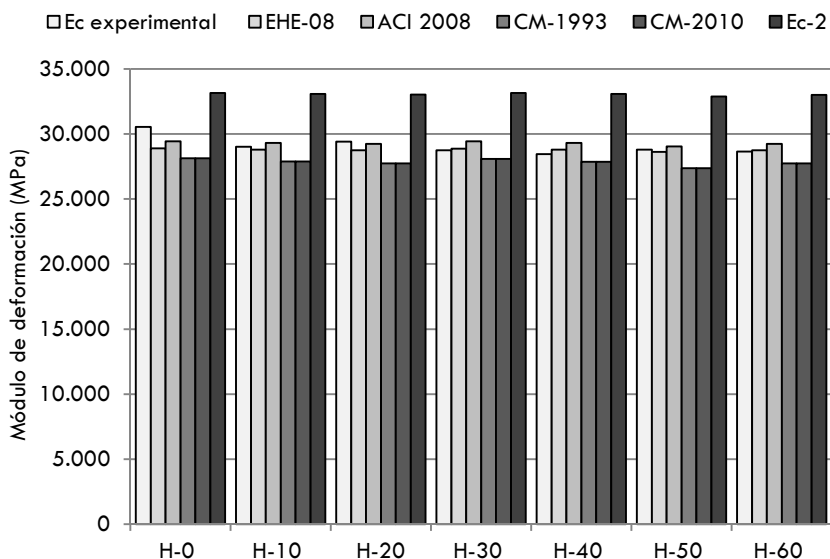


Figura 6.65. Resultados comparativos entre las diferentes normativas

Tabla 6.57. Cociente entre los valores experimentales y según normativas a 28 días.

	$\frac{E_{cm, exp}}{E_{cm} EHE-08}$	$\frac{E_{cm, exp}}{E_{cm} ACI 2008}$	$\frac{E_{cm, exp}}{E_{cm} CM-1993}$	$\frac{E_{cm, exp}}{E_{cm} CM-2010}$	$\frac{E_{cm, exp}}{E_{cm} EC-2}$
H-0	1,06	1,04	1,09	1,09	0,92
H-10	1,01	0,99	1,04	1,04	0,88
H-20	1,02	1,01	1,06	1,06	0,89
H-30	1,00	0,98	1,02	1,02	0,87
H-40	0,99	0,97	1,02	1,02	0,86
H-50	1,01	0,99	1,05	1,05	0,88
H-60	1,00	0,98	1,03	1,03	0,87

6.8. RETRACCIÓN DE LOS HAC

6.8.1. Introducción

En este apartado se describen los resultados de los ensayos vinculados con la retracción de los hormigones para el análisis de la retracción autógena, de la retracción de secado y de la retracción total de las 7 dosificaciones planteadas en esta investigación.

Para el análisis de las diferentes retracciones, previamente se muestran los resultados de la determinación del principio y final de fraguado de las 7 dosificaciones, la pérdida de peso de los HAC por pérdida de agua, la evolución de la temperatura de fraguado y la retracción a edad temprana (primeras 40 horas). Con todos los resultados de los ensayos indicados, junto con el resto ya analizados, se puede profundizar de mejor forma en cómo afecta en la retracción de los HAC la sustitución de parte del árido fino de cantera por EGAH.

A continuación se muestran los resultados de los ensayos indicados y finalmente se analizan los resultados obtenidos de retracción según los modelos propuestos por las siguientes normativas y códigos: EHE-08, ACI-92, EC-2 y CM-2010.

6.8.2. Determinación del inicio y final de fraguado

Se determinó el inicio y final de fraguado de las 7 dosificaciones para determinar el comienzo del ensayo de retracción a edad temprana. Se realizó en muestras de 12 litros para cada HAC (figura 6.66). Según la norma ASTM C 403-08, el tiempo de fraguado se establece en base al endurecimiento del hormigón por medio de la resistencia a la penetración de agujas en la mezcla (figura 6.66, izquierda). Con el paso del tiempo, desde el amasado, se fue variando de aguja de control (menor diámetro con el avance de fraguado). En función de la fuerza ejercida, determinada por una escala numérica en el vástago, y el diámetro de la aguja utilizada se calculó la tensión aplicada en cada momento. Se considera que el inicio y final de fraguado se produce cuando la resistencia a la penetración es de 3,5 MPa y 27,6, MPa, respectivamente. En la figura 6.67 se muestra los resultados obtenidos, destacando la similitud entre todas las dosificaciones. De acuerdo con ello, se adoptó para todas las dosificaciones unos tiempos de inicio y final de fraguado de 3 y 6 horas, respectivamente.



Figura 6.66. Izquierda, dispositivos realizando ensayo. Derecha, vista de las 7 muestras en la cámara de curado, en iguales condiciones de curado que las probetas utilizadas

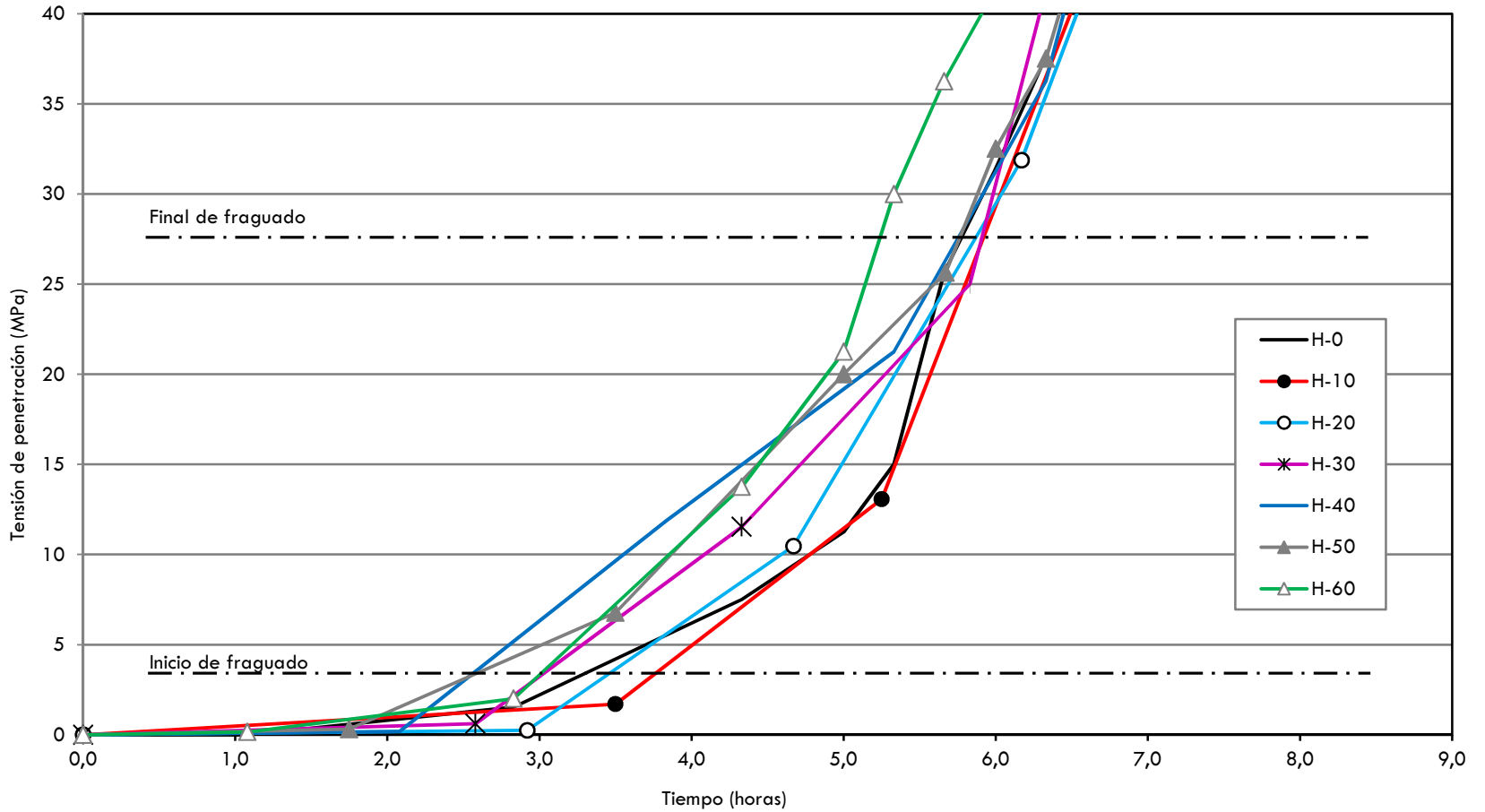


Figura 6.67. Evolución de la resistencia a la penetración. Determinación del inicio y final de fraguado para cada HAC

6.8.3. Ensayo de pérdida de peso en probetas prismática

Para el estudio de la pérdida de peso en probetas prismáticas por pérdida de agua se cogieron 2 probetas por dosificación y se introdujeron todas ellas en la cámara climática donde se han mantenido en posición vertical durante un año a 20 °C y HR del 50 % (figura 6.68).



Figura 6.68. Probetas a controlar su pérdida de peso en el interior de la cámara climática

En la figura 6.69 se muestran los resultados medios obtenidos para las 7 dosificaciones utilizadas. Las pérdidas de peso se calculan en porcentaje sobre el peso original de la probeta al comenzar el ensayo. Hay que destacar que cuanto mayor es el contenido EGAH utilizado la pérdida de peso es mayor. A los 5 días la diferencia es de hasta un 240% (Para el H-60 frente al H-0). A los 20 días la diferencia baja hasta el 210%. Las grandes diferencias obtenidas son debidas principalmente a la mayor introducción de agua libre en los poros de la EGAH (8% de absorción) y a la menor compacidad y mayor porosidad de los HAC con EGAH que facilita la salida y evaporación del agua libre. Con el paso del tiempo las diferencias se reducen (curvas paralelas) por la mayor evaporación inicial de los HAC con mayor cantidad EGAH, además del mayor refinamiento de los poros y del mayor consumo de agua de los HAC con EGAH por su hidratación a edades avanzadas.

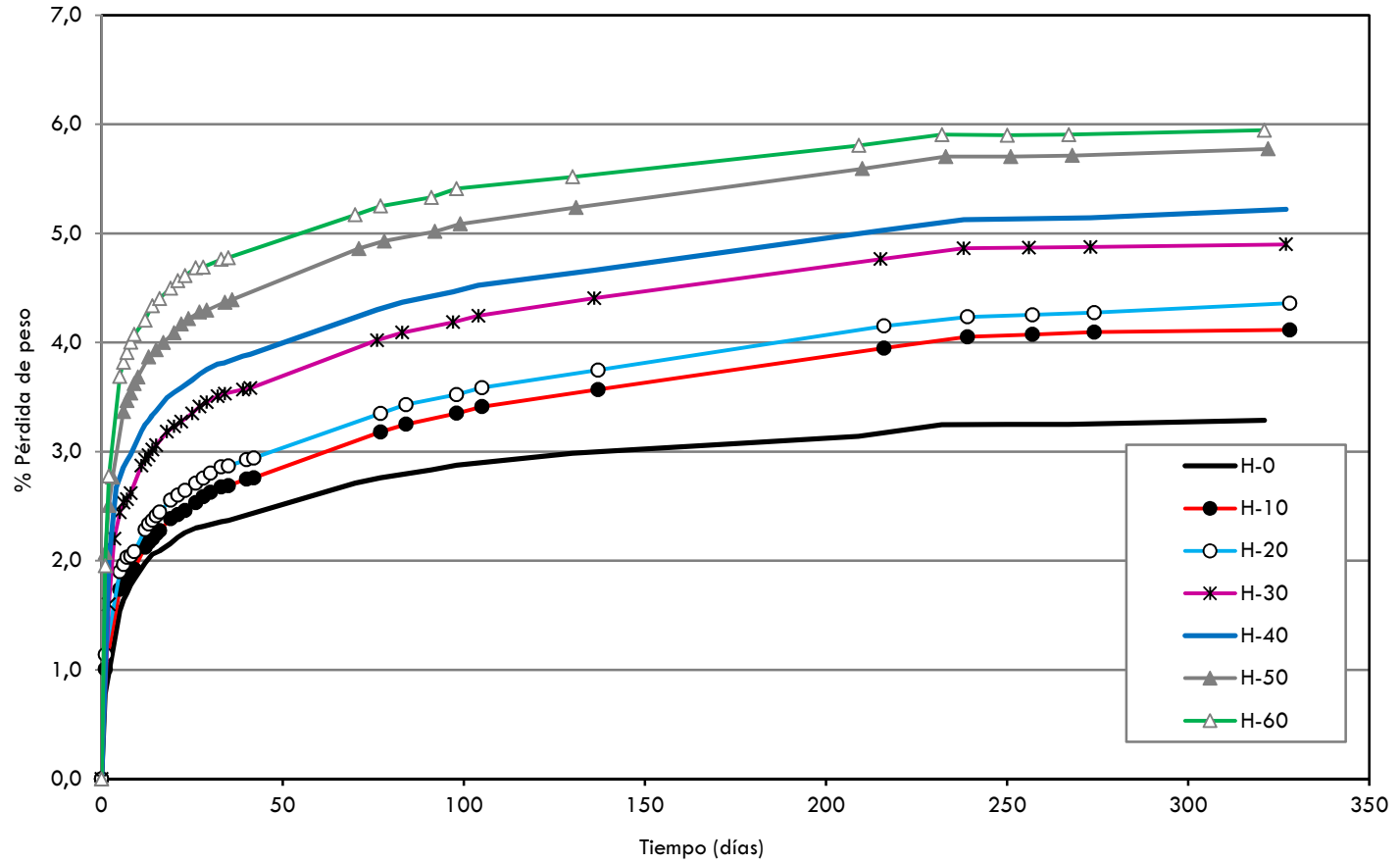


Figura 6.69. Evolución de pérdida de peso en probetas prismáticas para cada dosificación

6.8.4. Temperaturas del HAC durante el fraguado

En las probetas hormigonadas simultáneamente se generan tensiones de contracción y deformación térmica debido a la generación de calor durante la hidratación del cemento. La temperatura del hormigón se controló mediante termopares introducidos en el interior de las mezclas hasta la edad de 28 horas (figura 6.70). Tras el hormigonado, las probetas se introdujeron en la cámara climática donde se mantuvieron un periodo de 48 horas a $20,0 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ y HR del 50 % (interior de la cámara de curado). En la figura 6.71 se muestran los resultados obtenidos para las 7 dosificaciones durante las primeras 28 horas, edad en la que todas las probetas habían igualado ya su temperatura con la exterior. Es de destacar la similitud de la evolución de la temperatura de todos los HAC con el paso del tiempo. La temperatura máxima se alcanzó entorno a las 12 horas.

Durante el periodo de tiempo analizado la variación de temperatura entre los diferentes HAC ha sido pequeña (inferior en todos los casos a $1,0^{\circ}\text{C}$), debido en parte a la composición química del cemento (bajo contenido en C_3A) y en parte al pequeño tamaño de la probeta de hormigón. En la figura 6.71 se observa que el incremento de temperatura es muy similar en todos los hormigones y se produce durante las primeras 10-12 horas, tras lo cual disminuye hasta alcanzar la temperatura ambiente antes de las 24 horas de edad. Después de 24 h la variación de la temperatura en las mezclas estudiadas era pequeña, así que este efecto fue descartado.



Figura 6.70. Vistas de probetas con sondas térmicas instaladas

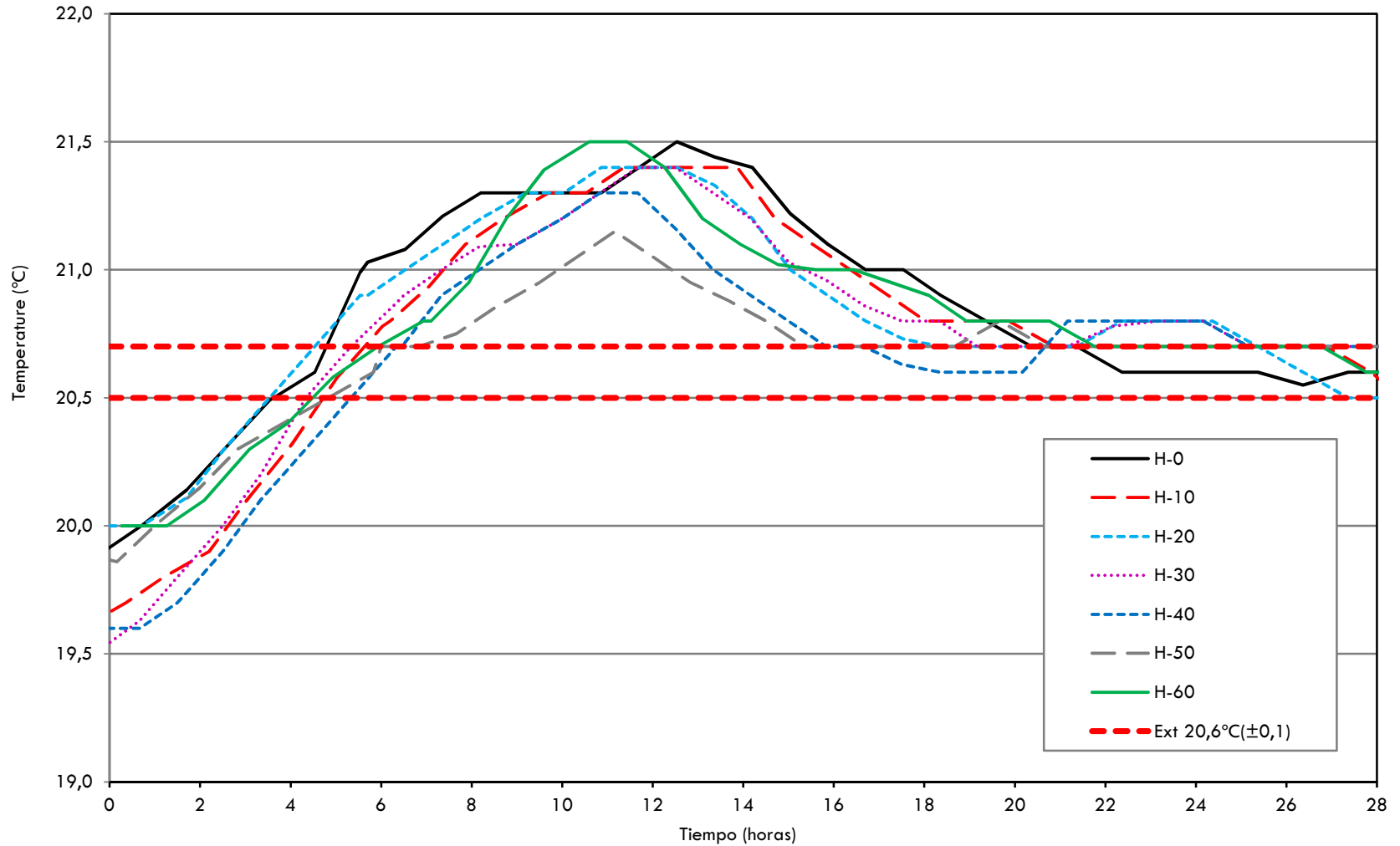


Figura 6.71. Evolución de la temperatura de fraguado (°C) para cada dosificación

6.8.5. Ensayo de retracción a edad temprana

Para determinar la retracción a edad temprana se utilizó la norma ASTM C 878-95 con un desmoldado completo una vez cumplido el tiempo final de fraguado (6 horas) determinado en muestras en iguales condiciones de curado y detallado anteriormente.

A las 6 horas del hormigonado (final de fraguado) se instaló el dispositivo de control digital con sensores de μm sobre cada probeta, dos por dosificación (figura 6.72).



Figura 6.72. Izquierda, probeta desmoldada tras acabar el fraguado. Derecha, instalación en el dispositivo de control digital midi LOGGR GL220 (μm)

En la figura 6.73 se muestran los resultados para las 7 dosificaciones utilizadas. Hay que destacar que al aumentar el contenido de EG AH la retracción aumenta significativamente. Así, por ejemplo, la deformación fue de $46 \mu\text{m}/\text{m}$ a las 40 horas para el H-0, mientras que para el H-60 fue de $78 \mu\text{m}/\text{m}$, es decir un 70% mayor. Dado que el

volumen de pasta cementante (cemento, cenizas volantes, finos y adición) ha sido prácticamente el mismo en todas las dosificaciones, las diferencias entre ellas se deben a que los hormigones fabricados con escoria, además de ser más deformables, son más porosos y de menor compacidad y, por lo tanto, la pérdida de agua se produce más rápidamente.

La edad muy corta a la que se ha realizado el ensayo (primeras 40 horas) hace que la participación de la EGAH en la fase hidratada sea nula (la retracción autógena es similar en todos los HAC a estas edades), por lo que las diferencias obtenidas entre los diferentes HAC son atribuibles, en su mayoría, al secado de las probetas. La evaporación de agua es mayor cuanto más EGAH se utiliza en la dosificación.

Una vez concluido el fraguado y comenzado este ensayo (6 horas del hormigonado), el agua libre no utilizada en la hidratación inicial hace que el hormigón contenga una alta humedad en el momento de comenzar el ensayo de retracción a edad temprana (tras sacar las probetas de la cámara de curado con $HR \approx 99\%$). Esta alta humedad produce una alta evaporación inicial de la probeta¹⁹, migrando el agua de los poros capilares hacia el exterior, con la consecuente pérdida de volumen de dichos poros por fuerzas internas de atracción de las paredes del capilar. Esto ocurre de la misma forma en las 7 dosificaciones utilizadas, aunque en mayor medida en los hormigones que utilizan mayor cantidad de EGAH. Para el caso del H-60 la diferencia de agua introducida en los

¹⁹En ambientes con HR inferiores a la existente en el interior del hormigón (inicialmente cerca del 99% al salir de la cámara de curado) se produce el secado de éste por un intento de equilibrio higrométrico, comenzado por la desecación de las capas exteriores del hormigón y avanzando el frente de secado hacia el interior, debido a un gradiente de humedad (depresión capilar) de acuerdo a la segunda ley de difusión de Fick.

poros de la EGAH suponen un 20% ($43,4 \text{ l/m}^3$) más que en la dosificación de referencia sin escoria (H-0). Al quinto día desde el amasado, el H-0 perdió 143,25 gramos de agua (valor medio de las dos probetas analizadas), frente a los 344,55 gramos del H-60, un 240% mayor y similar a lo obtenido en la retracción temprana, con un 204% mayor para el H-60 a las 30 horas sobre el de referencia (tabla 6.58).

Tabla 6.58. Ratios de la evolución de la retracción en relación al H-0

Ratio retracción	H-0	H-10	H-20	H-30	H-40	H-50	H-60
10 horas	100%	237%	211%	269%	274%	332%	347%
20 horas	100%	133%	137%	181%	197%	267%	265%
30 horas	100%	128%	128%	137%	173%	190%	204%
40 horas	100%	117%	104%	110%	132%	148%	171%

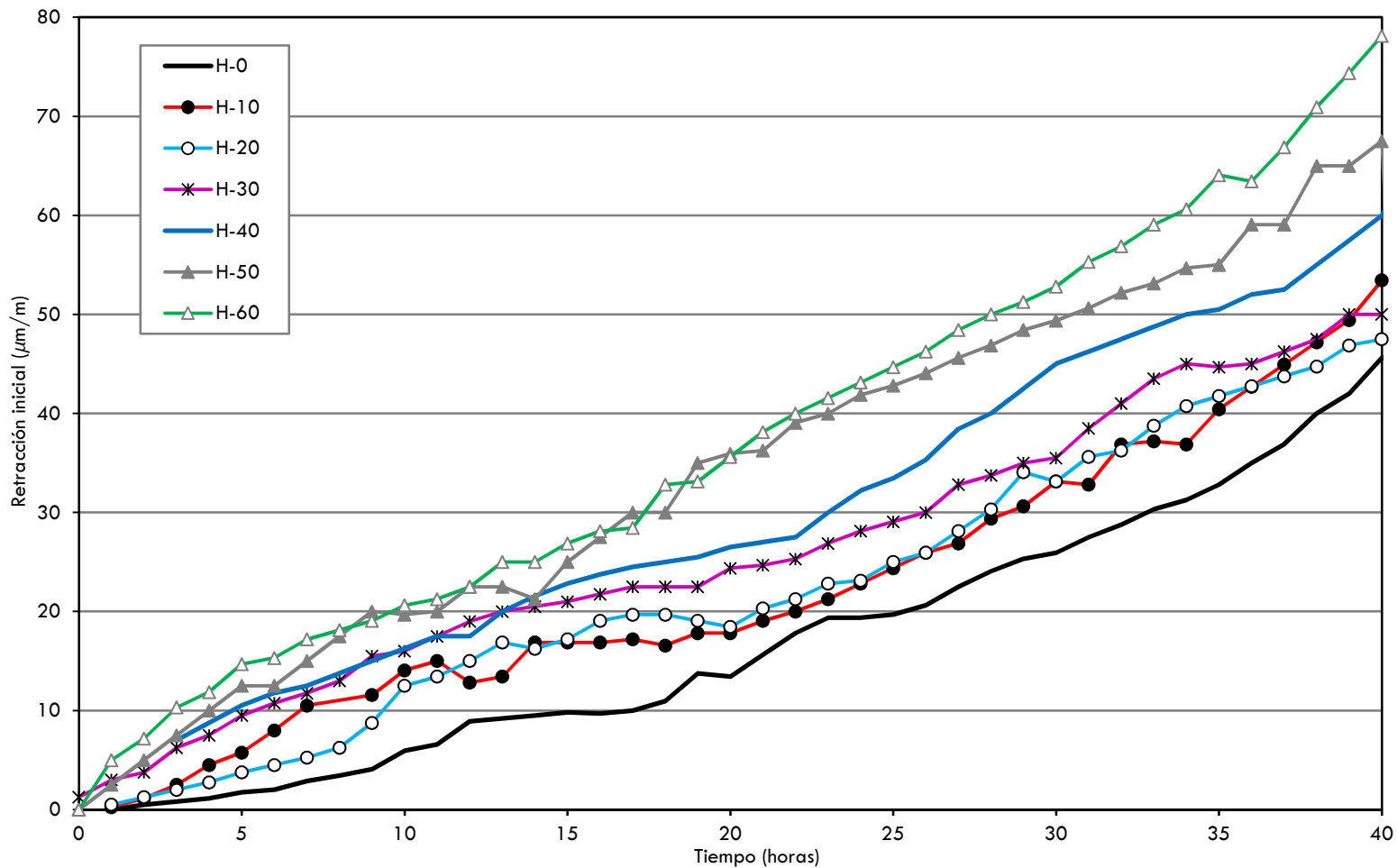


Figura 6.73. Evolución de la retracción a edad temprana

6.8.6. Retracción autógena

Para la fabricación del HAC se suelen emplear contenidos elevados de cemento y de finos, siendo el volumen de pasta mayor que en los HT. La pasta de cemento es el principal componente del hormigón responsable de los cambios volumétricos, cuanto mayor es el contenido de pasta mayor es la retracción (Valcuende et al., 2011). Además, los HAC incorporan mayor cantidad de adiciones, tanto activas como inertes, para mejorar la reología y asegura la autocompatibilidad de estos. Estas adiciones modifican las propiedades del material y, por lo tanto, pueden afectar a la retracción.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la retracción en HAC con distintas cantidades de sustitución de árido fino calizo de cantera por EGAH. Tal y como se ha visto en el apartado 6.2.3, éstas se pueden considerar inicialmente como inertes, pero con el paso del tiempo, generalmente a partir de los 28 días, comienzan a hidratarse y participan en los procesos de hidratación de los HAC generando nuevos silicatos hidratados.

En la figura 6.76 se ha representado la evolución de la retracción autógena a lo largo del tiempo. Coincidiendo con los resultados obtenidos en otros trabajos (Valcuende et al., 2012), esta retracción representa un porcentaje importante de la retracción total y, por lo tanto, no es tan pequeña como algunos autores señalan (Aitcin, 1999). Por ejemplo, a la edad de 1 mes este porcentaje oscila en los siete hormigones analizados entre el 36% y el 44% (figura 6.74). A medida que las probetas van perdiendo agua y se va alcanzando el equilibrio higrométrico con el ambiente, la retracción de secado disminuye y se estabiliza, si bien, la

hidratación del cemento y de la escoria continúa y, en consecuencia, la retracción autógena sigue progresando debido a la autodesecación que se produce al interior de la probeta. Es por ello que con el paso del tiempo la relación retracción autógena/retracción total aumenta hasta situarse al cabo de un año en torno a valores que varían entre el 68% y el 78%, dependiendo del tipo de hormigón, siendo el comportamiento muy similar en todos ellos (tabla 6.59 y figura 6.74). A edades avanzadas, en todos los HAC aumenta mucho el valor de la proporción analizada, síntoma de que la mayor cantidad de agua se ha evaporado y deja de tener tanta importancia la retracción de secado.

Tabla 6.59. Evolución relación retracción autógena/total para los diferentes HAC

	H-0	H-10	H-20	H-30	H-40	H-50	H-60
10 días	38%	38%	59%	37%	34%	25%	30%
30 días	41%	42%	37%	36%	43%	38%	41%
60 días	47%	52%	44%	43%	53%	48%	48%
120 días	57%	63%	55%	55%	62%	61%	58%
220 días	62%	67%	63%	68%	72%	70%	64%
320 días	68%	74%	72%	74%	77%	75%	71%

Esta evolución de la retracción autógena/retracción total es característica del proceso de secado de las probetas que no se sellaron (retracción total) y de la evolución del autoconsumo del agua por la hidratación de los productos en las probetas selladas (retracción autógena). Es decir, la rápida evaporación del agua a edades tempranas en probetas no selladas hace que gran parte de la retracción total sea debida al secado (baja relación retracción autógena/total). A edades avanzadas, las probetas pierden humedad por secado (hasta igualarse la humedad relativa de la probeta y la del ambiente), por lo que la retracción atribuible a la autodesecación (autógena) será gran parte de la total (aumento de la relación autógena/total).

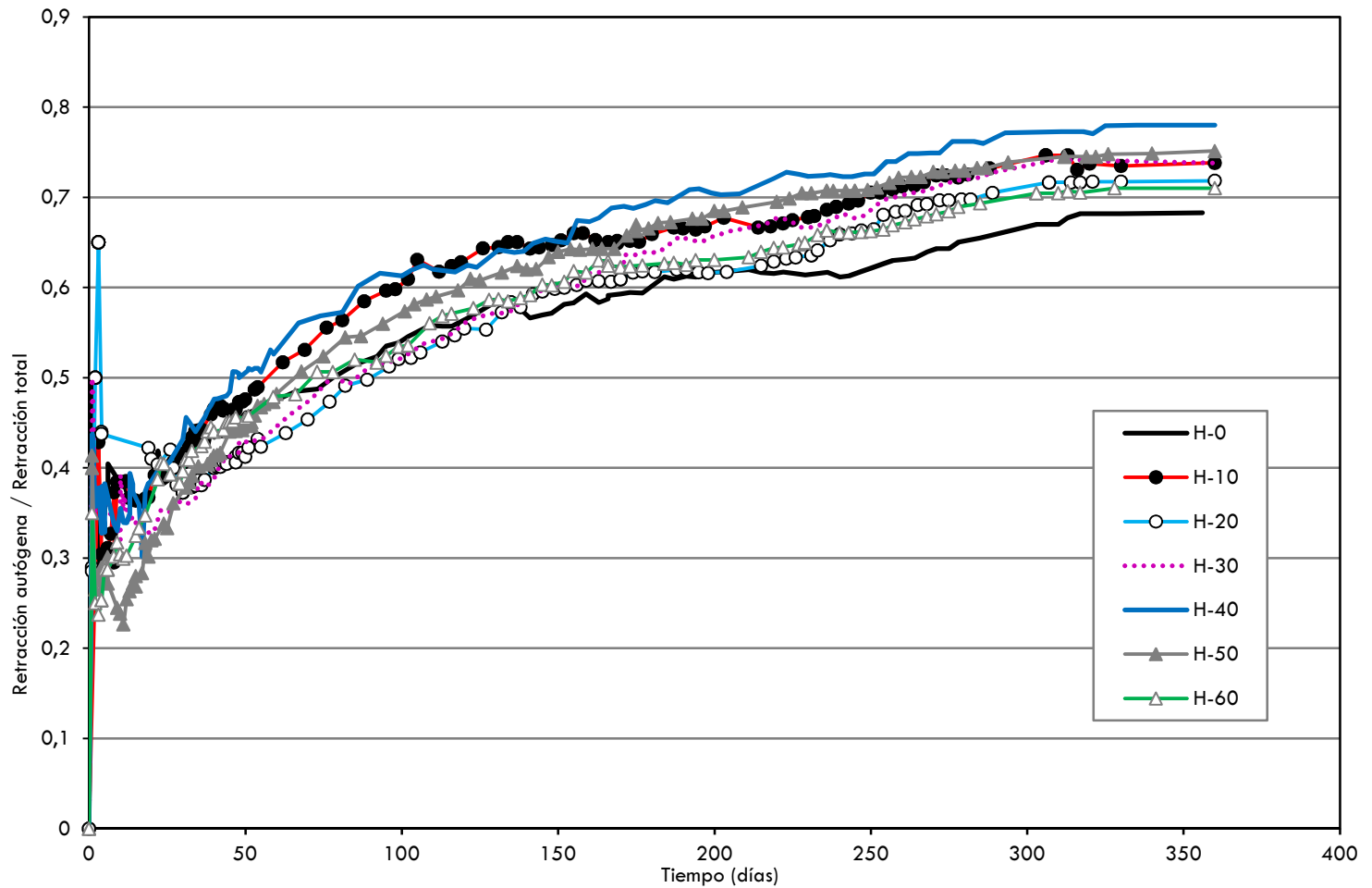


Figura 6.74. Evolución de la relación entre la retracción autógena y la total

La evolución de la retracción autógena y de la retracción total no es totalmente comparable por encontrarse ambas probetas analizadas en condiciones diferentes de humedad interna, lo que afecta de diferente forma sobre todo a la retracción química (parte de la autógena), produciéndose un desfase entre la retracción autógena y de la retracción total. Es decir, la retracción química se produce en mayor magnitud y durante más tiempo en la probeta sellada debido a la nula evaporación producida (secado), mientras que en la probeta sin sellar si se produce evaporación y por tanto disminuye el agua disponible para la hidratación del cemento. Este desfase es mayor cuanto más secado se produce en la probeta sin sellar, tal y como se muestra arriba y abajo en la figura 6.75, y da comienzo a partir de la edad t_A , cuando la humedad en el interior de la probeta sin sellar es insuficiente para garantizar la completa hidratación del cemento.

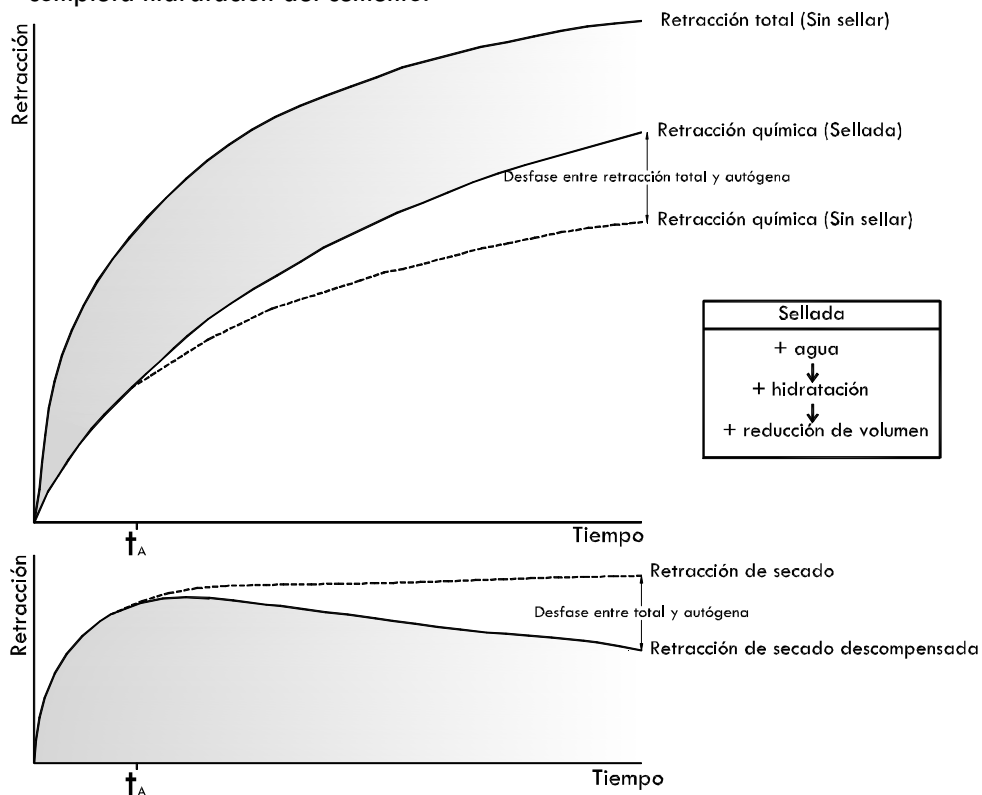


Figura 6.75. Evolución del desfase entre la retracción autógena y la retracción total

Los HAC con escoria presentan una mayor retracción autógena que el hormigón patrón (H-0), siendo además mayor la retracción cuanto mayor es la cantidad de arena sustituida por escoria. Así, por ejemplo, a la edad de 1 año el H-0 presenta un 11%, 14%, 21%, 26%, 28% y 33% menos de retracción que los hormigones H-10, H-20, H-30, H-40, H-50 y H-60, respectivamente. Esto se puede justificar por diversos motivos. Por un lado, tal y como se ha visto en los ensayos de MIP, cuanto mayor es la cantidad de escoria utilizada mayor es el volumen total de poros y, por lo tanto, más deformable es el hormigón. De hecho, en los ensayos de módulo de deformación se observa una pérdida de rigidez en los hormigones con escorias (tabla 6.50, ensayo del módulo de deformación del mortero). Además, la estructura porosa también es más fina en los hormigones fabricados con más escoria, por lo que es de esperar mayor retracción que en el hormigón patrón (H-0), ya que cuanto más finos son los capilares mayor es la tensión de tracción generada por los meniscos de agua en los capilares²⁰ (Valcuende et al., 2012; Tazawa, 1999). Por otro lado, como consecuencia de la hidratación de la escoria, se produce una disminución de agua en los poros que provoca una autodesecación del hormigón. Finalmente, también hay que señalar que la escoria no es un material inerte y por lo tanto no coacciona la retracción de la pasta sino que genera una retracción química, ya que participa de la formación de CSH, con la consiguiente disminución de volumen al ser menor el volumen de los productos hidratados que la suma de los productos iniciales anhidros y el agua.

²⁰ Esto es 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.

En la figura 6.76 se muestra la evolución de la retracción para cada sustitución. En la tabla se muestran las diferencias de retracción autógena obtenidas entre los diferentes hormigones con respecto al hormigón de referencia, H-0. Hay que destacar a 10 días que para todos los hormigones la retracción es mayor con el aumento de la cantidad de EGAH, llegando a ser un 64% mayor en el hormigón H-60, frente al H-0.

Tabla 6.60. Ratios de la evolución de la retracción autógena en relación al hormigón H-0

	H-0	H-10	H-20	H-30	H-40	H-50	H-60
10 días	100%	107%	104%	146%	146%	150%	164%
30 días	100%	107%	98%	116%	141%	150%	155%
60 días	100%	117%	103%	112%	144%	150%	150%
120 días	100%	116%	108%	121%	140%	150%	154%
220 días	100%	118%	115%	131%	142%	148%	154%
320 días	100%	112%	116%	127%	134%	138%	150%

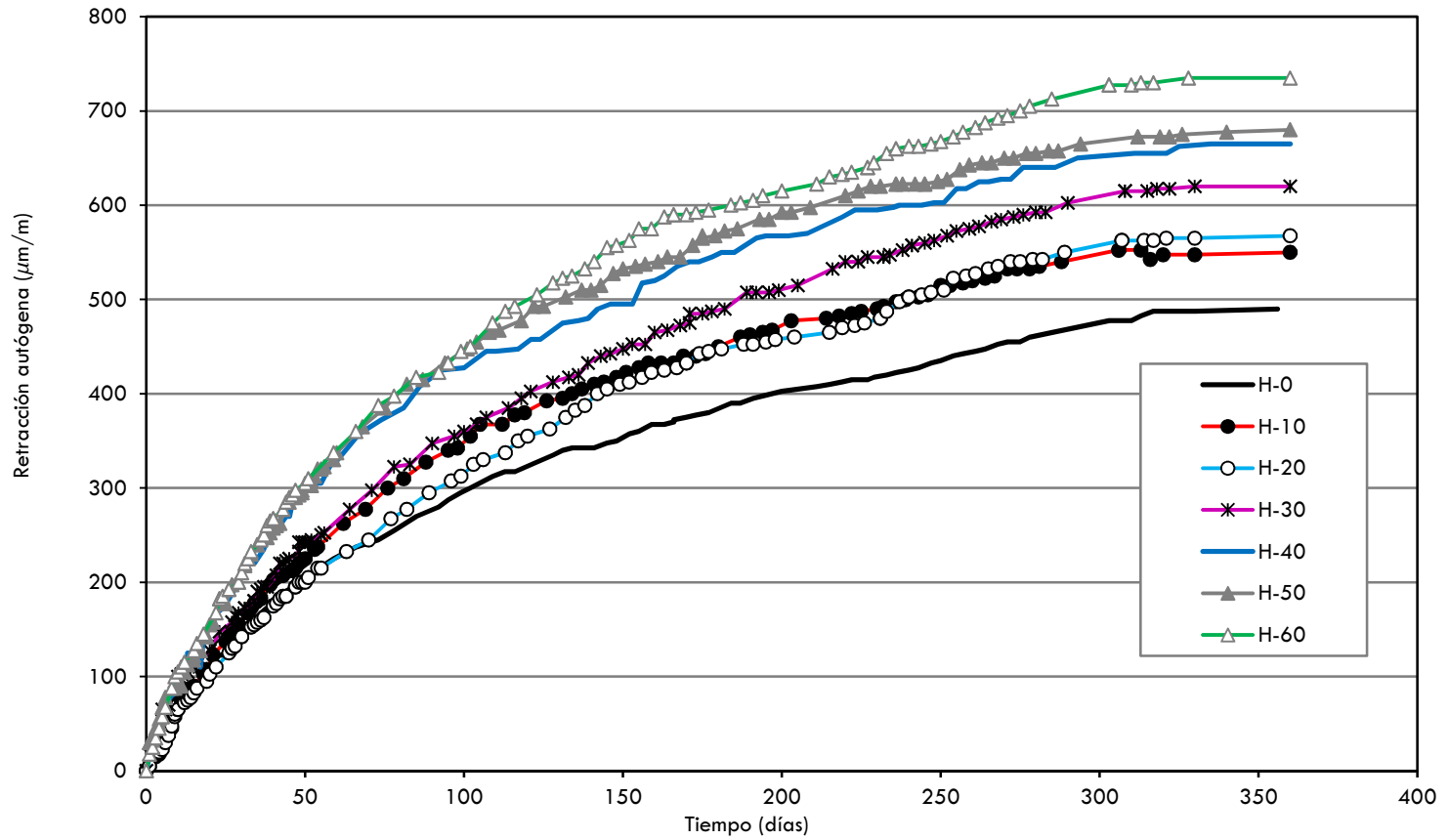


Figura 6.76. Evolución de las retracciones autógenas para cada dosificación

6.8.7. Retracción de secado

La retracción de secado no puede medirse. Como muchos autores han señalado, esta retracción se obtiene al restar la autógena de la total. Sin embargo, este proceso implica un pequeño error comentado anteriormente²¹ y que puede verse en la figura 6.76 en la forma de un descenso en la curva de retracción de secado en edades avanzadas. Esto, por supuesto, no es posible, ya que significaría que el hormigón deja de retraer y comienza a entumecer. La retracción autógena sigue progresando más tiempo (por retracción química) y en mayor cantidad en la probeta sellada debido a su nula evaporación. El error puede ser ampliado o reducido en función de la HR ambiental. Cuando ésta es más alta que la del hormigón, una pequeña cantidad de vapor de agua se difunde al interior de la probeta no sellada, reduciendo su autodesecación (Valcuende et al., 2012). Ambos fenómenos que propician este error pueden ser además más importantes cuanto más poroso es el hormigón, pues la penetración de vapor y la evaporación de agua es mayor. De hecho, la rama descendente de las curvas de retracción tiende a ser más pronunciada en los hormigones fabricados con más escoria, es decir, en los hormigones más porosos.

En la tabla se muestran las diferencias obtenidas en la retracción de secado en los diferentes hormigones con respecto al H-0 (valor 100%). En la figura 6.78 se muestra la gráfica de evolución de la retracción para cada sustitución.

²¹ A edades avanzadas (a partir de 3-6 meses dependiendo del hormigón) la retracción química sigue progresando más tiempo y en mayor cantidad en la probeta sellada debido a la nula evaporación (secado) producida, mientras que en la probeta sin sellar sí se produce evaporación y por tanto disminuye el agua disponible para la autodesecación que se produce en el interior de la probeta. Por lo que la suma de la retracción química y la de autodesecación pueden descompaginar la retracción autógena y la total a una misma edad.

Tabla 6.61. Ratios de evolución de la retracción secado en relación al hormigón H-0

	H-0	H-10	H-20	H-30	H-40	H-50	H-60
10 días	100%	107%	44%	156%	178%	273%	236%
30 días	100%	102%	113%	139%	127%	168%	153%
60 días	100%	98%	119%	132%	117%	145%	147%
120 días	100%	91%	115%	128%	111%	127%	149%
220 días	100%	92%	107%	100%	88%	104%	136%
320 días	100%	86%	98%	95%	86%	101%	134%

En la figura 6.77 se representa la evolución de la retracción de secado con respecto a la pérdida de peso en las probetas (apartado 6.6.3), observándose que en los primeros 40 días la relación aumenta enormemente y se alcanza el máximo valor para todos los HAC. A partir de los 40 días la relación entre la retracción de secado y la pérdida de peso disminuye lentamente debido a un descenso de la retracción de secado con respecto a la pérdida de peso de las probetas. Se puede establecer, por tanto, esta edad como la de inicio del desfase o pequeño error indicado anteriormente entre la retracción autógena y total por el efecto de mayor y más duradera retracción química de las probetas selladas frente a las no selladas.

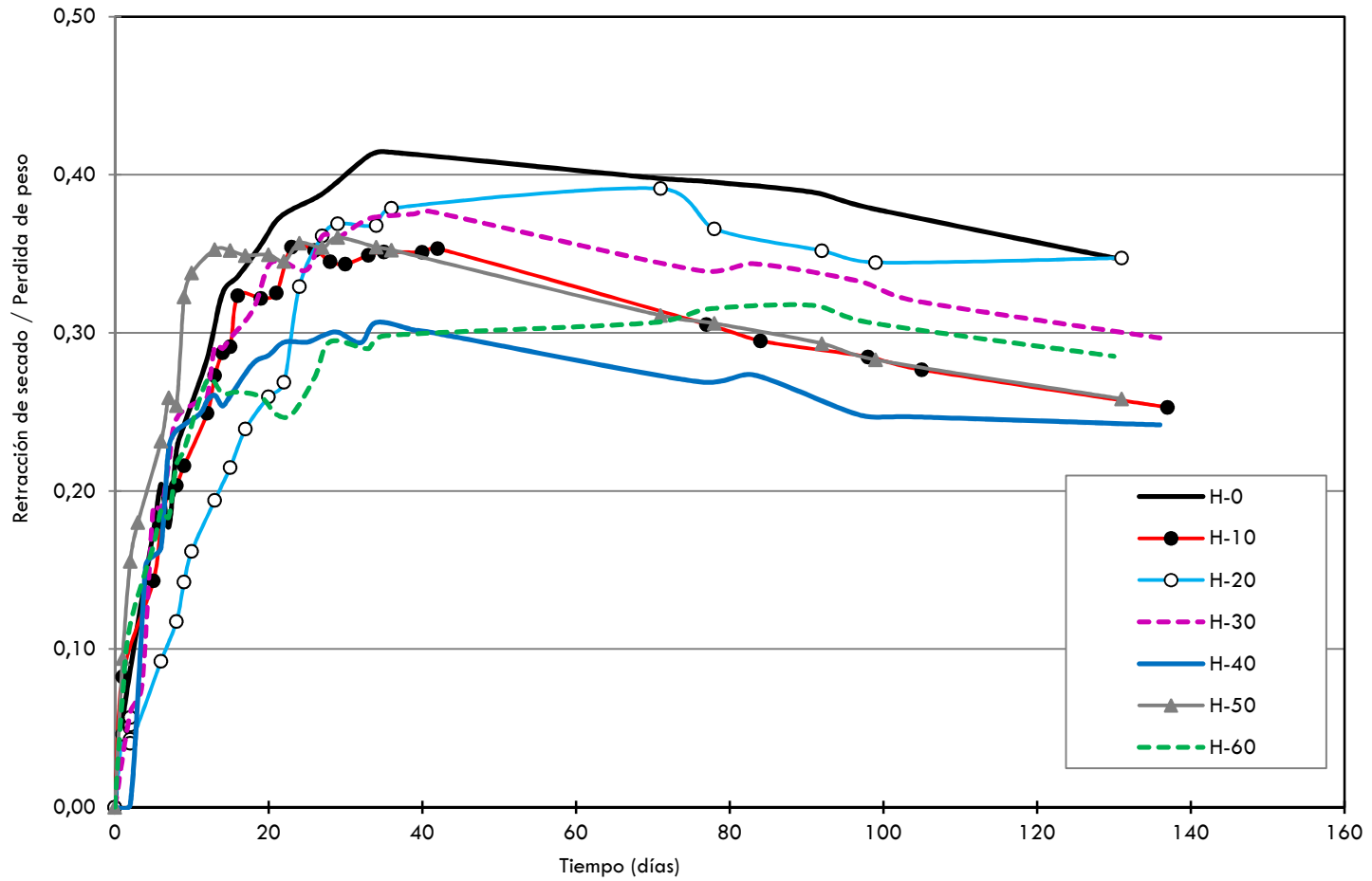


Figura 6.77. Evolución de la relación: Retracción de secado/Pérdida de peso

La retracción de secado es mayor cuanto mayor es el contenido de escoria en la dosificación de los HAC (figura 6.78). Así, por ejemplo, a la edad de 1 año la retracción del H-10, H-20, H-30, H-40, H-50 y H-60 ha sido, respectivamente, un 4%, 11%, 15%, 19%, 24% y 36 % superior a la del hormigón de referencia H-0. Dado que el volumen de pasta cementante (cemento, cenizas volantes, finos y adición) ha sido prácticamente el mismo en todas las dosificaciones, las diferencias entre ellas se deben a que los hormigones fabricados con escoria son más porosos y, por lo tanto, la pérdida de agua se produce más rápidamente, tal y como se observa en la figura 6.78. A medida que se evapora el agua, la presión interna en la red capilar es mayor y aumenta la retracción de secado. Además, al ser la estructura porosa también más fina en los hormigones fabricados con más escoria, la fuerza de atracción de las paredes del capilar es mayor y, por lo tanto, la retracción es mayor. Por otro lado, también se ha visto que cuanto mayor es la cantidad de escoria utilizada menos rígida es la mezcla, oponiéndose menos a las deformaciones impuestas por la retracción.

Como resumen de todo ello indicar que debido a su mayor porosidad, los HAC con escoria son más deformables y pierden más rápidamente el agua. Como consecuencia de ello, la retracción de secado es mayor y tanto mayor cuanto mayor es el porcentaje de árido sustituido.

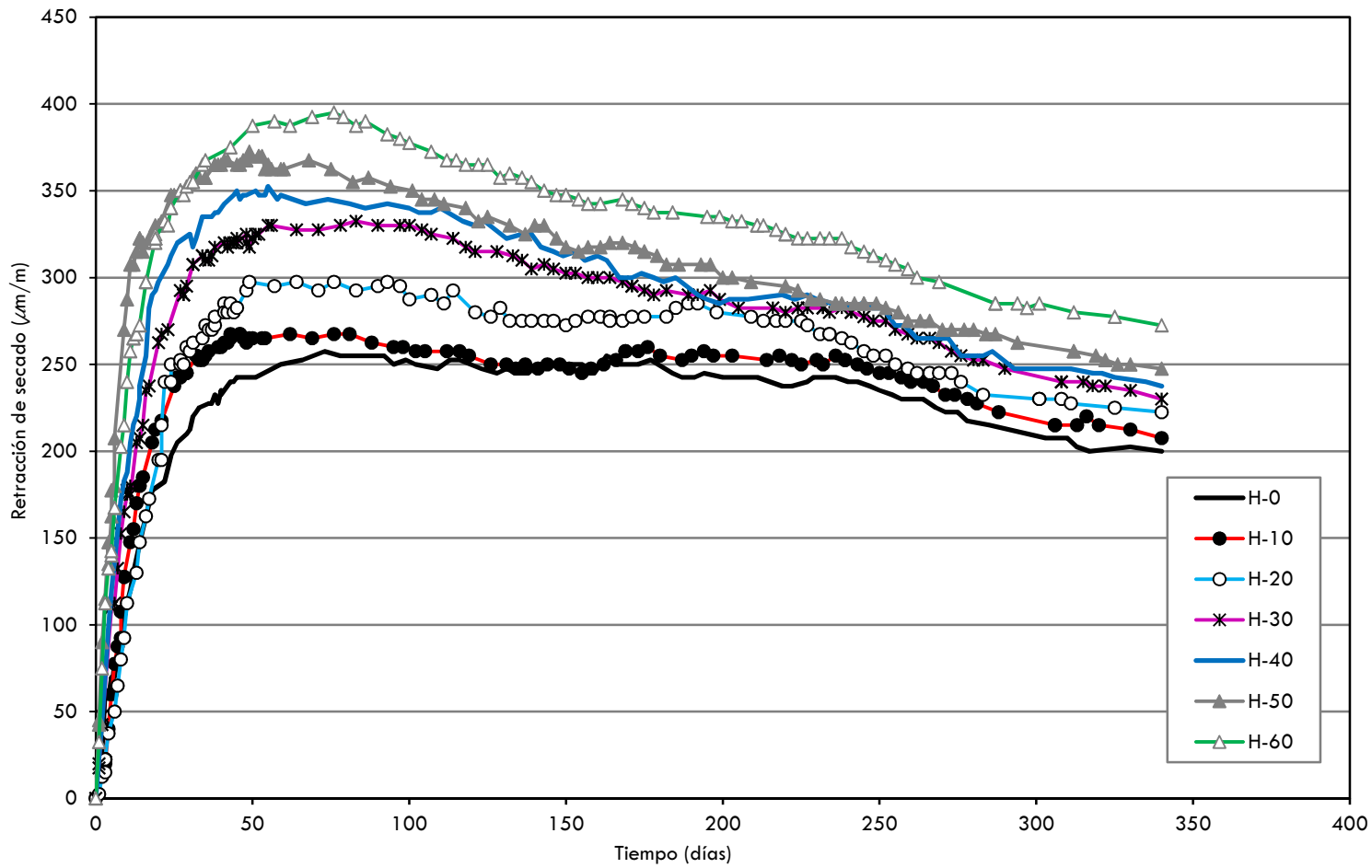


Figura 6.78. Evolución de las retracciones de secado para cada dosificación

En general, las diferencias de finura de la estructura porosa para los HAC pueden explicar las diferencias de retracción entre los diferentes HAC²². Aumentos del agua libre (incluyendo el agua retenida por la EGAH en sus poros) producen una porosidad más abierta y conectada por la mayor migración del agua interna hasta su evaporación. Además, la magnitud de la retracción de secado, al igual que el resto, depende de la cantidad y tipo de árido. Cuanto mayor sea la cantidad de áridos y su calidad, menor será la retracción, llegando a duplicarse la retracción de un hormigón con arenisca frente a un hormigón con granito, basalto o caliza (Carlson, 1938 y Pickett, 1956). La menor rigidez de la parte de mortero con EGAH (25% menor que con árido calizo) hace aumentar la retracción con el aumento de sustitución del árido calizo, y así ha quedado constatado en los resultados de las retracciones, aumentando ésta con el aumento de la EGAH.

²² A medida que se pierde agua en los poros capilares la presión interna es mayor en los HAC con mayor cantidad de EGAH ya que su estructura porosa es más fina y por tanto su retracción puede ser mayor.

6.8.8. Retracción total

En la figura 6.79 se ha representado la evolución de la retracción total a lo largo del tiempo. Dado que la retracción total es suma de la retracción autógena y la retracción de secado, coherentemente con los resultados obtenidos en los apartados anteriores, la retracción total es mayor cuanto mayor es el contenido de escoria. A la edad de 1 año la retracción del H-10, H-20, H-30, H-40, H-50 y H-60 ha sido, respectivamente, un 4%, 10%, 17%, 19%, 26% y 44% superior a la del hormigón de referencia H-0.

En la tabla 6.62 se muestran las diferencias de retracción total obtenidas para los diferentes HAC, con respecto al H-0. Hay que destacar la alta retracción total del H-60 a todas las edades. Esto se debe a la conjunción de varios fenómenos de este hormigón que la potencian, como la mayor porosidad, la mayor finura de ésta y la de mayor pérdida de agua por evaporación. Además, es el hormigón menos rígido por contar con la peor compacidad producida por la angulosidad de la EGAH.

Tabla 6.62. Ratios de evolución de la retracción total en relación al hormigón H-0

	H-0	H-10	H-20	H-30	H-40	H-50	H-60
10 días	100%	107%	67%	152%	166%	226%	208%
30 días	100%	104%	107%	129%	133%	161%	154%
60 días	100%	107%	112%	123%	130%	147%	148%
120 días	100%	105%	111%	124%	127%	140%	152%
220 días	100%	108%	112%	119%	122%	131%	147%
320 días	100%	104%	110%	116%	119%	126%	145%

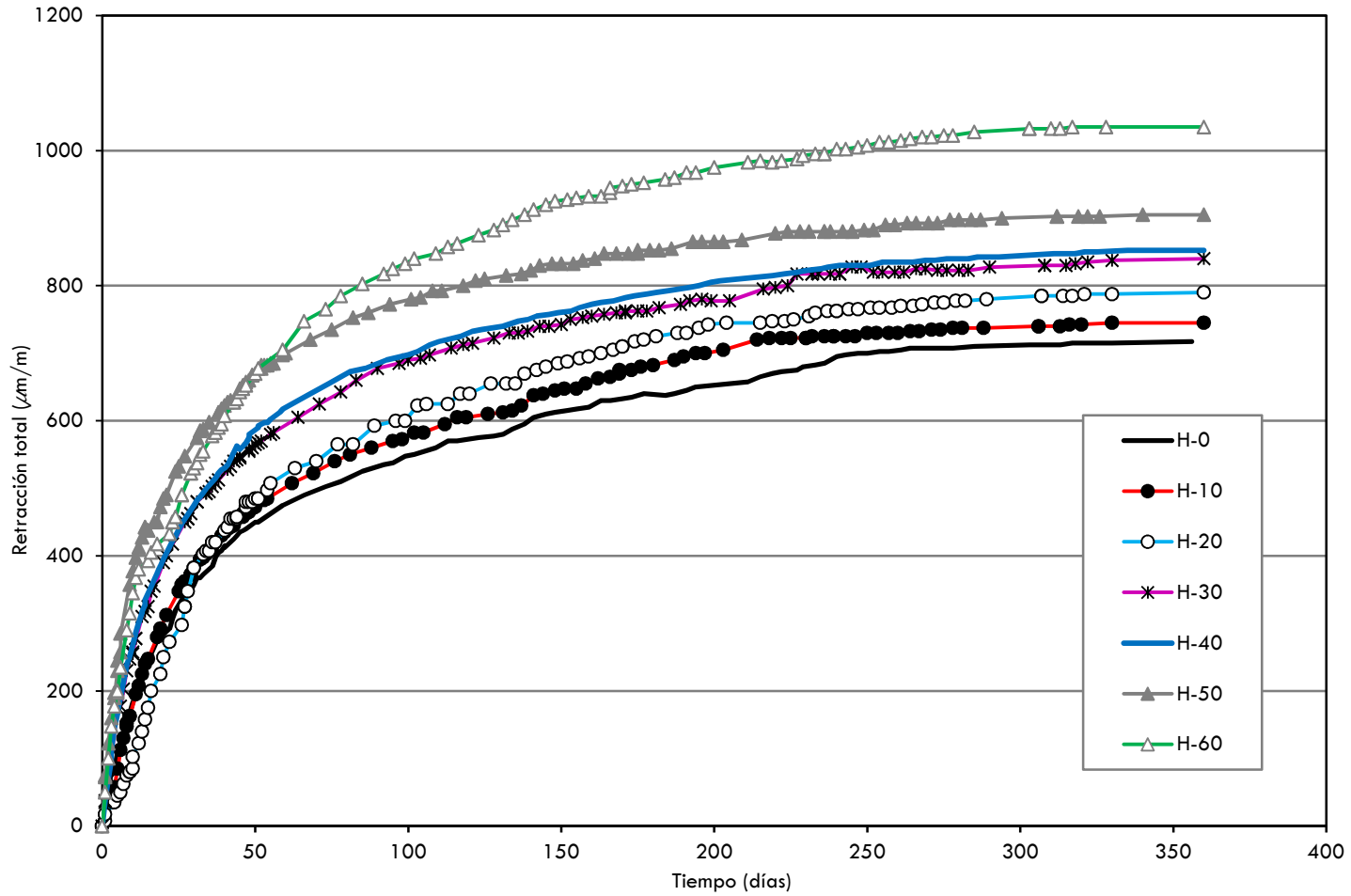


Figura 6.79. Evolución de las retracciones totales para cada dosificación

6.8.9. Retracción de los HAC con EGAH según los modelos de la EHE-08, ACI-92, EC-2 y CM-2010.

a) Retracción autógena

La retracción autógenas de los códigos que la tienen en cuenta (CM-2010, EC-2 y EHE-08) infravaloran enormemente la retracción autógena para los HAC fabricados (figura 6.80). Esto se debe principalmente a que la formulación de los modelos están diseñados para HT, y las grandes diferencias de estos hormigones frente a los HAC son de enorme trascendencia en la retracción autógenas de los hormigones, como la menor cantidad de cemento, la mayor relación a/c y, por lo general, mayor tamaño de poro para los HT. Todas las expresiones utilizadas están indicadas en el apartado 4.4.5. El EC-2 y EHE-08 utilizan las mismas expresiones, por lo que los resultados son idénticos.

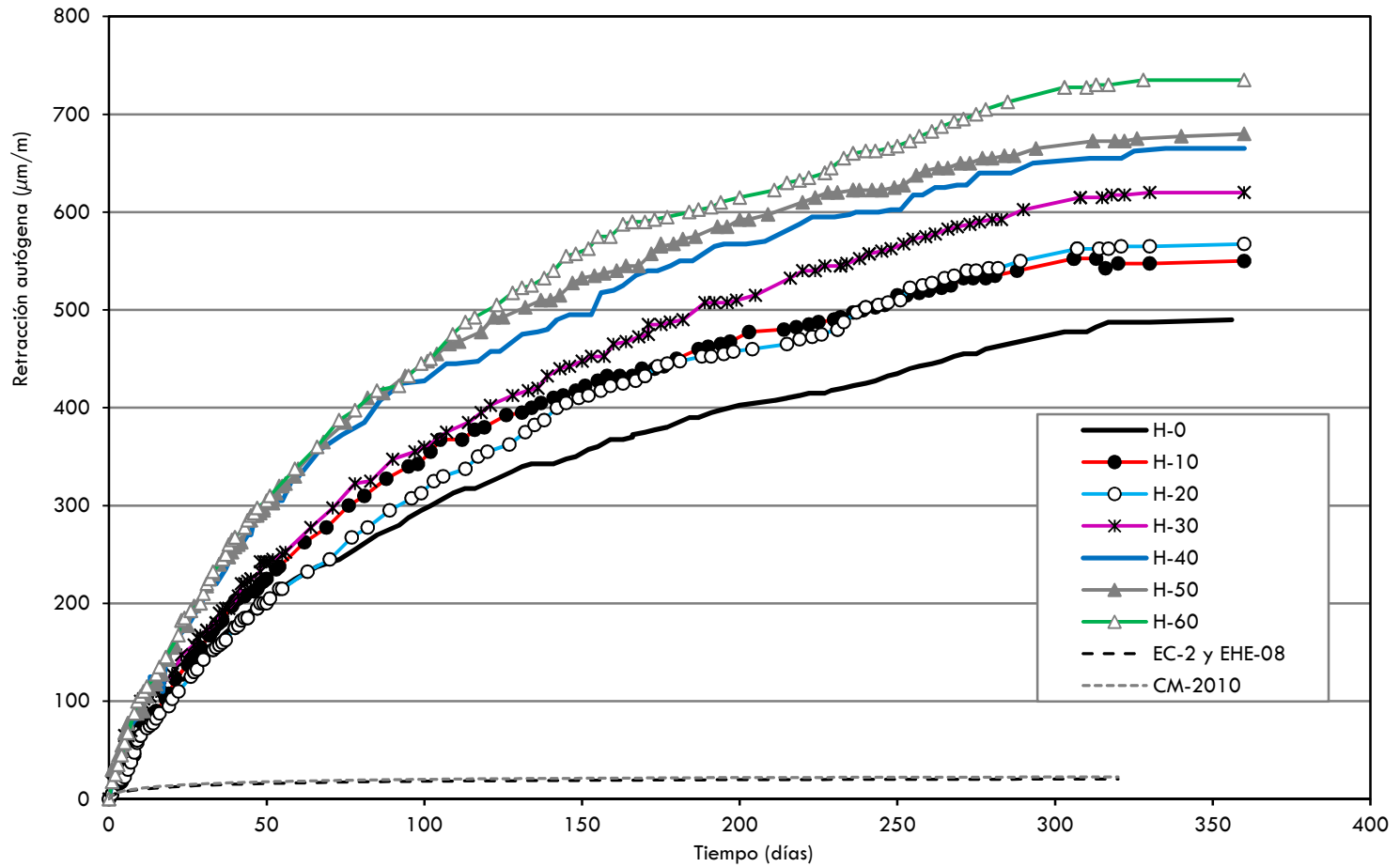


Figura 6.80. Evolución de la retracción autógenas reales y teóricas según diferentes códigos

b) Retracción de secado

Los modelos de retracción de secado analizados son CM-2010, EC-2 y EHE-08. Estos dos últimos utilizan la misma formulación (ver toda la formulación en el apartado 4.4.5). En todos ellos, se obtienen valores inferiores a los experimentales hasta los 150 días (figura 6.81). A partir de esta edad la retracción de secado teórica según los modelo CM-2010, EC-2 y EHE-08 supera a los diferentes hormigones de la fase experimental, alcanzando al H-60 entrono a los 350 días. Esto, por supuesto, no se ajusta con la realidad por el ya comentado descenso de la retracción de los hormigones producido por el desajuste entre la retracción total en la probeta no sellada y la retracción autógena en probeta sella.

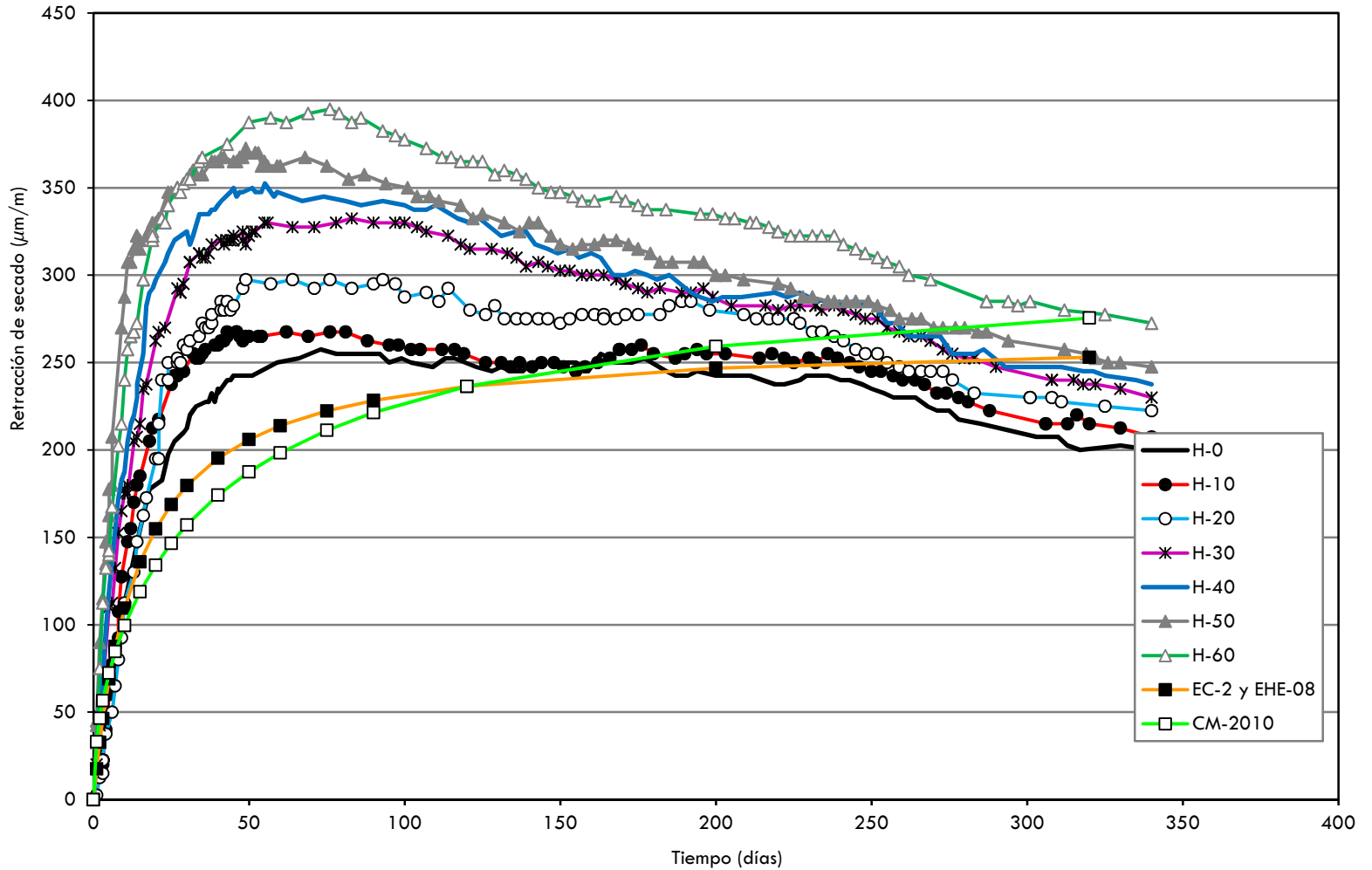


Figura 6.81. Evolución de las retracciones de secado reales y teóricas según diferentes códigos

c) Retracción total

Los modelos de retracción total analizados son ACI-92, CM-2010, EC-2 y EHE-08. El ACI-92 es el único que cuenta con expresiones propias de la retracción total. En los otros modelos la retracción total se obtiene sumando la retracción autógena y la de secado (ver toda la formulación en el apartado 4.4.5).

En la figura 6.82 se muestran la retracción totales experimentales con las obtenidas con los diferentes modelos. Como la retracción total es la suma de la autógena y la de secado, la gran diferencia obtenía en la autógena hace que la retracción total de todos los modelos quede por debajo de las experimentales. El modelo ACI-92 es el que más se acerca a los valores experimentales.

Todas las expresiones utilizadas esta diseñadas para estimar la retracción de hormigones tradicionales vibrados. El CM-2010 indica para los HAC que dado su alto contenido de pasta la retracción será aproximadamente 20% mayor que la del HT de igual fuerza. Además, para hormigones con áridos ligeros (por su alta porosidad) resultan unas retracciones mayores (entre un 20% y un 50%) por la humedad retenida en los áridos. Numerosas investigaciones (Neville, 1970; Neville, 1983; Moon, 2005 y Gómez, 2003) han constatado que áridos de mayor la porosidad, mayor absorción y/o menor densidad, hacen incrementan las deformaciones diferidas del hormigón, entre otros motivos por la disminución del módulo de deformación del árido y por tanto la del hormigón, además de la mayor retención de agua por los áridos que al evaporarse deja una mayor porosidad en el hormigón, contribuyendo al aumento de la retracción de secado. Las deformaciones obtenidas en estos hormigones suelen ser mayores con el aumento de la cantidad de

áridos naturales remplazados. La resistencia y restricciones residen en la parte sólida del material.

Se hace, por tanto, necesaria la utilización de coeficientes correctores de la retracción en las actuales instrucciones para ser utilizados en hormigones no convencionales. Por un lado que tengan en cuenta las características de los áridos diferentes a los convencionales de cantera o reciclados. Por otro lado, se debe incluir otra variable que permita la sustitución parcial o total de la cantidad de árido utilizado. Todo ello sin olvidar las diferencias existentes entre la retracciones de un hormigo HT y un HAC (Valcuende et al., 2012) que deben ser analizadas en profundidad para proponer nuevas expresiones que ajusten mejor con las retracciones de los HAC.

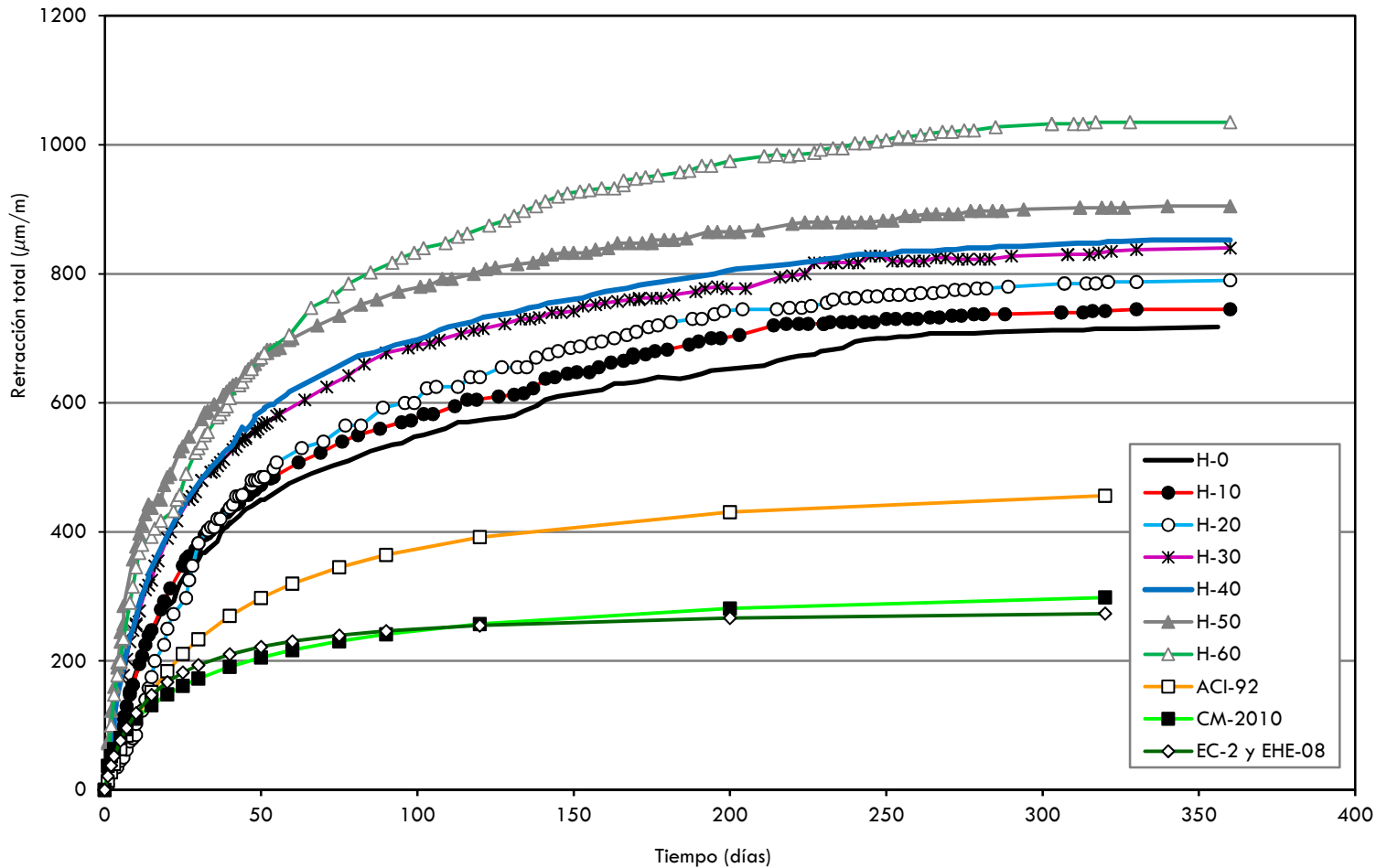


Figura 6.82. Evolución de las retracciones totales reales y teóricas según diferentes códigos (CM-2010, EC-2, EHE-08 y ACI-98)

La diferencia entre la retracción total teórica de los modelos de la EHE-08, EC-2 y CM-2010 y la retracción total experimental (figura 6.82) es debida principalmente por la retracción autógena. Las expresiones de estos modelos están diseñados para HT, muy diferentes a los HAC.

En la figura 6.83 se muestran los resultados de retracción total para el H-0 y H-60 de esta investigación y las teóricas según los modelos del CM-2010, EC-2 y EHE-08 pero considerando en estos la retracción autógena experimental de los HAC (no se utilizar la retracción autógena de estos códigos por infravalorar la retracción autógena de los HAC, ver figura 6.80). En este caso se comprueba un adecuado ajuste de la retracción total obtenida en los HAC fabricados en esta investigación y las curvas nombradas como CM-2010 (H-0), EC-2 y EHE-08 (H-0), CM-2010 (H-60), EC-2 y EHE-08 (H-60). Las dos primeras curvas utilizan la retracción autógena del H-0 y se observa un muy buen ajuste con la retracción total del H-0. Las otras dos utilizan la retracción autógena del H-60. En este caso el ajuste también es bastante bueno a largo plazo (un año) con la retracción total del H-60, pero a edades inferiores a 100 días se infravalora ligeramente las retracciones. En ambos casos, para el H-0 y H-60, con los tres códigos se obtiene resultados muy similares, ligeramente mayores para los del CM-2010 a largo plazo²³.

Con esta última comprobación y los buenos ajustes obtenidos al sustituir la retracción teórica según EHE-08, EC-2 y CM-2010 por la experimental, se ratifica la necesidad de nuevas expresiones para la retracción autógena de los HAC.

²³ Es complicado establecer conclusiones entre los valores experimentales y los teóricos de los diferentes modelos analizados. Estos, a diferencia de lo realizado en la fase experimental, presuponen un curado del hormigón, lo que reduce las retracciones teóricas frente a las experimentales.

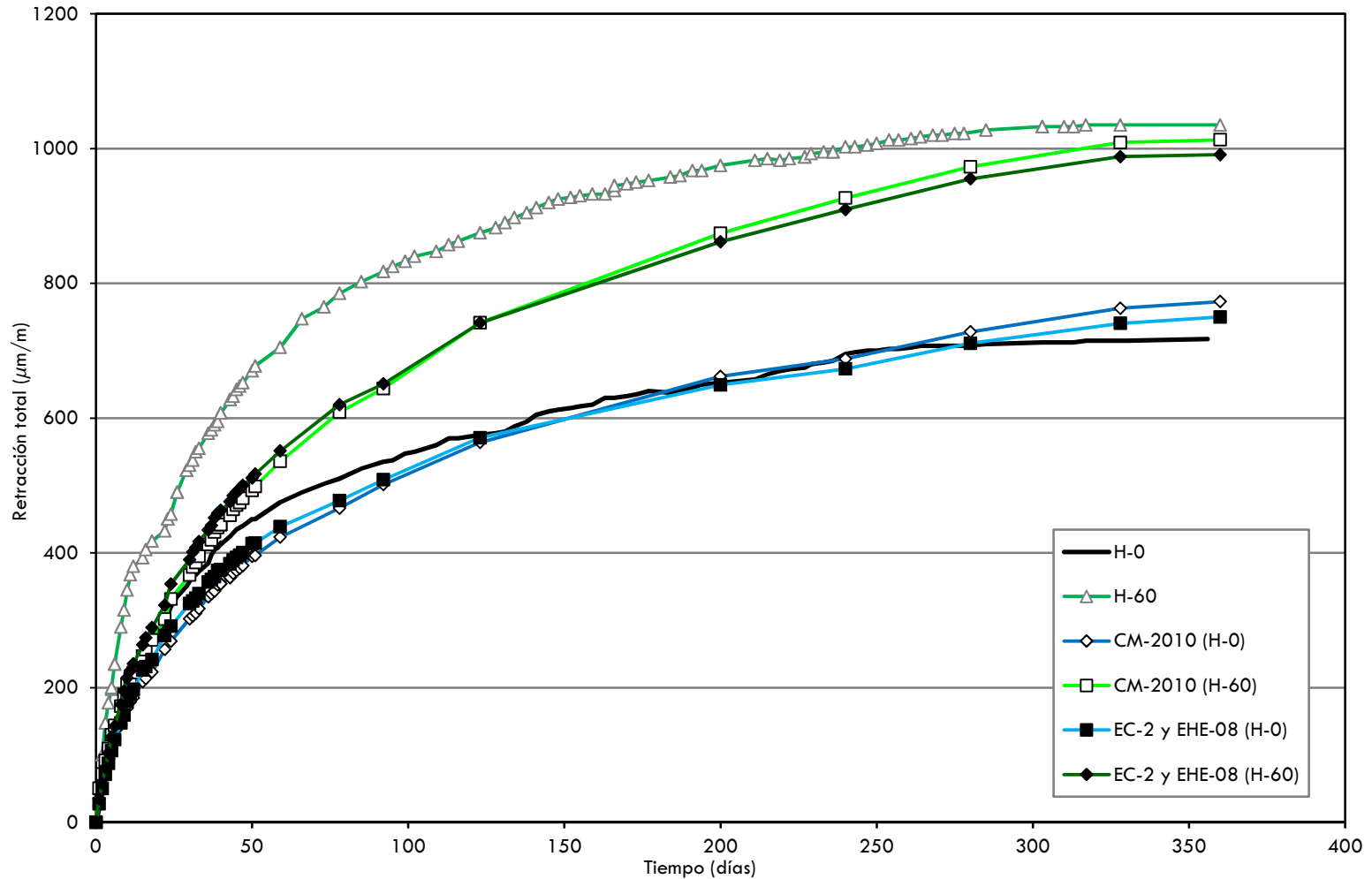


Figura 6.83. Evolución de la retracción total del H-0 y H-60 y las propuestas por CM-2010, EC-2 y EHE-08 con la retracción autógena real

Capítulo 7. Conclusiones generales

7.1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación ha cumplido con el objetivo marcado al inicio, permitiendo conocer, revisar y analizar los hormigones autocompactantes con diferente sustitución de arena por escorias granuladas de alto horno. La investigación llevada a cabo ha proporcionado numerosos resultados que permiten comprender el comportamiento de la EGAH utilizada como árido en los HAC y sobre todo como afectan a la retracción de éstos.

A continuación se recogen las conclusiones obtenidas y se identifican las áreas de interés para futuras líneas de investigación que permitan profundizar en aspectos no analizados en este trabajo.

7.2. CONCLUSIONES

Los objetivos marcados para esta tesis doctoral han sido satisfechos, incluso ampliados durante el transcurso de la investigación realizada. De acuerdo con el trabajo experimental realizado, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

a. La EGAH como material cementante en el hormigón

1. Se ha constatado la participación de la EGAH en la formación de productos hidratados (CSH) de la pasta. A la edad de 365 días, el mortero con sustitución del 50% de cemento por EGAH molida alcanza una resistencia a compresión similar a la del mortero de referencia, con el 100% del cemento. El uso de la EGAH como árido, con una adecuada activación alcalina (álcalis aportado por el cemento portland), permite reducir la cantidad de cemento utilizada, así como obtener hormigones de mejores prestaciones al contribuir la EGAH en las resistencias mecánicas finales.

b. Propiedades en estado fresco de los HAC

2. Todos los hormigones autocompactantes con sustitución de arena por escorias granuladas de alto horno cumplen con los requisitos de fluidez y viscosidad (no hay ningún problema en poder fabricar estos hormigones).
3. Debido a la falta de finos en la escoria ha habido que introducirlos en la pasta (175% de la cantidad de finos menores de 63 μm de los áridos calizos). Esto ha permitido que la pasta se mantenga cohesionada y sin exudación.

c. Porosidad y microestructura

4. El reemplazo de arena por escoria da lugar a mezclas con un mayor volumen total de poros y una estructura porosa

ligeramente más fina, con un menor tamaño medio de poro y un menor diámetro umbral, y tanto más pequeño cuanto mayor es el contenido de escoria.

5. El refinamiento de la estructura porosa de los hormigones con EGAH se debe, en parte, a la hidratación de la EGAH. Esta densificación de la microestructura se realiza, fundamentalmente, con gel CSH.
6. Los nuevos productos hidratados, para su formación, consumen y reducen la cal liberada en la reacción de cemento portland, reduciendo la posibilidad de lixiviación de ésta en presencia de agua y disminuyendo la porosidad de la matriz de la pasta de cemento.
7. Las propiedades mecánicas de la interfaz escoria-pasta han mejorado por la hidratación de la escoria. Se consume hidróxido cálcico (de menor adherencia y resistencia que el CSH) y se forma más CSH (gel de tobermorita y otros productos de hidratación).
8. En los morteros con EGAH analizados a 120 días con microscopía electrónica de barrido se obtiene una mayor concentración de átomos de Al y Mg en la interfaz escoria-pasta que en las mismas muestras a 28 días, lo que demuestra que se ha producido una difusión de los compuestos de la escoria hacia la pasta. Las mayores concentraciones de ambos elementos se alcanza en una franja de unas 5 μm en torno a la EGAH.

9. En los ensayos de QNM (Quantitative Naco-mechanical) realizados con el microscopio de fuerza atómica se obtuvieron módulos de deformación similares en las pastas fabricadas con árido silíceo inerte y en las fabricadas con EGAH. Además, se observa solo en el caso de las pastas con escoria un incremento del módulo de deformación, de hasta 12 GPa, en una franja de la interfaz de unas $5\mu\text{m}$ de anchura, junto a la EGAH.

d. Propiedades en estado endurecido

10. A edades tempranas, 7 días, los HAC con mayor contenido de escorias tienden a dar resistencias más bajas debido a un peor empaquetamiento de los áridos. No obstante, a 365 días, debido a la reactividad de las escorias, cuanto mayor es la cantidad de arena sustituida por escoria mayor tiende a ser la resistencia a compresión del hormigón.
11. Todos los hormigones autocompactantes con sustitución de árido fino por escoria granulada de alto horno presentan un mayor aumento relativo de la resistencia a compresión a los 28 y 90 días, respecto de su resistencia inicial a los 7 días.
12. El módulo de deformación obtenido a 28 días en todos los hormigones autocompactantes con sustitución de árido fino por EGAH fueron inferiores al HAC de referencia, aunque las diferencias no son estadísticamente significativas.

13. Todos los HAC, con y sin EGAH, presentaron a 28 y 90 días resistencias a tracción similares, no detectándose diferencias estadísticamente significativas entre todos ellos.

e. Retracción autógena, de secado y total

14. El uso de la EGAH, como sustitución del árido calizo, no afecta significativamente al tiempo de fraguado ni a la temperatura que alcanza el HAC durante el fraguado, pero sí que afecta a la pérdida de peso del hormigón por evaporación de agua. Para el H-60, y a los 5 días de edad, la pérdida de peso es un 240% mayor que para el H-0.
15. Los HAC con escoria presentan una mayor retracción autógena, debido a la mayor deformabilidad del hormigón, a la mayor autodesecación que se genera como consecuencia de la hidratación de la escoria y a la retracción química producida por la reactividad de la escoria. Este incremento es por término medio de un 11% y de un 33% cuando el reemplazo de arena por escoria es del 10% y del 60%, respectivamente.
16. Los HAC con escoria, debido a su mayor porosidad, son más deformables y pierden más rápidamente el agua. Como consecuencia de ello, la retracción de secado es mayor y tanto mayor cuanto mayor es el porcentaje de árido sustituido.
17. Debido a una mayor retracción autógena y una mayor retracción de secado, los HAC con escoria presentan una mayor retracción total. Este incremento, a un año, es por término medio de un 4%

y de un 44% cuando el reemplazo de arena por escoria es del 10% y del 60%, respectivamente.

Todo ello permite fabricar HAC con una reducción en el consumo energético y de materias primas, así como una disminución en la emisión de gases de efecto invernadero. El beneficio es doble. Por un lado, se da salida a subproductos industriales y, por otro lado, se evita parte de la destrucción de canteras naturales para obtener las materias primas necesarias.

7.3. TRABAJOS FUTUROS.

Se ha estudiado la posibilidad de utilizar la EGAH como árido fino en los HAC y se ha constado su influencia en las propiedades mecánicas del hormigón y sobre todo en su microestructura. Se abre, por tanto, un campo de gran importancia donde profundizar, con un estudio más en profundidad de la microestructura de estos HAC y, sobre todo, de lo acontecido en la interfaz escoria-pasta, tanto a edades muy tempranas como a edades avanzadas donde se produce un refinamiento de la porosidad, con la formación de CSH y el consumo de portlandita. A este respecto, existen numerosos aspectos que pueden ser estudiados en mayor profundidad.

A continuación, se exponen otras propuestas de investigación, todas ellas con EGAH como árido y surgidas tras los resultados obtenidos en la presente investigación:

- Estudiar la durabilidad de hormigones con EGAH, analizando la carbonatación y la penetración del ion cloruro de estos hormigones.
- Estudiar la hidratación de la EGAH con cementos muy alcalinos o con activadores alcalinos.
- Estudiar el efecto de autocurado producido por el agua retenida en la EGAH.
- Estudiar el efecto expansivo del CaO y MgO.

Bibliografía:

1. ACHE. "Hormigón Autocompactante: Diseño y aplicación" Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, Monografía. Ed. ACHE, p.p1-142. 2008.
2. ACI 237R-07: "Self-Consolidating Concrete", April 2007.
3. ACI 308R "Guide to Curing Concrete American Concrete" Institute. Detroit. Jan 1, 2001.
4. Agranati, G. "Estudio sobre la aplicabilidad de los modelos de cálculo de la fluencia y retracción al hormigón autocompactables". Tesis Doctoral. Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, España, 2008.
5. Aguado A., Gettu, R., "Creep and shrinkage of high- performance concretes, Creep and shrinkage of concrete: Proceedings of the 5th International RILEM Symposium, pp. 481-491, 1993.
6. Aguado, A. y Gálvez, J. "Fundamentos de la sostenibilidad en la construcción: aplicación al hormigón". V Congreso ACHE. Barcelona. 2011
7. Aguado, A., Gettu, R. "Creep and shrinkage of high- performance concretes". Creep and shrinkage of concrete: Proceedings of the 5th International RILEM Symposium, 1993, pp. 481- 491.
8. Ainchil, J., Durà, F., Félez, C., Aguado, A., Parellada, R. "Ejecución de pilares de hormigón autocompactante con acabado visto en un edificio de oficinas en L'Hospitalet de Llobregat". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
9. Ainchil, J., García, F., Álvarez, A., "Hormigones autocompactantes coloreados. El caso de la ciudad de la justicia" Monografía sobre hormigones especiales. Publicaciones del Departamento de Ingeniería de la Construcción (pág. 7-20). E.T.S. Ingenieros de

- Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.
10. Aitcin PC. Autogenous shrinkage measurement. In: Tazawa E, editor. *Autogenous shrinkage of concrete*, Taylor & Francis; 1999, p. 257-268.
 11. Aitcin PC. Demystifying autogenous shrinkage. *Concr. Int.* 1999; 21(11):54-56.
 12. Aitcin, P.C., "Binders for durable and sustainable concrete", Taylor and Francis, London, pp.500, 2008.
 13. Almeida Filho, F.M; Barragán, B.E.; Casas J.R., El Debs, A. "Hardened properties of self-compacting concrete—A statistical approach". *Construction and Building Materials*, 2010.
 14. Almeida, W. "Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto." Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil, 2000.
 15. Alonso, M. "Comportamiento y compatibilidad de cementos y aditivos superplastificantes basados en policarboxilatos. Efecto de la naturaleza de los cementos y estructura de los aditivos". Tesis Doctoral Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias. Dpto. de química inorgánica. Madrid, España, 2011.
 16. Alonso, M.C.; Rodríguez, C.; Schanchez, M.; Barragan, B. "Respuesta al fuego de HAC con y sin refuerzo de fibras". 2º Congreso ibérico del hormigón autocompactante, Guimarães, Portugal, 2010
 17. Alonso, M.M., Burgos-Montes, O., Varga, C., Puertas, F., Palacios M. "Influencia de aditivos PCE en el comportamiento reológico, mecánico y durable de morteros de CAC". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
 18. Ambroise, J., Pera, J. "Design of self-levelling concrete". *Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of*

Self-Consolidation Concrete, 2002. pp. 89-94.

19. André, J “Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura”. Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria. Brasil, 2005.
20. Antonina M. Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno. Programa de pós-graduação em engenharia civil. Universidade Federal do Espírito Santo; 2002.
21. Antonina M. Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno. Programa de pós-graduação em engenharia civil. Universidade Federal do Espírito Santo; 2002.
22. Arbeláez, G. “Utilización de Materiales Cementantes. Suplementarios en el desarrollo de soluciones ecológicas para la industria de la construcción.” Muestra de construcción sostenible Biocasa 2010. Hábitat y desarrollo sostenible. Centro Cultural de Cali, Colombia, 2010.
23. Arellano R, Burciaga O, Escalante JI. Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates. *Construction and Building Materials* 2010; 24:1166-1175.
24. Aris, I., Domínguez, J. Granizo, L. “Altas resistencias del hormigón autocompactante”. 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
25. Assie, S., Escadeillas, G., Marchese, G.; Waller, V. “Durability properties of low-resistance self-compacting concrete”. *Magazine of Concrete Research*. Vol. 58, n.º 1, 2006, pp. 1-7.
26. Astori, R.; Sanguinetti, B .y Bizzotto, M “La tecnología del hormigón y el desarrollo sustentable”. Universidad Nacional del Nordeste.

- Comunicaciones Científicas y tecnológicas.2005.
27. Banfill, P. F. G. "Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC". National Institute of Standards and Technology, Nantes, France, 2001
 28. Barlow, P., Darwin, D. "Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón". ACI 224.1R-93. 1993.
 29. Barluenga, C., Valcuende, M., Benlloch, J., Santamaría, A. "Evolución en el tiempo de la resistencia a compresión, la resistencia a tracción y el módulo de deformación de HAC". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
 30. Barluenga, G., Puentes, J., Palomar, I. "Monitorización a edades tempranas, microestructura y comportamiento endurecido de HAC con combinación de filler y adiciones minerales". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
 31. Baroghel-Bouny, V.; Mounanga, P. "Effects of self- desiccation on autogenous deformations, microstructure and long-term hygral behavior", 2005. Disponible en: <http://mech.fsv.cvut.cz/web/att/baroghel.pdf>. Acceso el 20 de julio del 2010.
 32. Barragán, B., Pajares, I., Barbará, J., Ramos, G. "HAC con carbonatos cálcicos micronizados en polvo y en slurry". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
 33. BAŽANT, Z.P. "Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete", John Wiley & Sons, Chichester and New York. 1988.
 34. Bazant, Z.P., Hugaard, A.B., Baweja S., Ulm F.J. "Micropress-solidification theory for concrete creep". Aging and drying effects, Journal of Engineering Mechanics, ASCE 123(11), pp. 1188-1194. 1997.
 35. Bermejo, E. "Dosificación, propiedades y durabilidad en hormigón autocompactante para edificación". Tesis doctoral. ETSI de Caminos,

Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2009.

36. Bermejo, E., Moragues A., Gálvez J.C., Fernández, M. "Permeabilidad de hormigones autocompactantes". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
37. Bermejo, E.B., Moragues, A., Gálvez, J.C., Fernández Cánovas, M. "Permeabilidad y estructura porosa de hormigones autocompactantes de resistencia moderada". *Materiales de Construcción*, Vol. 60, 299, 2010. pp 37-51.
38. Bermejo, E.B., Moragues, A., Gálvez, J.C., Fernández Cánovas, M. "Permeabilidad y porosidad en hormigones autocompactantes". *Anales de Mecánica de la Fractura* 25, Vol. 2 ,2008.
39. Berridi I. Análisis de la influencia de residuos metalúrgicos como áridos en las propiedades del hormigón. Master tesis. Universidad Politécnica de Cataluña; 2008.
40. Berridi I. Análisis de la influencia de residuos metalúrgicos como áridos en las propiedades del hormigón. Master tesis. Universidad Politécnica de Cataluña; 2008.
41. Bibm, Cembureau, Ermco, Efca and EFNARC. "The European Guidelines for Self- Compact Concrete - Specification, Production and Use", 68pp. 2005
42. Bilir, T. "Effects of non-ground slag and bottom ash as fine aggregate on concrete". 2012
43. Billberg, P "Influence of filler characteristics on SCC reology and early hydration". *Proceedings of the Second International Symposium on SCC*, 2001.
44. Billberg, P. "Development of SCC static yield stress at rest and its effect on the lateral form pressure". *Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.
45. Billberg, P. "Fine Mortar Rheology in Mix Design of SCC".

- Proceedings of the First International RILEM Symposium, 1999a, pp. 47-58.
46. Billberg, P. "Self Compacting Concrete for Civi Engineering Structures- the Swedish Experience". Swedish Cement and Research Institute, CBI Report 2: 99, 1999b.
 47. Borralleras P. "Criterios y ensayos prácticos para la selección del aditivo superplastificante para la producción industrial de SCC". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
 48. Borralleras, P. "Hormigón autocompactante para aplicaciones convencionales". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
 49. Borralleras, P. "Nuevas tendencias en aditivos para hormigón autocompactante". Jornada nanotecnología en el hormigón y hormigones autocompactantes, 2009.
 50. Borralleras, P. "Realización de hormigones autocompactantes (Parte 1)". Cemento y hormigón, n.º 899, 2007.
 51. Borsoi, A., Colleparidi, M., Colleparidi, S., Troli, R. Y Zanardi, L. "Low-Heat, High-Strength, Durable Self-Consolidating Concretes". Ninth Canmet/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology. Warsaw, Poland. May 23-25, 2007.
 52. Bosiljkov, V.B. "SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler". Cement and Concrete Research, n.º 33 (2003), pp. 1279-1286.
 53. Bouzoubaa, N., Lachemi, M. "Self-Compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: preliminary results". Cement and Concrete Research. Vol. 31, 2001, pp 413-420.
 54. Bravo M. "Caracterización y utilización del hormigón autocompactable" Minor thesis. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de

Barcelona, 2007

55. Brooks J.J. "A Theory for drying creep of concrete". *Cement and Concrete Research*, vol. 53, pp. 51-61, 2001
56. Brouwers, H.; Radix, H. "Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study". *Cement and Concrete Research*. Vol. 35, 2005, pp. 2116-2136.
57. Bui, V. K., Montgomery, D., Hinczak, I. y Turner, K.: "Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete". *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, n° 9 (2002), pp. 1489-1496.
58. Bui, V.K., Akkaya, Y.; Shah, S.P. "Rheological Model for Self - Consolidating Concrete". *ACI Mater. J.*, Vol. 99, 2002, pp. 549 - 559.
59. Burgos, O., Alonso, M. M., Rivilla, P., Puertas, F. Comportamiento reológico de cementos con adiciones minerales y su compatibilidad con los aditivos superplastificantes". XII Congreso Iberoamericano de Materiales. Alicante, España, 2012.
60. Buron, M., Fernandez, J., Garrido, L. "Hormigón autocompactante. Criterios para su utilización" *Cemento-Hormigón*, n° 887, pp. 52-64. ISSN: 0008-8919, 2006.
61. Calleja J., " Cenizas, cementos y hormigones con cenizas". *Materiales de Construcción* , vol. , num187, pp.3-38,1982.
62. Camacho, E., López, J.A., Serna, P., Ordoñez, L.M. "Reología de mezclas de UHPFRC: Viabilidad en empresa de prefabricados". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
63. Canmet. Present and Future Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, Prepared by Holderbank Consulting Ltd. for Efficiency and Alternative Energy Technology Branch/CANMET, DSS File No. 23440-1-0464. March 1993.
64. Carlson, R.W."Drying Shrinkage of Concrete as Affected by Many

- Factors," Proceedings ASTM, V. 38, Parte 2, pp. 419-437.1938.
65. Carlswald, J., Emborg, M., Utsi, S. and Oberg, P., "Effects of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete," pp. 143-153, in *Self-Compacting Concrete, Proceedings, 3° Intern. RILEM Symp.* Eds. O. Wallevik and I Nielsson, RILEM Publications S.A.R.L. , 2003.
 66. Carvajal, A.M.; Silva, C.; Valiente. J. y Venegas. A. "Efecto de la carbonatación acelerada en distintos tipos de hormigones y cementos". *Revista de la construcción.* Vol.6, nº1, 2007.
 67. Carvalho, H. "Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente". *Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria. Brasil, 2008.*
 68. Cavalcanti, D.J.H. "Contribuições ao estudo de propriedades do concreto auto- adensável visando a sua aplicação em elementos estruturais". *Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas, 2006.*
 69. CEB-FIP (1990), *Código Modelo para Hormigón Estructural, "Recomendaciones y manuales técnicos"; Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos; 1990.*
 70. Ceccato, D.; Masuero, A. ; Moraes, C.; Vilela, A.. "Reciclaje de escoria granulada de fundición (EGF) como sustitución de parte del cemento en hormigón". *Revista Matéria*, v. 14, n. 1, pp. 737 – 748, 2009
 71. Cedex. "Catálogo de residuos utilizables en construcción, <http://www.cedexmateriales.vsf.es>. Visitado el 10-1-2014
 72. CEDEX.<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/255.pdf> . (2011, accessed January 2014)

73. CEDEX.<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/255.pdf>. (2011, accessed January 2014).
74. Cervantes, V. y Roesler, J. "Ground Granulated Blast Furnace Slag. Tech Note" no. 35. University of Illinois, Department of Civil and Environmental Engineering. 1211 NCEL, MC-250. Urbana. Illinois. U.S.A., 2005.
75. 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.
76. Christianto, H. "Effect of Chemical and Mineral Admixtures on the Fresh Properties of Self Compacting Mortars". Master Thesis. Master of Science in Civil Engineering. School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2004.
77. CIB N°24 W 29. "Tolerances on blemishes of concrete". Report prepared by CIB Working Commission W29 "Concrete Surface Finishings", Rotterdam (1971).
78. Cincotto M. A., Batagin A. F., Agopyan V., " Caracterização da escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado", IPT , vol. , num65,1992.
79. Coppola, L, Cerulli, T. y Salvioni, D. "Sustainable Development and Durability of Self-Compacting Concrete". Mapey, Milan, Italy, 2004.
80. Costa, C. "Características e desempenho da escória de alto forno como agregado para utilização em camadas granulares de pavimentos". 37ª reunião anual de pavimentação .11º encontro nacional de conservação rodoviária 37ª rapv/11º enacor goiânia/go – brasil . 08 a 11 de agosto de 2006
81. CTE Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE). 2006
82. Cuenca, E. "On shear behavior of structural elements made of steel

- fiber reinforced concrete” Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València, 2008.
83. Cyr, M., Legrand, C. and Mouret, M.,” Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives,,” *Cem. Concr. Res.* 30, 1477-1483, 2000.
 84. D.T. Institute .”4C-Rheometer Determination of the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete ”Danish Technological Institute (2010). Descargado el 4-3-2014 en: http://www.dti.dk/_root/media/31160_4C-Rheometer%20Manual_2008.pdf
 85. D’Ambrosia MD, Lange DA, Brinks AJ. Restrained shrinkage and creep of self-consolidating concrete. In: Shah SP, editor. 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. 921-928.
 86. Dackzo. “Stability of Self Consolidating Concrete, Assumed or Ensured?” First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, USA, 2002, pp. 245-251.
 87. Dakhil, F. H., Cady, P. D., and Carrier, R. E. “Cracking of Fresh Concrete as Related to Reinforcement.” *ACI Materials Journal.* (1975), pp. 421-428.
 88. 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
 89. Dazco, J., Attiogbe, E., See, H. “Engineering Properties of Self-Consolidating Concrete”, 2002.
 90. De Holanda, D. “Contribucaao ao Estudo de Propriedades do Concreto Auto-Adensavel Visando sua Aplicacao em Elementos

- Estruturais”. Master Thesis. Programa Pos-Graduacao em Engenharia Civil – PPGEC. Departamento de Engenharia Estrutural – EES. Centro de Tecnologia – CTEC. Universidade Federal de Halagaos–UFAL. Maceió, 2006.
91. De Larrard, F.; Sedran, T. “Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the Use of a Packing Model” *Cem. Concr. Res.*, vol. 24, nº 6, pp. 997-1009.1994.
 92. De Schutter, G. “Durability of Self-Compacting Concrete –From theory to practice”. 2º Congreso Iberico hormigon autocompactante, 2010.
 93. De Schutter, G.; Boel, V.; “Determination of the porosity and the critical pore size of hardened self-compacting cement paste”. *Proceeding of Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Proceedings pro 054, 2008, pp 571-576.
 94. Demirboga, R., Gül, R. “Production of high strength concrete by use of industrial by-products”. *Building and Environment*, 41, 2006, pp 1124-1127.
 95. Deshpande, Y. S. "Development of Rapid-Setting Self-Compacting Concrete to Production Variabilities ", Purdue University. 2006
 96. Dinakar, P., Babu, K.G. and Santhanam, M. “Mechanical properties of high volume fly ash self-compacting concretes”. *Proceeding of Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Proceedings pro 54, 2007, pp. 651-658.
 97. Dominguez, J. “Utilización de los aditivos en el hormigón autocompactable”. *Hormigón y Acero*, No. 228-229. 2.do y 3.er, trimestre 2003. pp. 139-142.
 98. Domone, P. L. “A review of the hardened mechanical properties of self- compacting concrete”. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 29, 2007, pp. 1-12.
 99. Domone, P.; Chai, H. “Design and testing of self-compacting

- concrete". Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete, pp. 223-236, P.J.M. Bartos, D.L. Marris and D.J. Cleland, ed. E&FN. Spon, London, 1996.
100. Druta, C. "Tensile Strength and Bonding Characteristics of Self-Compacting Concrete". Master Thesis. Master of Science in Engineering Science. Department of Engineering Science. Louisiana State University. USA, 2003.
101. Edgar, P. "Influência da finura e teor de escória na penetração de cloretos no concreto". Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria - RS, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria - RS. Brasil. 2001.
102. EFNARC. "Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante. Especificaciones, Producción y Uso", 2006.
103. EFNARC. "Specification and Guidelines for Self compacting Concrete". EFNARC, Famham, Reino Unido, 2002, 32p. Disponible en www.efnarc.org. Acceso 14 de marzo de 2010.
104. EFNARC. "The European guidelines for self-compacting concrete", 2005. Disponible en www.efnarc.org y www.efca.info Acceso 13 de marzo 2010.
105. Ehrenberg A.; Geiseler J.. Carbon dioxide emissions with cement production. In: Iron and steel slags – Properties and utilization. Duisburg: Artigo apresentado no International Symposium on the Utilization of Metallurgical Slag – ISUS'99, 1999, Beijing, China. 2000
106. Elias Castells, X. "Reciclaje de residuos industriales". Ediciones Diaz de Santos. Madrid. 2000.
107. Escalante I y Espinoza L. "Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo totao

parcial del cemento Pórtland ordinario",Nexo , vol. 21, num01, pp.11-18,2008

- 108.Escalante J.I. "Materiales alternativos al cemento Pórtland" Revista Avance y Perspectiva, Marzo 2002, pp. 79-88.
- 109.Escalante J.I.; Gomez L.Y.; Johal K.K.; Mendoza G.; Mancha H.; Mendez J ."Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions". Cement and Concrete Research, Volume 31, Number 10, October 2001 , pp. 1403-1409.
- 110.Escalante J.I.; Mendez, J.; Gorokhovsky, A., Fraire-Luna, P. E.; Mancha, H. y Mendoza, G. "Reactividad y propiedades mecánicas de escoria de alto horno activada por álcalis" Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 41 Núm. 5 Septiembre-Octubre 2002, pp. 451-458.
- 111.Estefanía Cuenca Asensio
- 112.Etxeberria M, Pacheco C, Meneses JM, Berridi I. Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates. Constr Build Mater 2010; 24 (9):1594-1600.
- 113.Etxeberria M, Pacheco C, Meneses JM, Berridi I. Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates. Constr Build Mater 2010; 24 (9):1594-1600.
- 114.Eurocode 2: Design of concrete structures -Part 1: General rules and rules for buildings, July 2002.
- 115.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
- 116.Feldman F, Beaudoin JJ. Pretreatment of hardened hydrated cement pastes for mercury intrusion measurements. Cem Concr Res 1991; 21(2-3):297-308.

117. 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.
118. Fernández Cánovas, M. "Hormigón". Colegio de Ingenieros de caminos Canales y Puertos. Octava Edición. Octubre 2007.
119. Fernández, M. "Hormigón." Manuel Fernández Cánovas ISBN: 84-7493-125-8. Madrid (1989). 509 p.
120. Filho, F. M. A. "Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis". 2006. 310 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
121. Fowler W, Allen J, Lange A, Range P. The prediction of coarse aggregate performance by micro-deval and other aggregate tests. Research Report ICAR 507-1F, Application and significance of the micro-deval test. International Center for Aggregates Research (ICAR). University of Texas, Austin;2006.
122. Frías, M.; Sánchez de Rojas, M. I.: "Chemical assessment of the electric arc furnace as construction material: Expansive compounds", *Cem. Concr. Res.*, vol. 34 (2004), pp. 1881-1888. doi:10.1016/j.cemconres. 01.029.2004.
123. Frías, M.; Sánchez de Rojas, M. I.; Uría, A.: "Study of the instability of black slags from electric arc furnace steel industry", *Mater.Construcc*, vol. 52 (2002), pp. 79-83.
124. Frías, M.; San-José, J.T; Vegas, I. "Árido siderúrgico en hormigones: proceso de envejecimiento y su efecto en compuestos potencialmente expansivos." *Materiales de Construcción*, Vol. 60, 297, 33-46, enero-marzo 2010.
125. Fu, X.; Hou W. ; Yanga C.; Lib D. ; Wub X. Studies on Portland cement with large amount of slag. *Cement and Concrete Research* 30 (2000).

126. Fuentes, M.T. "Evaluación de la durabilidad del cemento clase h y compositos cementantes base escoria del alto horno". Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Mexico, D.F, 2009.
127. Furnas; "Concretos (massa, structural, projectado e compactado com rolo)" – Ensaio e propiedades. Ed Pini, Sao Paulo, 1997.
128. García, J.L., Robles, M.; Alonso, M.C., Fernández, L., Sabas, J.L. "Evaluación de la durabilidad de hormigones autocompactantes curados aceleradamente, optimizados en base a parámetros sostenibles". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
129. García. J.M., Borralleras, P. "Hormigón autocompacto y Glenium: un compromiso perfecto" Cemento-Hormigón, nº 826, Agosto 2001, pp. 691-716.
130. Georgiadis, A.G., Anagnostopoulos, N.S., Sideris, K.K. "Mechanical characteristics of self-compacting concretes produced with different filler material". Proceeding of Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM Proceedings pro054, 2007, pp. 611-618.
131. Gettu, R., Aguado, A., Martín, M., Roncero, J. "El uso de aditivos reductores de retracción en el hormigón y sus implicaciones", Cemento y Hormigón, n.º 813, 2000 pp 755-769.
132. Gettu, R., Nawaz, S., Ernest, K.J.D. "Evaluation of the Robustness of Self Compacting Concrete". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
133. Gettu, R., Jayasree, C., John, E., Bhaskar, S., Eshete, B., Vinayak, S. "Effective use of superplasticizers for sustainable concrete". Sinco 2012, 5º simposio internacional sobre hormigones especiales. Fortaleza, Brasil, 2012.
134. Giaccio, G., Tobes, J. M., Zerbino, R. "Influencia de la fracción fina

- de la arena en el diseño de hormigones autocompactantes". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
135. Girbés, I., Martí, P., Manzanedo, B., Granizo, M. L., Pérez, V. "Propiedades reológicas y mecánicas de hormigones autocompactantes que incorporan lodos de corte de mármol". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
136. Gjorv, O.E. "Alkali activation of a norwegian granulated blast furnace slag". 3rd Intern. Conf Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, SPI 14-73, 1501-1517, 1989
137. Gomes, P. "Optimización y caracterización del hormigón autocompactante de alta resistencia". Escuela Técnica Superior de Caminos Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2002.
138. Gomes, P. C. C., Cavalcanti, D. J. H., Barros, A. R., Barboza, A. S. R., Lima, F. B. "Propriedades mecânicas de concreto auto-adensável". XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural. 10 f. XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, Campinas, São Paulo, 2006.
139. Gomes, P.C.C. Optimization and characterization of high strength self-compacting concrete, Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya, 140 p, 2002
140. Gomes, P.C.C., Lisboa E. M., Cavalcanti, J. H., Barros, A.R, Barros, P. G. S.; Lima, F. B.; Barboza, A. S. R. "Concreto Auto-Adensável: Obtenção, Propriedades e Aplicações". IV Simpósio Internacional sobre Concretos Especiais – SINCO, Fortaleza, 2008.
141. Gómez-Soberon J.M.; "Relationship Between Gas Adsorption and the Shrinkage and Creep of Recycled Aggregate Concrete", Cement, Concrete, and Aggregates, Vol. 25, 2. 2003.
142. Gonnon, P., Skovby, M., Bouille A. "Evaluación de las prestaciones del

Microfiller en Hormigones”. 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.

143. Gonzalez Ortega M. A. , “Caracterizacion experimental de escorias negras de alto horno”, Tesis de Master de Ingenieria Estructural de la Construccion, Escola Tecnica superior d'enginyers de camins, canals i ports de Barcelona, Universitat Politecnica de Cataluna, 2011
144. Gonzalez, M. “El Comportamiento del Filler Calizo en los Concretos Autocompactos”. ASOCEM, 2002.
145. Hale, W., Bush, T. Y., Russell, B. “Interaction of blast furnace slag and Class C fly ash with type I cement”. Paper No. 01-045, TRB , 2000.
146. Hameed, M.A. “A study of mix design and durability of self-compacting concrete”. Master Thesis. Master of Science in Civil Engineering. King Fahd University of Petroleum & Minerals, 2005.
147. Hammer, T. A. (2003). “Cracking susceptibility due to volume changes of SCC”. Proceedings of the Third International Symposium on Self Compacting Concrete, RILEM Proceedings PRO 33. Reykjavik, Iceland. pp. 553-557.
148. Hans, E.G., Pentti, P., “Properties of SCC-Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance”. Proceedings of the first RILEM International Symposium , Stockholm, Sweden. 1999.
149. 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.
150. 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.
151. Helene, P. R. L.; Alencar, R.; Folch, A. T. Aplicação de concreto auto-adensável na fabricação de pré-moldados. Revista Técnica, n. 137,

- p. 60-64, ago. 2008.
152. Helmuth, Richard A., Detwiler, Rachel J. "The Nature of Concrete". Lamond, Joseph F., Pielert, James H. "Significance of tests and properties of Concrete and Concrete – Making Materials". ASTM International, New York, 2006.
 153. Hernández, O. y Mendoza, C.J. "Durabilidad e infraestructura: restos e impactos socioeconomicos". Ingeniería investigación y tecnología VII. 1. 57-70, 2006.
 154. Hewlett, P. C. Arnold. "Lea's Chemistry of Cement and Concrete", London, Great Britain, 4th Ed, Elsevier, 2003.
 155. Holschemacher, K. "Hardened Material Properties of Self-Compacting Concrete". Journal of Civil Engineering and Management, vol. 10, n.º. 4, 2004, pp. 261-266.
 156. Holschemacher, K.; Klug, Y. "A Database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC". Lacer, n.º. 7, 2002.
 157. Horst, G., Dusseldorf, J. "Self-Compacting Concrete: Another Stage in the Development of the 5 Component System of Concrete". 1999.
 158. Iborra P." Hormigón de bajo impacto ambiental elaborado con materiales activados alcalinamente para su uso en firmes compactados con rodillo". Proyecto Fin de Grado. Universidad Politécnica de Valencia Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Edificación. 2011.
 159. IECA "Guía para la utilización del hormigón autocompactante". 2005.
 160. indirecta y compresión con la temperatura". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
 161. Influence of tobermorite formation on mechanical properties of hydrothermally solidified blast furnace slag. Emile H. Ishida Zhenzi Jing, F. Jin T. Hashida, N. Yamasaki Journal of Material Science 43 (2008) 2353–2351

162. Isaia, G. y Gastaldini, A. "Concrete sustainability with very high amount of fly ash and slag", *Ibracon Structures and materials journal*, Vol. 2/3 (September 2009), pp. 244-253
163. Izquierdo, J. Hormigón Autocompactable. *Hormigón Preparado*, n.º 49, 2001, pp. 33-37.
164. Japan Concrete Institute. *Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete*. Taylor & Francis; 1999.
165. John, V. M. "Reciclagem de Resíduos na Construção Civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento". Tese (Livre Docência). Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.
166. Karina, N.; Yamin, L. y Arcila, C. "Resistencia a los cloruros en el concreto adicionado con escoria de alto horno". *Revista de ingeniería faculta de los andes*, vol.23, 2006.
167. Khaloo, A.; Houseinian, M. "Evaluation of properties of silica fume for use in concrete". *International Conference on Concretes*, Dundee, Scotland, 1999.
168. Khatib, J. "Performance of self-compacting concrete containing fly ash". *Construction and Building Materials*, 22(9), 2008.
169. Khatib, J. "Performance of self-compacting concrete containing fly ash". *Construction and Building Materials*, 22(9), 2008.
170. Khayat, K., Assaad, J., Daczko, J. "Comparison of Field- Oriented Test Methods to Assess Dynamic Stability of Self-Consolidating Concrete". *ACI Materials Journal*, 101(2), 2004, 168-176,
171. Khayat, K.H. Omran A., Magdi, W.A. "Evaluation of thixotropy of self-consolidating concrete and influence on concrete performance". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
172. Khayat, K.H., Daczko, J.A. "The holistic approach to self-consolidating

- concrete". First North American Conference on the Design and Use of Self-consolidating Concrete, 2002.
173. Khayat, K.H., Saric-Coric, M., Liotta, F. "Influence of Thixotropy on Stability Characteristics of Cement" Grout & Concrete, ACI material Journal, Vol. 99 , 3, 2002, pp. 234-241.
174. Khayat: "Workability, Testing and performance of Self Compacting Concrete". ACI Materials Journal, 1999, pp. 346-353.
175. Klug, Y. and Holschemacher, H. "Comparison of the hardened properties of self- compacting and normal vibrated concrete". Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM Proceedings pro 033, 2003.
176. Koehler, E. y Fowler, D. "Aggregates in Self-Consolidating Concrete. Aggregates Foundation for Technology", Research and Education (AFTRE), International Center for Aggregates Research (ICAR). University of Texas at Austin, 2007.
177. Köning G, Holschemacher K, Dehn F, Weibe 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.
178. Kosmatka, S., Kerkhoff, B. y Panarese, W. "Design and Control of Concrete Mixtures". 14 th Edition, Portland Cement Association, 2002.
179. Kosmatka, S.; Kerkhoff, B.; Panarese, W.; Tanesi, J. "Diseño y Control de Mezclas de Concreto". Portland Cement Association, Skokie, IL, EEUU, 2004.
180. Krishnasami R, Malathy R. Significance of blast furnace slag as coarse aggregate in self compacting concrete. Applied Mechanics and Materials 2013; 357-360: 829-833.
181. Kumar R, Bhattarcharjee B. Porosity, pore size distribution and in situ

- strength of concrete. *Cem Concr Res* 2003; 33(1):155-164.
182. Latorre V. "Influencia del contenido de adiciones puzolánicas y del proceso de elaboración de la mezcla en la resistencia mecánica del hormigón". Memoria para optar al título de Ingeniera Civil universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil .Santiago de Chile .Octubre 2009
183. Lauber M. Influencia de la calidad de los residuos metalúrgicos granulares utilizados como áridos en las propiedades del hormigón. Master tesis. Universidad Politécnica de Cataluña; 2009.
184. Lauber M. Influencia de la calidad de los residuos metalúrgicos granulares utilizados como áridos en las propiedades del hormigón. Master tesis. Universidad Politécnica de Cataluña; 2009.
185. Leemann, A., Hoffmann, C. "Properties of self-compacting and conventional concrete – differences and similarities". *Magazine of Concrete Research*. Vol. 57, n.º 6. pp. 315-319, 2005
186. Li, Z.J.; Ding, Z. "Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag". *Cement and Concrete Research* 33 ,2003, pp 579-584.
187. Liébana, O., G. Pulido, M.D., Gómez Hermoso, J. "Evolución y sostenibilidad de forjados planos in situ" Jornadas internacionales de investigación en construcción. Hitos estructurales de la arquitectura y la ingeniería, Madrid, 2011.
188. López, A; Tobes, J.M; Zerbino, R.; Giaccio, G.; Positieri, M.J y Oshiro, A. "Incorporación de color al hormigón autocompactante". Comunicaciones del 1.er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, pp. 195-20, 2008.
189. Loureda, J., Armesto, V., Vilar, J., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., Paredes, M., Vieito, I., González-Taboada, I. "Diseño de un nuevo reómetro para mezclas de hormigón". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.

190. Love, A., Richardson, G., Brough, A. "Composition and structure of C-S-H in white Portland cement-20% metakaolin pastes hydrated at 25 °C". *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, 2007, pp. 109-117.
191. Lowke, D., Wiegrink, K. y Schiessl, P.: "A simple and significant segregation test for HAC", *Proceedings of 3 international RILEM symposium on self-compacting concrete*, Reykjavik, 2003, pp. 358-366.
192. Lowke, D., Wiegrink, K.; Schiessl, P. "A simple and significant segregation test for SCC", *Proceedings of 3rd international RILEM*. 2003.
193. M. Guilleron, M., Regue, C., Guilleron, M., Sanchez, P., Sonzogni, V. "Análisis numérico de las tensiones producidas por el secado del hormigón" *Mecánica Computacional* Vol. XXIII G. Buscaglia, E. Dari, O. Zamonsky (Eds.) Bariloche, Argentina, November, 2004
194. Machado, A.T. Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria. 135f. *Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.*
195. Magalhães, M.C. "Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno". *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, Brasil 2002.*
196. Malhotra VM "Introduction: sustainable development and concrete technology". *ACI Concr Int* 24, 22. 2002ç
197. Mantegna, D., Fornasier, G., Hernández, C., Bálzamo, H. "Optimación de hormigones autocompactantes con bajo contenido de polvo". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
198. Marques J.C. y Siqueira C.E. "Escória de Alto Forno: Estudo. Visando seu Emprego no. Preparo de Argamassas e Concretos". São

Paulo.1994

- 199.Marti, J., Serna, P.; Arbelaez,C.; Rigueira,V. “Comportamiento Adherente del Hormigón Autocompactante en Transmisión y Anclaje”. *Materiales de Construcción*, vol. 56, 284, 2006, pp. 27-42.
- 200.Martínez, D. “Hormigones de altas prestaciones”. Proyecto final de carrera Universidad Politécnica de Cartagena. 2007
- 201.Mata, L. “Implementation of Self-Consolidating Concrete (SCC) for Prestressed Concrete Girders”. Master Thesis. Master of Science in Civil Engineering. Department of Civil, Construction and Environmental Engineering. North Carolina State University. Raleigh, North Carolina, USA, 2004.
- 202.Matschei T, Lothenbach B, Glasser FP. The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cem Concr Res* 2007; 37(4): 551-558.
- 203.Mauricio, C. “Influencia de la puzolana en la fisuración por retracción en los hormigones chilenos”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas departamento de Ingeniería Civil. Santiago de Chile Agosto 2007.
- 204.McDonald, D. “Impact of production and proportioning on microstructure and properties of self-consolidating concrete”. *Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of Self- Consolidation Concrete*, 2002, pp. 15-19.
- 205.Mehta P. Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete International* 2002;24(7):23-27.
- 206.Mehta P. Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete International* 2002;24(7):23-27.
- 207.Mehta P. K. and Monteiro, P.J.M. *Concrete- Estructura. Propiedades y materiales*. EE UU Ed. Mc Graw Will, 2008.
- 208.Mehta, P. K. “Concrete technology at the crossroads – problems and opportunities”. *Concrete technology: past, present and future*.

- Proceedings. ACI SP-144, 1994, pp. 1-30.
209. Mehta, P. K. "Durability of Concrete - Fifty Years of Progress?". Seminario qualidade e durabilidade das estruturas de concreto, Porto Alegre, NORIE/CPGEC/UFRGS, 1993, 33 p.
210. Mehta, P. K. Pozzolanic and Cementitious by-product. Proceedings 3rd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, 1989.
211. Mehta, P.K. "Greening of the concrete Industry for Sustainable Development" Concrete International July 2002, pg 23
212. Mendoza-Rangel, J. y Castro-Borges, P. "Validez de los conceptos y modelos vigentes de vida de servicio de estructuras de hormigón ante los efectos del cambio climático global. Situación actual". Materiales de Construcción Vol. 59, 296, 117-124. 2009
213. Midorikawa, T., Pelova, G.I. Y Walraven, J.C.. "Application of the Water layer to self-compacting concrete with different size distribution of fine aggregate". Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete", Tokyo, Japan, 23-25, pp. 237-246. 2001.
214. Miguel, R. "Avaliação de ensaios de durabilidade do betão." Dissertação apresentada à Escola de Engenharia do minho para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Materiais e Reabilitação da Construção. Guimarães, 2000.
215. Mindess, S.; Young, J.; Darwin, D. "Concrete". Prentice Hall, 2003.
216. Ministerio de Fomento. Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08).
217. Miñano, I., "Durabilidad del HAC frente a la carbonatación y al ataque del ión cloruro". Proyecto final de carrera. Universidad Politécnica de Cartagena, España, 2010.
218. Miñano, I., Benito, F.J. "EcoHAC con EGAH. Estudio de las propiedades en estado fresco y endurecido". Proyecto final de

Máster, de Ingeniería de Edificación. Universidad Politécnica de Valencia, España, 2012e.

219. Miñano, I., Parra, C., Valcuende, M., Benito, F.J. "Caracterización y sostenibilidad de la Escoria de Alto Horno como árido en hormigones". XII Congreso Iberoamericano de Materiales. Alicante, España, 2012d.
220. Miñano, I., Parra, C., Valcuende, M., Benito, F.J. "Influencia de los finos en la difusión del ión cloruro en los hormigones autocompactantes". Sinco 2012, 5º simposio internacional sobre hormigones especiales. Fortaleza, Brasil, 2012b.
221. Miñano, I., Parra, C., Valcuende, M., Benito, F.J., Martínez, E.J. "EcoHAC fabricado con Escorias Granuladas de Alto Horno". Sinco 2012, 5º simposio internacional sobre hormigones especiales. Fortaleza, Brasil, 2012c.
222. Miñano, I., Parra, C., Valcuende, M., Benito, F.J. "Eco-hormigón fabricado con escorias granuladas de alto horno como reemplazo parcial de árido fino". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
223. Montgomery D.G. y Wang G. "Instant-chilled steel slag aggregate in concrete - fracture related properties" Department of Civil and Mining Engineering. University of Wollongong. Australia, 1991.
224. Moon, H.; Kim H.; Choi D. "Relationship between average pore diameter and chloride diffusivity in various concretes" Construction and Building Materials 20 (2006) 725–732.
225. MOPT "Instrucción Española de Hormigón Estructural". Ministerio de Obras Publica. Madrid. España, 2008.
226. Moranville, M. "Chemistry of Cement and Concrete". 4TH Edition. pp. 637-673. Editorial Elsevier. Londres, Inglaterra. 1998.
227. Moreira S., Bolina, C. "Microestructura da Pasta de Cimento". Sinco 2012, 5º simposio internacional sobre hormigones especiales.

- Fortaleza, Brasil, 2012.
228. Mori, H., Tanigawa, Y., Wakabayashi, S., and Yoshikane, T. "Effect of Characteristics of Aggregate on Properties of High-Fluidity Concrete." *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 18, 53-60.1996
229. Murgier, S., Zanni, H., Gouvenot, D., Blast furnace slag cement: a Si and Al NMR study, *Comptes Rendus Chimie*, v. 7, n. 3-4, pp. 389-394, March/April 2004.
230. Mustafa Sahmaran, Heru Ari Christiano, Ismail Özgür Yaman. "The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self- compacting mortars". *Cement and Concrete Composites*, 28, 2006, pp 432-440.
231. Myers, J.; Yang, Y. "High Performance Concrete for Bridges A6130_Route 412". Pemiscot County. MO. University of Missouri-Rolla, 2003
232. Naik, T.R., Singh, S.S. y Ramme, B. "Effect of Source and Amount of Fly Ash on Mechanical and Durability Properties of Concrete". *ACI Special Publication*, 170, 1997, 157 - 188.
233. Navarro J. "Enseñanzas de la puesta en obra del hormigón autocompactante" *Jornada nanotecnología en el hormigón y hormigones autocompactantes*, 2009.
234. Navarro, F. y Esteban M. "Empleo del hormigón autocompactable en la prefabricación". *Hormigón y Acero*, N.º. 228-229. 2.º y 3.er trimestre 2003. pp. 161-166.
235. Nehdi, N.; Pardhan, M.; Koshowski, S. "Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements". *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, pp 2013-2112.
236. Nepomuceno, M.C.S., Pereira-de-Oliveira, L.A., Franco R.M.C. "Otimização de betões auto-compactáveis para diferentes restrições ao escoamento". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón

Autocompactante. Madrid, España, 2012.

237. Neville A. M.; "Creep of concrete as function of its cement paste content". Magazine of Concrete Research, Vol 16, 46, pp 21-30, 1964.
238. Neville A.M, Dilger W.H.; "Creep of Concrete: Plain, Reinforced, and Prestressed". North-Holland Pub. Co., American Elsevier, Amsterdam, New York. 1970.
239. Neville A.M., Dilger W.H., Brooks J.J.; "Creep of Plain and Structural concrete". Constrction Press, Longman Group Limited, New York,) 361 pp.361. 1983.
240. Neville A.M.; "Theories of Creep in Concrete". ACI Journal, Vol 52, pp. 47-60.1955.
241. Neville, A. "Maintenance and durability of concrete structures". Concrete International, 2001.
242. Neville, A. "Propriedades do concreto". São Paulo: PINI, 1997, 828 p.
243. Neville, A.M. "Properties of Concrete". 4th ed., Longman Group, Londres, Inglaterra, 1995.
244. Nielsson, I. and Wallevik, O.H. "Rheological evaluation of some empirical test methods—Preliminary results". 3rd Int. RILEM Symp. Reykjavik, Iceland, Ed. O. Wallevik and I. Nielsson, (RILEM Pub. PRO 33), 2003, pp. 59-68.
245. Northwestern University, USA. 2009
246. Numata S, Koid Y, Shimobayashi S. Properties of ultra-highly pulverized granulated blast furnace slag-Portland cements blends. In: Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings. Second International Conference. Madrid; 1986.
247. Numata S, Koid Y, Shimobayashi S. Properties of ultra-highly pulverized granulated blast furnace slag-Portland cements blends. In:

- Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings. Second International Conference. Madrid; 1986.
248. Okamura, H. "Self compacting high performance concrete". *Concrete International*, 1997. pp. 50-54
249. Okamura, H. and Ouchi, M. "Self-Compacting Concrete Development, Present and Future". Proceedings of the First International RILEM Symposium, 1999, pp. 3-14.
250. Okamura, H., Ouchi, M. "Self compacting concrete, *Journal of Advanced Technology*", Vol. 1, n° 1, 2003 , pp 5-15..
251. Olivares, B., Romero, H.L., Gálvez, J.C., Casati, M.J. "Evaluación de un hormigón autocompactante sometido a ciclos de hielo-deshielo mediante ensayos no destructivos". 3° Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
252. Oliveira J. "Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco" Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Engenharia Civil Da Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre. 1997.
253. Ollivier JP, Maso JC, Bourdette B. Interfacial transition zone. *Adv Cem Based Mater*. 1995; 2(1): 30–38.
254. Öner, W.; Erdog̃dub, K.; Günlü, A. "Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement". *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 463–469
255. Ordóñez, L. M., Martínez, D., Suesta, C., López, Á. "Cemento supersulfatado como alternativa al cemento Portland convencional para el desarrollo de hormigones autocompactantes sostenibles". 1° Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
256. Orna M, González J, Sánchez JC, Fernández L, Ade R, Quero F. Recycling power plant slag for use as aggregate in precast concrete

- components. *Mater Constr* 2010; 60(300):99-113.
257. Orna, M., Salesa, A., Pérez J.A., Río M., López P.L. "Estudio de los módulos de elasticidad en hormigones autocompactantes fabricados con árido reciclado procedente de la no calidad en prefabricación". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
258. Orna, M.; Gonzales, J. y Sánchez, C. "Las escorias de central térmica como áridos". II Congreso Nacional de Áridos, Valencia, 2009.
259. Ortega, J.M., López, M.P., Sánchez, I., Climent, M.A. "Evolución de la microestructura, resistencia al ingreso de cloruros y propiedades mecánicas de morteros con elevado contenido de cenizas volates endurecidos en un ambiente. Representativo del clima existente en el sureste de la península Ibérica". XII Congreso Iberoamericano de Materiales. Alicante, España, 2012.
260. Pacios, A. "El hormigón autocompactante: Tecnología sostenible en la industria de la construcción del siglo XXI". Jornada Técnica sobre Hormigón Autocompactante: Un Hormigón para el Siglo XXI, Documentación Técnica, IECA Levante, Valencia, pp. 27-34. 2003.
261. Pacios, A., Olmos, I., Flores, D., González, D., Martín, O. "Relación entre el control de recepción y el acabado en elementos de hormigón arquitectónico". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
262. Pacios, A. "Clasificación superficial hormigones vistos. Control de recepción en HAC". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
263. Pagliero, J., Durán, M. G., Stumpf, P., Oscar, D. "Hormigón Autocompactante Arquitectónico". Sinco 2012, 5º simposio internacional sobre hormigones especiales. Fortaleza, Brasil, 2012.
264. Pal, S.C.; Mukjerhee, A. y Pathak S.R. "Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete". *Cement and Concrete Research* 33, (2005) pp. 1481-1486

265. Palacios, M., Sierra, C. y Puertas, F.: "Métodos y técnicas de caracterización de aditivos para el hormigón", Mater. Construcc., vol. 53, n° 269 (2003), pp. 89-105.
266. Parapinski, A.C, "Caracterización de las propiedades del hormigón autocompactante asociadas al esqueleto granular" Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña, 2010.
267. Parra C. "Estudio experimental de los hormigones autocompactables en estado endurecido". Tesis doctoral. Departamento de Construcciones Arquitectónicas, UPV. Valencia, julio de 2005
268. Parra, C., Miñano, I., Valcuende, M., Benito, F.J. "Determinación de la penetración del ión cloruro en hormigones autocompactantes. Influencia del contenido de finos". XII Congreso Iberoamericano de Materiales. Alicante, España, 2012.
269. Parra, C.; Valcuende, M.; Miñano, I. Manual de cálculo de hormigón armado. Teoría y ejemplos prácticos. Editorial Diego Marin, Merced, 25/30001 Murcia. ISBN: 978-84-15. 2013.
270. Payá, J., Monzón, J., Borrachero, M. V., Velázquez, S. Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue. Thermogravimetric analysis studies on FC3R-lime pastes. Cement and Concrete Research 33 (2003) 1085-1091.
271. Pera, J. "Influence of limestone on cement hydration", Cement and Concrete Research, vol. 21(2), 1999, pp. 99-105.
272. Persson, B. "A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete". Cement and Concrete Research, vol. 31, 2001, pp. 193-198.
273. Persson, B., Bentz, D., Nilsson, L.O. "Self-desiccation and its importance in concrete technology". Gaithersburg s.n., Proceedings of the Fourth International Research Seminar. Report TVBM-3126. 2005.
274. Peterson, M. "High-performance and self-compacting concrete in house building Field tests and theoretical studies of possibilities and

- difficulties" Doctoral thesis, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, Lund, Sweden, 2008.
275. Pickett G.; "Effect of aggregate on Shrinkage of Concrete and Hypothesis Concerning Shrinkage". *ACI Journal*, Vol 27 (5) pp 581-590. 1956.
276. Poon, C., Ho, D. "A feasibility study on the utilization of r-FA in SCC". *Cement and Concrete Research*, vol. 34, 2004, pp. 2337-2339.
277. Poppe, A.M., De Schutter, G., "Creep and shrinkage of self-compacting concrete". *First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, RILEM Proceedings PRO 42, 2005*, pp.329- 336.
278. Portillo, A.D., Arredondo, S.P., Corral, R., Almaral, J.L., Gómez, J. M. "Evaluación de las propiedades cementantes y reactividad de cenizas volantes activadas alcalinamente". *XII Congreso Iberoamericano de Materiales*. Alicante, España, 2012.
279. Puentes, J., Barluenga, G., Palomar, I. "HAC con adiciones y fibras de tamaño nanométrico y micrométrico". *3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante*. Madrid, España, 2012.
280. Puertas F. Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. *Mater Constr* 1993;43:37-48. Cement Association. Skokie, IL, EEUU; 2004.
281. Puertas F. Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. *Mater Constr* 1993;43:37-48. Cement Association. Skokie, IL, EEUU; 2004.
282. Puertas, F. "Cementos de escorias activadas alcalinamente: situación actual y perspectivas del futuro". *283, Materiales de Construcción*, Vol. 56, págs. 79-90. 2006.
283. Puertas, F. "Escorias de alto horno: Composición y comportamiento hidráulico" *Materiales de construcción*. Vol. 43. n.º 229. enero/febrero/marzo 1993.

284. Puertas, F., Blanco, M.T., Palomo, A. "Microestructura del hormigón – Influencia sobre sus propiedades". Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja. Madrid, n° 398, 1989.
285. Puertas, F., Palacios, M. Y De Gutierrez. Morteros de Escoria Activada Alcalinamente. Propiedades y durabilidad, R. 1 239, 1995, Materiales de Construcción, Vol. 45, págs. 53-66.
286. Raggiotti, B., Positieri, M., Parola, P., Rautenberg, D., Romero, A. "Influencia de las adiciones activas en la durabilidad del Hormigón. El cómo y el por qué". Sinco 2012, 5° simposio internacional sobre hormigones especiales. Fortaleza, Brasil, 2012.
287. Ramazan, D., Rüstem, G. "Production of high strength concrete by use of industrial by-products". Building and Environment, 41, 2006, pp. 1124-1127.
288. Rao, G.A. "Investigations on the Performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars". Cement and Concrete Research, 33, 2003, pp. 1765-1770
289. Ray, I.; Chattopadhyay, R. "Effect of silica fume on superplasticized concrete". International Conference on Concretes, Dundee, Scotland ,1999.
290. Repette, W. L. "Concretos de Última Geração: Presente e Futuro". Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações / ed. G. C. Isaia. Vol. 2. São Paulo: IBRACON, 2005.
291. Revuelta, D., Barona A. y Navarro, D. "Measurement of properties and of the resistance to segregation in heavyweight, self-compacting barite concrete", Materiales de construcción, n.º 59 ,2009.
292. Rigueira, J., García-Taengua, E., Serna, P. "Producción a gran escala del HAC: una aproximación desde la robustez". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
293. Rocco, C., Giangrasso, F., Bergol, L., Fava, C., Fornasier, G. "Comparación de las propiedades mecánicas y deformaciones a larga edad de hormigones autocompactantes y hormigones

- convencionales". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
294. Rodrigo, M. "desarrollo de un dispositivo para la determinación de la aptitud del hormigón para el bombeo" Tesina de especialidad. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, 2011.
295. Rodríguez A., Suárez del Río L. M., Calleja L., Ruiz V. G., " Métodos microscópicos para la cuantificación del contenido en fase vítrea de escorias siderúrgicas", *Materiales de Construcción* , vol. 47, nº245, pp.45-51, 1997.
296. Rodríguez E.; Bernal, S.; Mejía de Gutiérrez, R. y Puertas, F. "Hormigón alternativo basado en escorias activadas alcalinamente". *Materiales de construcción*. Vol. 58, 291, pp.53-97, 2008.
297. Rodríguez, G. "Hormigones autocompactantes verdes". 2º congreso ibérico de hormigón autocompactante. Guimaraes, Portugal, 2010.
298. Rodríguez, J.L., González, D. "Comportamiento del metacaolín en mezclas de HAC con aditivos policarboxílicos". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008a.
299. Rodríguez, J.L., González, D. "Influencia del aditivo reductor de la retracción en el control de la retracción en un HAC arquitectónico". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008b.
300. Rojas, L., Fernández, J., López, J. C. "Estimación de la resistencia in situ de un HAC mediante la resistencia de probetas testigo". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
301. Rols, S., Ambroise, J. y Pera, J. "Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete". *Cement and Concrete Research*. Vol. 29, 1999, pp. 261-266.
302. 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
303. Roncero J.; Magarotto R. "Control efectivo de los parámetros reológicos del hormigón mediante el empleo de aditivos modificadores de la viscosidad: de la teoría a la práctica". *Cemento y hormigón*, n.º 922, 2008.
304. Roncero, J., Barragán, B., Zerbino, R. "Efecto de la temperatura sobre los parámetros reológicos de morteros para HAC". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008b.
305. Roncero, J., Vaquero, J.M., Khurana, R.S., Corradi, M. Magarotto, R. "Empleo de hormigones autocompactantes con bajos contenidos de finos en el sector del hormigón preparado: algunas experiencias prácticas". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008c.
306. Rozière, E., Granger, S., Turcry, PH. y Loukili, A. "Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete". *Cement and Concrete Composites*. Vol. 29, 2007, pp. 626-636.
307. Ruiz, L., Lozano J.A., Barragán, B. E., Turmo, J. "Principales singularidades del hormigón autocompactante de cara a su producción y puesta en obra". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
308. Sacchet, D. "Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico." Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria. Brasil, 2008.
309. Sagoe, K., Brown, T., Taylor, A. "Performance of Concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate". *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 2001, pp. 707.

310. Saito K, Kinoshita M, Umehara H, Yoshida R. Properties of low-shrinkage, high-strength SCC using shrinkage-reducing admixture, blast furnace slag and limestone aggregates. In: Khayat KH, Feys D, editors. Design, production and placement of self-consolidating concrete, RILEM Bookseries 1; 2010, p. 283-293.
311. Salazar, J. "Abordando el tema de los ecomateriales desde la ciencia y la tecnología" Extraído el 11-12-2011 en <http://www.ecoingenieria.org>.
312. Sánchez, M., Alonso, M. C., Barragán, B. "Durabilidad de HAC expuestos a atmósferas agresivas naturales". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
313. Sánchez, M., Alonso, M. C., García, J. L., Florlaguna, V., Hidalgo, A. "Interacción de aditivos superplastificantes con las fases acuosa y sólida durante la hidratación de pastas de cemento". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
314. Santos, A.C.P., Aguado, A., Agulló, L., Masó, D. "Influencia del esqueleto granular en la dosificación de HAC". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
315. Santos, C. P., Cavalaro, S. H. P., Aguado, A. "Comparación entre ensayos para evaluar la segregación en hormigones autocompactantes". 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
316. Santos, R., Lopes, J. "Efeito de diferentes superplastificantes na reologia da pastas de cimento para BAC.", Encontro Nacional de Betão Estrutural ,FEUP-Porto, 2004.
317. Scandiuzzi L, Battagin AF. A Utilização da escória granulada de altofornocomo agregado miúdo. Estudo Técnico nº 95. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo; 1990.
318. Scandiuzzi L, Battagin AF. A Utilização da escória granulada de altofornocomo agregado miúdo. Estudo Técnico nº 95. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo; 1990.

- 319.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.
- 320.Sedran, T y Larrad, F. Optimization of Self-Compacting Concrete Thanks to Packing Model. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Nantes, France. The First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. A. Sakarendahl and Ö. Petterson (editors), RILEM Publications S.A.R.L. Estocolmo, Suecia, 1999
- 321.Sedran, T., De Larrard, F., Hourst, F. and Contamines, C. "Mix design of self- compacting concrete". *Production Methods and Workability of Concrete*, Eds P.J.M. Bartos, D.L. Marrs y D.J. Cleand, E&FN Spon, London, England, 1996, pp. 439-450.
- 322.Sergio Ramos, A. "Avaliação de desempenho de concreto contendo agregado graúdo de escória de ferro-cromo." Dissertação apresentada ao Mestrado de Engenharia Ambiental Urbana da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2006.
- 323.Shah S, Khayat, K.,Taylor, P. "SCC formwork pressure. The national ready-mix concrete research foundation" EEUU, 2007.
- 324.Shah, S. 2009. Next horizon in high performance concrete: Selfconsolidating concrete and nanotechnology. ACBM Center
- 325.Shah, S.P., Ferron, R.P., Kwon S.H., Ferrara, L., Tregger, N., Mondal, P. "Microstructural characteristics of SCC: from fresh state to hardened properties". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
- 326.Shannang. M.J. "High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume". *Cement and Concrete Composites*, 22, 2000, pp 399-406.
- 327.Shen L., Lange D., Struble L., Dambrosia M., Tejeda F., Birch B., Brinks A., "Performance and acceptance of selfconsolidating concrete: Final report" Civil Engineering Studies, Illinois Center for

- Transportation Series No. 08-020 UILU-ENG-2008-2007. ISSN: 0197-9191. 2008.
328. Shiotani, T.; Bisschop, J. y Mier J.G.M. "Temporal and spatial development of drying shrinkage cracking in cement-based materials". *Engineering fracture mechanics*, 70: 1509-1525, 2003.
329. Siegel, M. *Fundição*. São Paulo: Associação Brasileira De Metais, 1982.
330. Skarendahl, A., Petersson, O. "Self - Compacting Concrete, State - of the -Art". Report of RILEM TC 174 - SCC, Report 23, RILEM publications S.A.R.L., Cachan, Francia, 2000, 154p
331. Soares, J. "Escória granulada de fundição utilizada como substituição ao cimento em concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade". Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.
332. Song, H.W., Byun, K.J., Kim, S.H., Choi, D.H. "Early-age creep and shrinkage in self-compacting concrete incorporating GGBFS", *Proceedings of the Second International Symposium on SCC*, pp. 413-21. 2001.
333. Soroka, I. "Concrete in hot environments". Israel. Ed: E&FN SPON. 1993.
334. Su, J., Cho, S., Yang, C. y Huang, R. "Effect of sand ratio on the elastic modulus of self-compacting concrete". *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 10. N.º 1, 2002, pp. 8-13.
335. Tazawa E, Miyazawa S. Effect of constituents and curing conditions on autogenous shrinkage of concrete. In: Tazawa E, editor. *Autogenous shrinkage of concrete*, Taylor & Francis; 1999, p. 269-280.
336. Tojal, T., Correia, P. C., Marie, J. "Comportamento de aderência concreto autoadensável-aço". 3º Congresso Iberoamericano sobre

- Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2012.
337. Topcu B.; A. Ugurlo, "Elasticity theory of concrete and prediction of Static E-modulus for dam Concrete using composite models", en Digest, Diciembre, pp. 1115-1127, 2007.
338. Toralles-Carbonari, B. M. "A synthetic approach for the experimental optimization of high strength concrete". International symposium on utilization of high strength/ high performance concrete, 4. Paris: Eds. F. De Larrard and R. Lacroix, 1996, pp. 161-167.
339. Toralles-Carbonari, M.B.; Elian, M.M.S.; Carbonari, G. "Influência da compacidade do esqueleto granular no consumo de pasta e nas propriedades do CAD". In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2003, pp 1-12.
340. 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.
341. Turcry, P., Loukili, A.; Haidar, K. Mechanical properties, plastic shrinkage, and free deformations of self-consolidating concrete. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete. Chicago, IL; ACBM, 2002, pp. 335-340.
342. Turcry, P.; Loukili, A. Haidar, K.; (2002). "Mechanical Properties, Plastic Shrinkage, and Free deformation of Self-consolidating Concrete". Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidation Concrete. Chicago, E.E.U.U. pp. 152-158.
343. Tviksta, L. G. "Guidelines, Report of Task 9: End Product, rational Production and Improved Working Environment through using SelfCompacting Concrete". Brite EuRam project BRPR. 2000.
344. UNE-EN 197-1:2000. "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes".

345. UNE-EN 197-1:2000. "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes".
346. UNE-EN 934-2. "Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2002.
347. Uomoto, T., Ozawa, K. "Recommendation for Self – Compacting Concrete". JSCE Concrete Engineering Series 31, Japan Society of Civil Engineers, Tokio, Japón, 1999, 80 p.
348. Urhan, S. Alkali-silica and pozzolanic reactions in concrete. "Part 1: interpretation of published results and hypothesis concerning the mechanism". Cement and Concrete Research, v.17, n.1, p.141-152, 1987.
349. Ushijima, S., Harada, K., and Taniguchi, H. "Fundamental Study in the Practical Use of High Performance Concrete." Concrete Under Severe Conditions. 1995.
350. Valcuende M, Benito, F.J., Parra, C., Miñano, I. Shrinkage of self-compacting concrete made with blast furnace slag as fine aggregate. Constr Build Mater. Pending review and publication-2014.
351. 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. Constr Build Mater 2012b; 28(1):122–128.
352. Valcuende M. O., Marco E. , Parra C. y Serna P. "Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete". Cement and Concrete Research. Volume 42, 2012, pp 583–592.
353. Valcuende M. O., Parra C., Serna P., García L. y Rodríguez C. "Robustness of Low-Fines Self-Compacting Concrete". 2º Congreso Ibérico sobre betão auto-compactável. 2010.

354. Valcuende, M., Parra, C. y Gomez, F. "Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete". *Construction and Building Materials*. Vol. 25, 1, pp 201–207, 2011b.
355. Valcuende, M.; Parra, C.; Miñano, I.; Martínez-Conesa, E.J.; Garrido, A. "Análisis de la penetración del ion cloruro en hormigones autocompactantes empleando modelos de lógica difusa" *Jornadas internacionales de investigación en construcción. Hitos estructurales de la arquitectura y la ingeniería*, Madrid, 2011.
356. Valcuende, M.O.; García, L.V.; Balasch, S.; Fernandez-Ilebrec, J.A. "Study of Robustness of Self-Compacting Concretes Made with Low Fines Content". *J. Mater. Civ. Eng.*, 25(4), 497–503. 2013.
357. Valdez, P., Barragán B., Girbes I., Shuttleworth N., y Cockburn, A. *Uso de residuos de la industria del mármol como filler para la producción de hormigones autocompactantes*. *Mater.Construcc*, Vol. 61, 301, 61-76. 2011
358. Valdez, P.; Barragán, B.; Girbes, I.; Shuttleworth, N. & Cockburn, A.: "Use of waste from the marble industry as filler for the production of self compacting". *Materiales de Construcción* [online], accepted manuscript(2010), doi: 10.3989/mc.2010.55109
359. Viacava, R., Sensale, G.R., Cavalaro, S. H. P. , Aguado, A. "Directrices de dosificación para hormigones autocompactantes de baja y media resistencia". *3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante*. Madrid, España, 2012.
360. Vieira, M.; Bettencourt, A. "Deformability of hardened SCC". *3.rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. (PRO 33). Iceland, 2003, pp 637-644.
361. Vilanova A. "Influencia de la dosificación y empleo de diferentes tipos de cemento y adiciones en las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante". *Tesis doctoral*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 2009.
362. Wallevik, O.; Nielsson, I. "Mix design of HS-SCC and practical

- application", 3.rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003.
363. Wallevik, O.H. "Rheology – a scientific approach to develop self-compacting concrete". 3.rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Islândia, 2003, pp 23-31.
364. Walraven J.C. "Self-compacting concrete: Challenge for designer and researcher". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008.
365. Wang, K., Shah, S.P., White, D., Gray, J., Voigt, T., Gang, L., Hu, J., Halverson, C., y Yilmaz, B. "Self-Consolidating Concrete—Applications for Slip-Form Paving:Phase I (Feasibility Study)" Center for Portland Cement Concrete Pavement Technology Iowa State University. November 2005.
366. Wang, S. "Review of recent research on alkali-activated concrete in China". Mag. Concr. Res. 43, n 154, 29-35, 1991.
367. Wang, S.D.; Scrivener, K.L. y Pratt, P.L. "Factors affecting the strength of alkali-activated slag". cem. Concr, Res. Vol 24, 1033-1043, 1994.
368. Wei Chen, Brouwers H.J.H., Shui Z.H. "Three-dimensional computer modeling of slag cement hydration". Journal Material Science vol 42, No. 23 (2007), pp. 9595-9610
369. Wilker R. V. "Estudio de la sensibilidad e influencia de la composición en las propiedades reológicas y mecánicas de los hormigones autocompactantes" Tesis Doctoral. E.T.S. de Ingenieros de caminos, canales y puertos Valencia, España, 2007.
370. Ye G, Xiu X, De Schutter G, Poppe AM, Taerwe L. Influence of limestone powder as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. Cement and Concrete Composites 2007; 94-102.
371. Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Taerwe, L., Yuan, Y. "The microstructure of SCC compared with high performance concrete and traditional concrete". First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, RILEM

- Proceedings PRO 42, 2005, pp. 383-394.
372. Yubero, E.; De Pablo, R. "Orientación de fibras en hormigón autocompactables". Anales de construcciones y materiales avanzados, vol 6. curso 2006-2007.
373. Yuksel, I. ; Bilir, T. A. and Ozkan, O. "Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate" Building and Environment 42. 2651–2659, 2007.
374. Zegarra, L. y Rodriguez, L. "Análisis de la velocidad de llenado para la validación de modelos experimentales de presión lateral de concreto fresco de alta fluidez en columnas". Universidad Nacional De Ingeniería Facultad De Ingeniería Civil. 2011.
375. Zerbino, R. Barragán, B., Agulló, L., García, T. y Gettu, R. "Reología de hormigones autocompactables. Ciencia y tecnología del hormigón", n.º 13, 2006.
376. Zerbino, R., Barragán, B., García, T., Agulló, L., Gettu, R. "Efectos de la temperatura sobre los parámetros reológicos y propiedades ingenieriles del hormigón autocompactante". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008a.
377. Zerbino, R., Tobes, J. M., Torrijos, M. C., López, A., Giaccio, G. "Hormigones autocompactantes fabricados con diferentes tipos de árido grueso". 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España, 2008b.
378. Zhang, Y.R.; Ying, G.Q. y Xi, O.S. "Study on structure and latent hydraulic activity of slag and its activation mechanism". Silic. Ind. 3/4, 55-59, 1988.

Anexo 1

Granulometría de los áridos

Para el análisis granulométrico de cada árido se ha determinado la distribución de las partículas por tamaños. Se ha separado al árido en diferentes fracciones y se ha calcula el porcentaje que pasa por cada tamiz (figura A1.1). Los tamices empleados siguen la progresión geométrica de razón 2 en sus aberturas, a excepción de los tamices 10 y 12,5mm, que siendo utilizados en la caracterización de la grava no han sido tenidos en cuenta en los cálculos realizados, agrupado el material retenido en ellos junto al de 8 mm, que si pertenece a la serie normalizada.



Figura A1.1. Tamices y dispositivo

La arena y la EGAH se secan ligeramente con el fin de evitar que se apelmacen sus granos por efecto de la humedad y queden retenidos por tamices de más abertura que los que corresponden al tamaño real. A continuación, se detallan el estudio granulométrico de los áridos estudiados.

1.1. Escoria

En el tamizado de la EGAH (figura A1.2), se obtienen los datos reflejados en la tabla A1.1 y se representan en la figura A1.3.



Figura A1.2. Escorias granuladas en recipiente a la izq. A la derecha vista ampliada

Tabla A1.1. Retenido-acumulado para cada tamiz

	Peso (g)	Retenido %	Acumulado (%)	Pasa (%)
8	0,00	0,00	0,00	100,00
4	0,00	0,00	0,00	100,00
2	21,80	8,38	8,38	91,62
1	88,20	33,92	42,31	57,69
0,5	97,80	37,62	79,92	20,08
0,25	44,10	16,96	96,88	3,12
0,125	7,10	2,73	99,62	0,38
0,063	1,00	0,38	100,00	0,00
Pasa	0,00	0,00		
Suma:	260,00	M finura:	3,27	

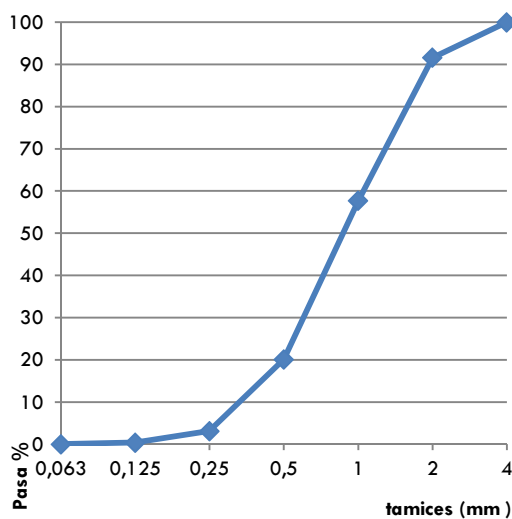


Figura A1.3. Curva granulométrica de la EGAH

1.2. Arena fina

Del tamizado de la arena fina (figura A1.4) se obtienen los datos reflejados en la tabla A1.2, y representados en la figura A1.5.



Figura A1.4. Izquierda, tamiz de 1 mm. Derecha, árido por diámetros

Tabla A1.2. Retenido-acumulado para cada tamiz

	Peso (g)	Retenido %	Acumulado (%)	Pasa (%)
8	0,00	0,00	0,00	100,00
4	0,00	0,00	0,00	100,00
2	1,60	0,41	0,41	99,59
1	111,90	28,79	29,20	70,80
0,5	74,50	19,17	48,37	51,63
0,25	52,10	13,40	61,77	38,23
0,125	43,70	11,24	73,01	26,99
0,063	38,60	9,93	82,94	17,06
Pasa	66,30	17,06	100,00	0,00
Suma:	388,70	M finura:	2,13	

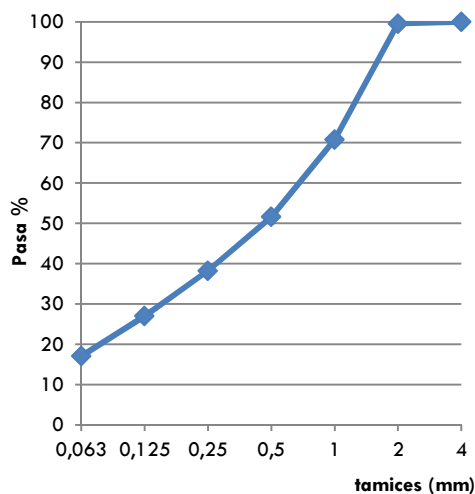


Figura A1.5. Curva granulométrica de la arena fina

1.3. Arena gruesa

De igual forma, en el tamizado de la arena gruesa (figura A1.7) se obtienen los datos reflejados en la tabla A1.3 y representados en la figura A1.6.

Tabla A1.3. Retenido-acumulado para cada tamiz

	Peso (g)	Retenido %	Acumulado (%)	Pasa (%)
8	0,00	0,00	0,00	100,00
4	0,60	0,12	0,12	99,88
2	133,90	27,48	27,60	72,40
1	108,70	22,31	49,91	50,09
0,5	61,60	12,64	62,55	37,45
0,25	43,60	8,95	71,50	28,50
0,125	44,00	9,03	80,53	19,47
0,063	36,50	7,49	88,02	11,98
Pasa	58,40	11,98	100,00	0,00
Suma(g):	487,30	M finura:	2,92	

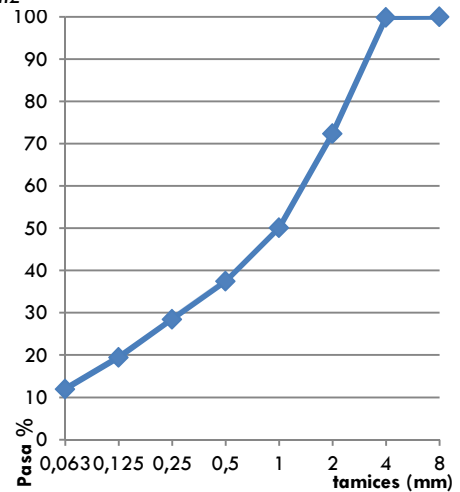


Figura A1.6. Granulometría de la arena gruesa



Figura A1.7. Arena gruesa separa tras tamizarla

1.4. Grava

La grava tamizada es mostrada en la figura A1.9 y en la tabla A1.4 se indican los datos obtenidos y se representan en la figura A1.8.

Tabla A1.4. Retenido-acumulado para cada tamiz

	Peso (g)	Retenido (%)	Acumulado (%)	Pasa (%)
12,5	59,40	5,74	5,74	94,26
10	432,10	41,77	47,51	52,49
8	444,90	43,01	90,52	9,48
6	83,00	8,02	98,54	1,46
Pasa	15,10	1,46	100,00	0,00
Suma(g):	1034,50	M finura:	6,91	

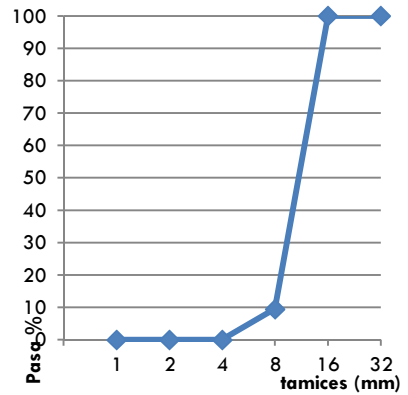


Figura A1.8. Granulometría de la grava



Figura A1.9. Muestra de grava en los diferentes tamices

Anexo 2

Procesos de amasado y molienda

2.1. Amasado de hormigones autocompactantes

El proceso de mezclado para todos los HAC de la fase experimental, utilizando la amasadora vertical de 20 y 60 litros (figura A2.1), se describe en los siguientes 5 pasos:

1. Verter los áridos, la escoria de alto horno y el cemento en la amasadora y mezclar en seco por algunos segundos.
2. Verter la mitad del agua.
3. Mezclar durante 1 minuto.
4. Verter el superplastificante con el resto del agua.
5. Mezclar durante 8 minutos aproximadamente.



Figura A2.1. Amasadora de 20 litros a la izq. y de 60l a la derecha

2.2. Amasado de morteros

El proceso de amasado de los morteros se realizó según se especifica en la norma UNE-EN 196-1. En primer lugar se pesaron los materiales (cemento, arena, escoria de alto horno y agua). Se vertió el agua en la amasadora y a continuación el cemento. Posteriormente se amasó a velocidad lenta durante 30 segundos. A continuación se añadió la arena de forma uniforme durante 30 segundos a velocidad lenta. Posteriormente se amasó a velocidad rápida durante 30s. Una vez finalizado este proceso se paró la amasadora, figura A2.2 y se dejó reposar la masa durante 90 s, finalizando el proceso a velocidad rápida durante 60 s.

Una vez concluido el amasado se procedió al llenado de los moldes, en este caso probetas estándar de 4x4x16cm. Este proceso se realizó en dos capas (figura A2.3). Primero una capa uniforme que se compactó con 60 golpes en la compactadora y, a continuación, se vertió la segunda capa de mortero que también se compactó con 60 golpes.

Una vez fabricadas las probetas, se conservaron en el interior de la cámara de curado a temperatura de $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $\geq 95\%$ (figura A2.3). Se sacaron de la cámara de curado únicamente durante el período en que se realizaban los ensayos.



Figura A2.2. Amasadora de morteros (izquierda y derecha)



Figura A2.3. Izquierda, llenado de moldes. Derecha, probetas terminadas

2.3. Molienda de la escoria granulada de alto horno

El proceso de molienda consistió en introducir la escoria en un molino de bolas cerámicas (dispositivo modelo SPEEDY, figura A2.5 y A2.6), para obtener una finura adecuada. Previamente la EGAH se desecó durante 2 horas en horno a 100°C para evitar apelmazamiento del polvo obtenido y facilitar su tamizado final. El molino se programó a 12 minutos con una cantidad de muestra de 350 ± 50 g en cada molienda para obtener la finura deseada, similar a la del cemento.

Para determinar la finura de molienda, sobre el tamiz 0,063mm se vierte el producto molido y se lava bajo el grifo con poco aporte de agua para evitar pérdidas de la muestra por salpicaduras o rebose del tamiz. Se mantiene bajo el aporte de agua hasta conseguir masa constante con el paso del tiempo. Es decir, se comprueba que el producto retenido por el tamiz no cambia de cantidad con el paso del tiempo y que el agua no arrastra producto (el agua cae transparente), lo que indica que todo el productor menor a 0,063mm ha pasado. El material retenido se seca en horno hasta peso constante y se pesa. A continuación se calcula la proporción sobre la muestra original y se determina la finura. Se repite el proceso con varias muestras de escoria molida y se realiza la media entre los resultados (figura A2.4). Con los 12 minutos programados se obtiene que un 70% de la muestra pasa por el tamiz de 0,063mm.

La escoria molida es utilizada en dosificaciones de mortero para conocer su reactividad, en pastas para microscopia electrónica de barrido y de fuerza atómica (AFM).

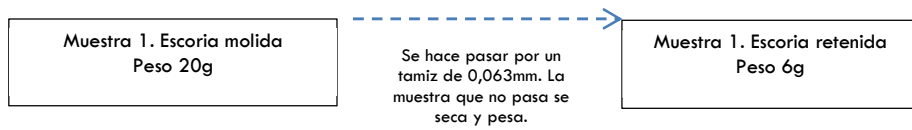


Figura A2.4. Proceso molido y tamizado de la escoria



Figura A2.5. Izquierda, dispositivo de molienda. Derecha, la EGAH sin moler



Figura A2.6. Izquierda, molienda de la escoria. Derecha, escoria molida

Anexo 3

Ajustes previos de la dosificación de los HAC

Antes del desarrollo de la fase experimental, se procede a obtener la dosificación más idónea a los requerimientos reológicos establecidos (un ϕ_f de 700 ± 50 mm).

Se realizan varias dosificaciones que se ajustan a la curva teórica de Bolomey para $\alpha=20$ (figura A3.1), todas ellas con una relación $a/c=0,55$ ¹. A continuación se muestran algunas de las dosificaciones estudiadas más destacables, con sus pesajes y resultados del ensayo de escurrimiento.

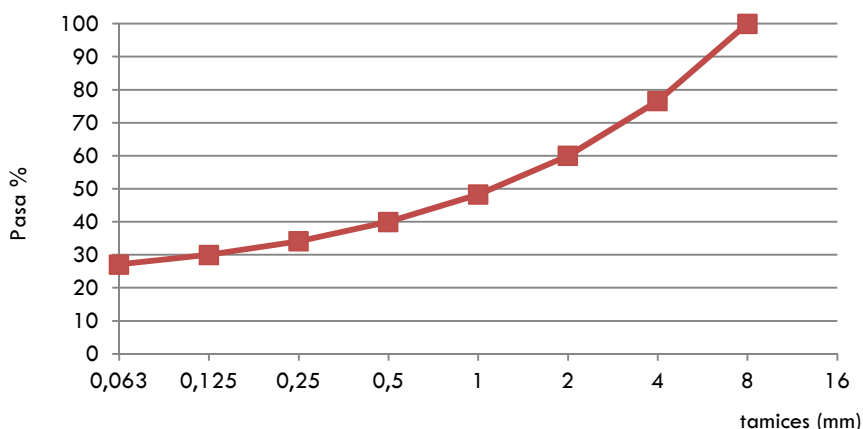


Figura A3.1. Curvas teórica Bolomey para $\alpha=20$

¹En base a trabajos previos, alguno de ellos incluidos en este anexo, se adoptó una relación a/c de 0,55 para garantizar, junto al SP añadido, de una adecuada reología de los HAC con diferentes sustituciones de EGAF, además de unas propiedades mecánicas aceptables para todos ellos.

La primera sustitución planteada, con el 50% de escoria como árido fino, se parte de la premisa de agotar la arena fina y sustituir la parte necesaria de arena gruesa (en este caso 26,64%) hasta que sume entre ambas un 50% de arena sustituida. La escoria carece de finos, por lo que se decide incorpora finos calizos para mejorar de la granulometría de las escorias y asemejarla a la de los áridos sustituidos. Para ello, se añade un 11,98% de finos calizos para la parte sustituida de arena gruesa y un 17,06% para la arena fina sustituida. En la tabla A3.1 se muestran los pesajes para una amasada de 10 litros. Realizándose, en los estudios previos, pesadas acumuladas en grava, arena gruesa, arena fina, escoria y finos

Tabla A3.1. Pesadas ajustadas, parciales y acumuladas de la 1ª amasada

	Parciales	Acumuladas
Grava	6,70 kg	6,70 kg
Arena gruesa	5,98 kg	12,69 kg
Arena fina	0,00 kg	12,69 kg
Escoria	5,32 kg	18,01 kg
Finos	0,86 kg	18,87 kg
Cemento	3,75 kg	3,75 kg
Agua	1,41 kg	1,33 kg
Superplastificante	56,25 gramos	56,25 gramos

La mezcla y amasado de los componentes se realizada durante 10 minutos (figura A3.2), manteniendo siempre el mismo procedimiento. Se comienza con la incorporación de todos los áridos y cemento. Se pone en marcha la amasadora y se vierte el 50% del agua dosificada. Se incorporando el superplastificante al resto del agua para su vertido a la amasadora pasado un minuto. Al completar los 10 minutos se detiene la amasadora y se trabaja ligeramente la masa de forma manual para observar su correcto amasado. A continuación, se procede a realizar el

ensayo escurrimiento. En esta primera amasada, el diámetro final resultante fue de 720 mm, con un T_{500} de 2,0 segundos, observándose exudación en la mezcla (figura A3.3).



Figura A3.2. Amasado del HAC

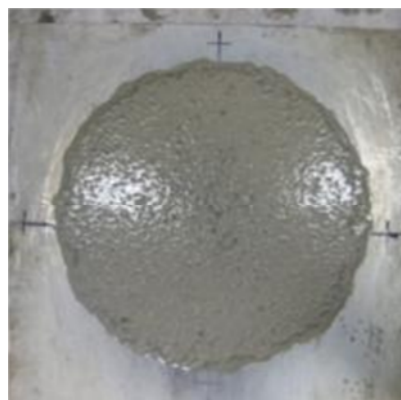


Figura A3.3. Ensayo de escurrimiento

En la segunda dosificación planteada, con los pesajes de la tabla A3.2, se obtuvo un diámetro final de 580 mm en el ensayo de escurrimiento (figura A3.4), con un T_{500} de 4,9 segundos. Se observa que la pasta se encuentra frenada y se le añaden 7 gr de superplastificante a la amasadora. Se reamasa y se vuelve a hacer el ensayo, resultando esta vez 640mm pero con comienzo de exudación (figura A3.5).

Tabla A3.2. Pesadas ajustadas, parciales y acumuladas, de la 3ª amasada

Amasada 2ª	Parciales	Acumuladas
Grava	6,74 kg	6,85 kg
Arena gruesa	5,99 kg	13,08 kg
Arena fina	0,00 kg	13,08 kg
Escoria	5,32 kg	18,57 kg
Finos	0,86 kg	19,51 kg
Cemento	3,75 kg	3,75 kg
Agua	1,30 kg	1,30 kg
Sup. Plastificante	56,25 gramos	56,25 gramos



Figura A3.4. Øf de 580 mm



Figura A3.5. Øf de 640 mm

La siguiente dosificación planteada, tras los ajustes a la curva teórica de Bolomey, se incorporan 25kg/m³ de cenizas volantes para mejorar la fluidez de la masa sin tener que aumentar la cantidad del superplastificante. Estas cenizas, dada su forma esférica, hacen de micro-rodamiento en la estructura interna del HAC. Además, se consideran material cementante en la relación a/c, por lo que se añaden 13,75kg de agua que permiten una mayor fluidez del HAC. En la tabla A3.3 se muestran los pesajes obtenidos para esta nueva dosificación, en la que se obtiene un Øf de 530 mm (figura A3.6) y un T₅₀₀ de 5,35 segundos.

Tabla A3.3. Pesadas acumuladas

Amasada	Acumuladas
Grava	6,73 kg
Arena gruesa	12,71 kg
Arena fina	12,71 kg
Escoria	18,02 kg
Finos	18,88 kg
Cemento	3,75 kg
Agua	1,30 kg
Sup.Plastificante	56,25 gramos
Cenizas Volante	0,25 kg



Figura A3.6. Ensayo de escurrimiento

El alto T_{500} obtenido indica que la pasta está frenada, por lo que se modifica la dosificación añadiendo superplastificante hasta el 1,75%. Se reamasa y se vuelve a hacer el ensayo, obteniendo \varnothing de 600 mm y un T_{500} de 4,53 segundos. Se decide incorporar a la amasada 112g de agua y se obtiene un \varnothing de 600mm (figura A3.7) y un T_{500} de 2,8 segundos. Dada la buena apariencia del fluido obtenido, se prueba aumentar 6 g más el superplastificante, que tras el periodo de reamasado, se obtiene un \varnothing de 680 mm (figura A3.8) y un T_{500} de 2,2 segundos. Estos resultados son muy buenos para los objetivos planteados en la investigación, teniendo en cuenta la sustitución del 50% del árido fino por escoria granular.



Figura A3.7. \varnothing de 600 mm



Figura A3.8. \varnothing de 680 mm

En una nueva búsqueda de mejoras reológicas en el fluido, se sustituyen los $25\text{kg}/\text{m}^3$ de ceniza volante anteriores por fino calizo. Resulta, por tanto, un total de $111,15\text{kg}/\text{m}^3$ de finos, $86,15\text{kg}/\text{m}^3$ por la mejora de granulometría de la escoria y el resto por los $25\text{kg}/\text{m}^3$ de la sustitución planteada. En la tabla A3.4 se muestran las pesadas para 10 litros de HAC. Se obtienen un \varnothing de 660mm y un T_{500} de 4,5 segundos.

Tabla A3.4. Pesadas acumuladas

Amasada	Acumuladas
Grava	6,73 kg
Arena gruesa	12,72 kg
Arena fina	12,72 kg
Escoria	18,03 kg
Finos	18,89 kg
Cemento	3,75 kg
Agua	1,30 kg
Sup. Plastificante	60 gramos
Finos calizos extras	0,25 kg

**Figura A3.9.** Øf de 660 mm

El avance de este HAC se observa lento y se decide añadir superplastificante hasta 1,70%. Se reamasa y se vuelve a hacer el ensayo de escurrimiento, obteniendo un Øf 670 mm (figura A3.10) y un T_{500} de 2,35 segundos. La pasta sigue presenta una buena cohesión y avance. Se le añaden $25\text{kg}/\text{m}^3$ de finos extras, obtenemos un Øf de 670 mm y un T_{500} de 4,0 segundos, provocando que el avance de la masa se ralentice en exceso, por lo que se descarta esta última modificación.

**Figura A3.10.** Øf de 670 mm

Se continua probando la incorporación de finos calizos, ahora se prueban con $31,25 \text{ kg/m}^3$ pero con un 25% de árido fino sustituido por escoria. En la tabla A3.5 se muestra las pesadas para una amasada de 10 litros. Inicialmente, con esta dosificación, la pasta no fluye como es de esperar y se descarta. Se repite el proceso, pero elevando desde el principio la cantidad de SP (1,7%) obteniendo entonces un \varnothing f de 560mm (figura A3.11). Se realiza un incremento del 25 kg/m^3 de finos en la dosificación anterior y se obtiene un \varnothing f de 590mm (figura A3.12). Se vuelve a repetir el ensayo con $12,5 \text{ kg/m}^3$ más de finos calizos y vuelve a aumentar el \varnothing f hasta los 610mm (figura A3.13).

Tabla A3.5. Pesadas acumuladas

Amasada	Acumuladas
Grava	6,73 kg
Arena gruesa	14,89 kg
Arena fina	15,72 kg
Escoria	18,32 kg
Finos	18,80 kg
Cemento	3,75 kg
Agua	1,30 kg
Sup. Plastificante	60,00 gramos
Finos calizos extras	0,3125 kg



Figura A3.11. \varnothing f de 560mm



Figura A3.12. \varnothing f de 590 mm



Figura A3.13. \varnothing f de 610 mm

La buena cohesión y avance de la última dosificación analizada permite probar un nuevo incremento de $25\text{kg}/\text{m}^3$ de finos, resultando un Øf de 670mm con un T_{500} de 4,0 segundos. Se ha mantenido la fluidez, aunque se ha ralentizado en exceso el avance del HAC, provocado, quizás, por una trabazón en la microestructura por exceso de viscosidad. Esta última dosificación se descarta.

Con estas últimas amasadas se da por concluida la parte de ajuste de la dosificación y se acepta como la más idónea para la fase experimental la que se obtiene un Øf 680 mm y T_{500} de 2,2 segundos. En la tabla A3.6 se muestra todo lo indicado de forma esquemática, con otras amasadas no descritas. La amasada n° 5, en su última modificación, es la indicada y aceptada como idónea.

Tabla A3.6. Ajustes previos en la dosificación

Nº amasada	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SP %	1,5	1,5	1,5	1,5	1,7	1,6	1,6	1,6	1,4
%Escoria	50	55,5	50	50	50	50	25	50	50
Finos extras (kg/m ³):	0				25 C	25 C	31,25 C	25 CV	25 CV
Relación a/c	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Cemento (kg/m ³)	375	350	375	375	375	375	375	350 (+25 CV)	350 (+25 CV)
Grava	6,70	6,82	6,85	6,73	6,73	6,73	6,73	6,70	6,70
Arena gruesa	12,69	12,36	13,08	12,71	12,71	12,72	14,89	12,60	12,60
Arena fina	12,69	12,36	13,08	12,71	12,71	12,72	15,72	12,60	12,60
Escoria	18,01	18,48	18,57	18,02	18,02	18,03	18,32	17,91	17,91
Finos calizo (C) por EGAH	18,87	19,50	19,51	18,88	18,88	18,89	18,80	18,78	18,78
Cemento	3,75	3,50	3,50	3,75	3,75	3,75	3,75	3,50	3,50
Agua	1,33	1,15	1,12	1,30	1,30	1,30	1,30	1,50	1,50
SP(g/amasada)	56,25	52,50	52,50	56,25	56,25	60,00	60,00	60,00	52,50
T ₅₀ (seg)	2,0		4,9	3,8	5,35	4,5			
ØF (cm):	72		58	64	53	66*			67 Exudac.
Modificación 1:				SP a 1,7%	SP a 1,75%	SP a 1,7%	SP a 1,7%		+ 50% C
Nuevo T ₅₀				3,9	4,53	2,35			
Nuevo ØF (cm):				64	60	67	56		62
Modificación 2:						25 kg/m ³ C	25 kg/m ³ C		
Nuevo T ₅₀					2,8	4			
Nuevo ØF (cm):					60	67	59,00		
Modificación 3:					SP a 1,75%	12,5 kg/m ³ C	12,5 kg/m ³ C		
Nuevo T ₅₀					2,2				
Nuevo ØF (cm):					68	66	61		

Anexo 4

Estudio VSI en los HAC

En la tabla A4.1 y figuras de la A4.1 a la A4.26 se muestran los resultados obtenidos en la inspección VSI de todas las amasadas analizadas, siendo la n° 0 la de referencia de cada dosificación.

Tabla A4.1. Valores VSI para las diferentes amasadas

	H-0				H-10				H-20				H-30				H-40				H-50			H-60						
Am.	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	1	2	3	1	2	3
VSI	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0

4.1. HAC de referencia. Sustitución del 0% del árido fino.

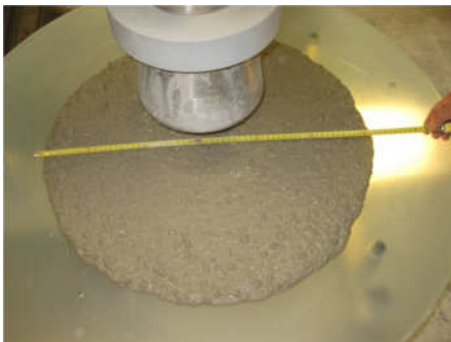


Figura A4.1. Amasada 0 del H-0



Figura A4.2. Amasada 1 del H-0



Figura A4.3. Amasada 2 del H-0

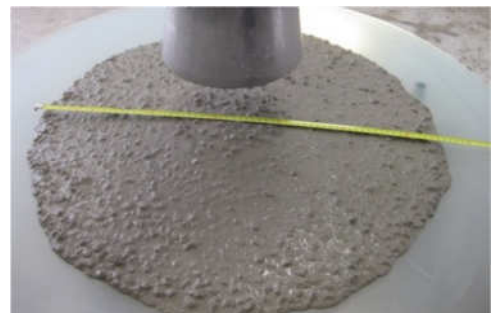


Figura A4.4. Amasada 3 del H-0

4.2. Sustitución del 10% del árido fino.



Figura A4.5. Amasada 0 del H-10



Figura A4.6. Amasada 1 del H-10



Figura A4.7. Amasada 2 del H-10



Figura A4.8. Amasada 3 del H-10

4.3. Sustitución del 20% del árido fino.



Figura A4.9. Amasada 0 del H-20



Figura A4.10. Amasada 1 del H-20

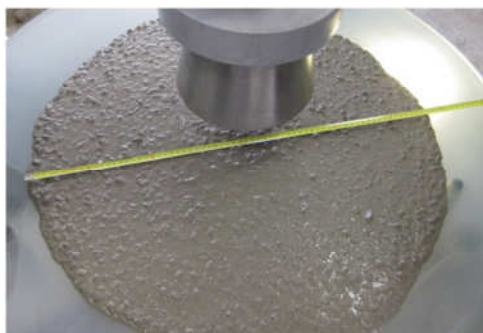


Figura A4.11. Amasada 2 del H-20

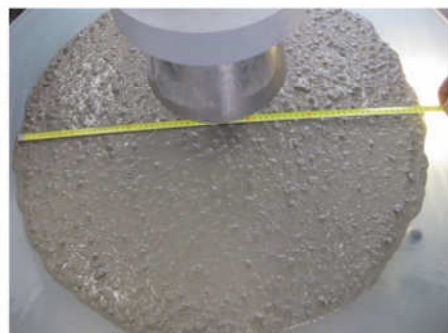


Figura A4.12. Amasada 3 del H-20

4.4. Sustitución del 30% del árido fino.



Figura A4.13. Amasada 0 del H-30



Figura A4.14. Amasada 1 del H-30



Figura A4.15. Amasada 2 del H-30

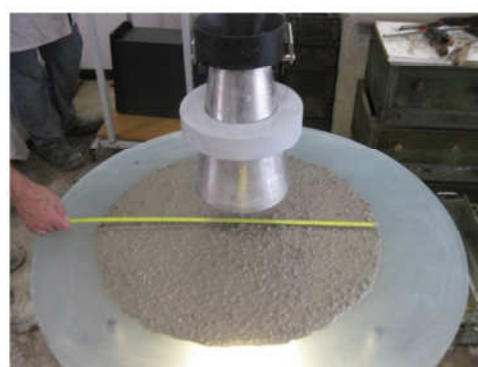


Figura A4.16. Amasada 3 del H-30

4.5. Sustitución del 40% del árido fino.



Figura A4.17. Amasada 0 del H-40

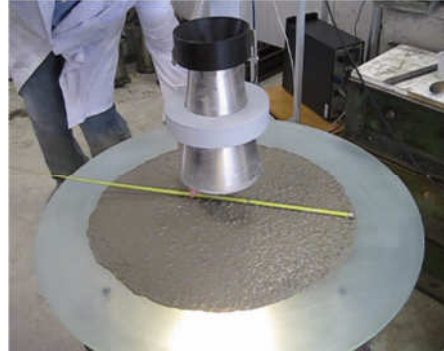


Figura A4.18. Amasada 1 del H-40



Figura A4.19. Amasada 2 del H-40



Figura A4.20. Amasada 3 del H-40

4.6. Sustitución del 50% del árido fino.



Figura A4.21. Amasada 1 del H-50



Figura A4.22. Amasada 2 del H-50



Figura A4.23. Amasada 3 del H-50

4.7. Sustitución del 60% del árido fino.



Figura A4.24. Amasada 1 del H-60



Figura A4.25. Amasada 2 del H-60



Figura A4.26. Amasada 3 del H-60

Anexo 5

Estudio del ensayo de escurrimiento

En las siguientes figuras, de la A5.1 a la A5.18, se muestra los datos computarizados de la evolución del ensayo de escurrimiento. En ellas, se marca el valor de T_{500} . A la derecha de cada figura, y en parte superpuesta, se muestra la evolución de la velocidad del fluido. Para las amasadas n°1 y n°2 del 20%, por problemas informáticos, no se pudo realizar correctamente el almacenamiento de los datos.

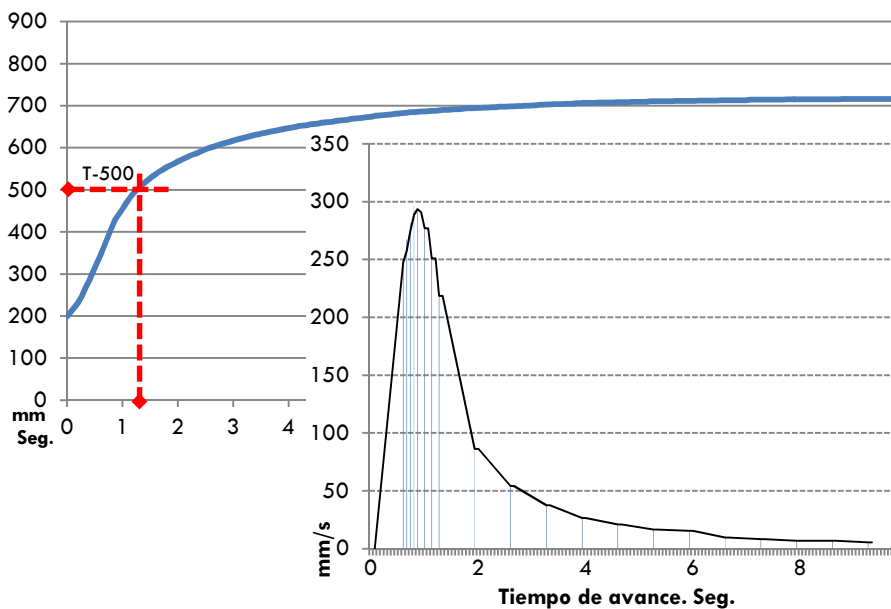


Figura A5.1. Amasada 1 del H-0. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

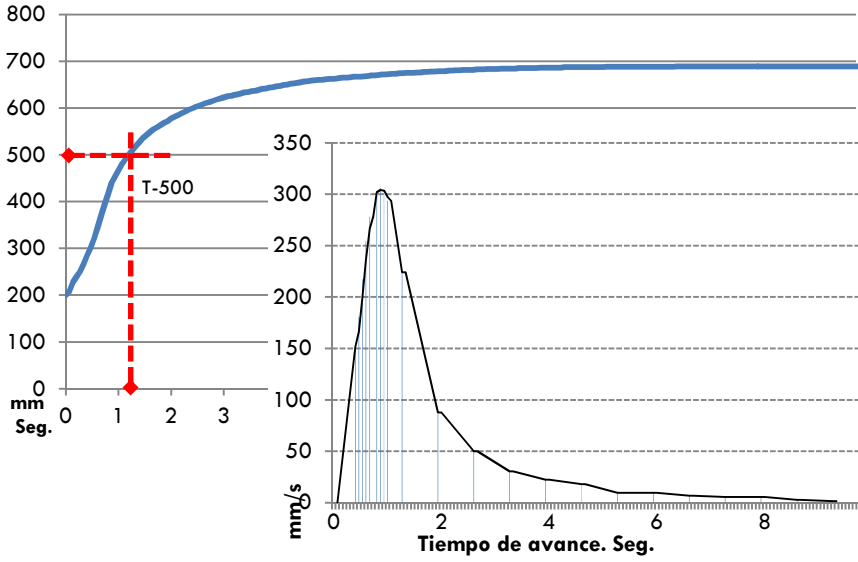


Figura A5.2. Amasada 2 del H-0. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

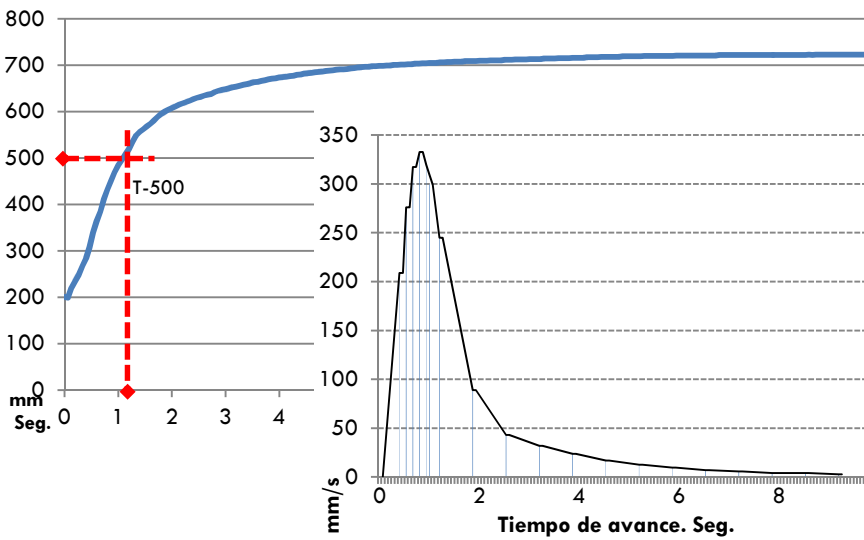


Figura A5.3. Amasada 1 del H-10. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

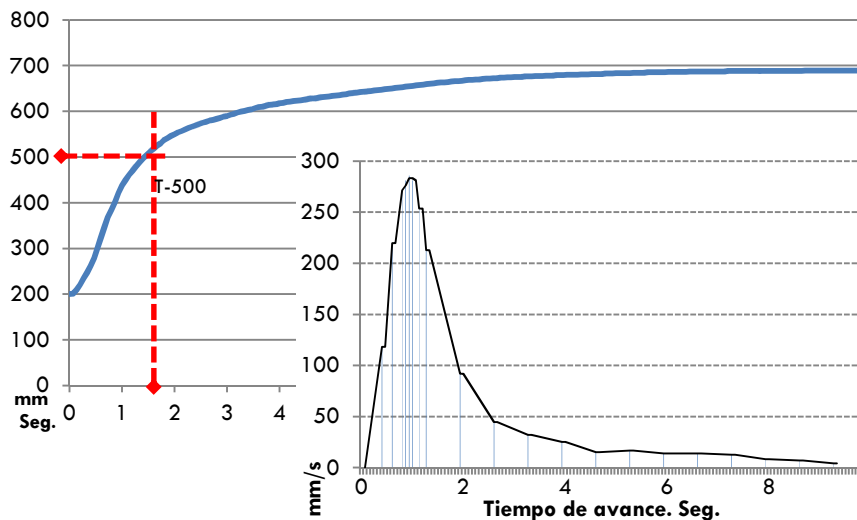


Figura A5.4. Amasada 2 del H-10. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

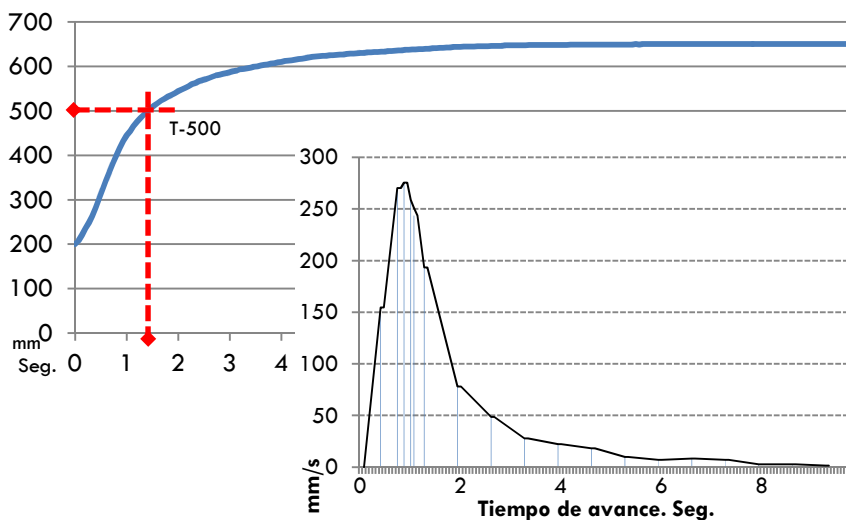


Figura A5.5. Amasada 3 del H-10. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

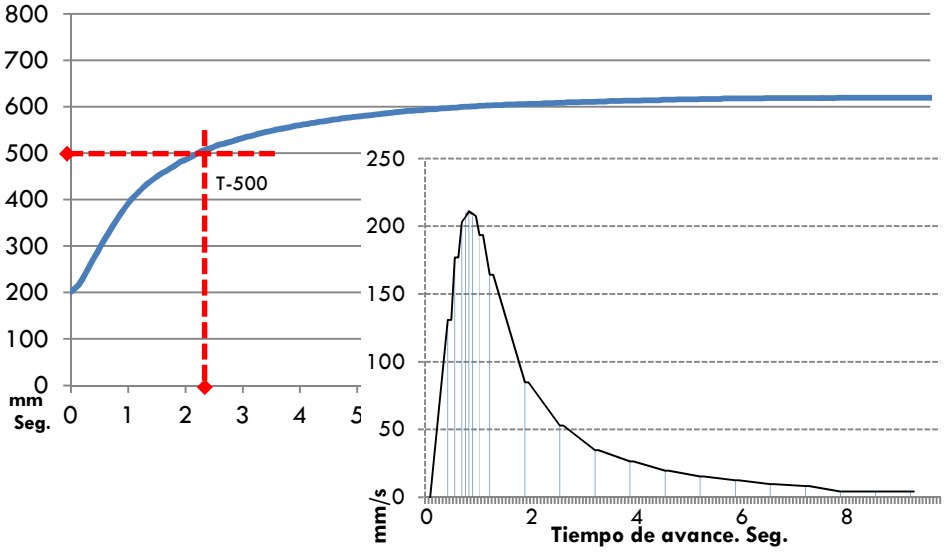


Figura A5.6. Amasada 3 del H-20. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

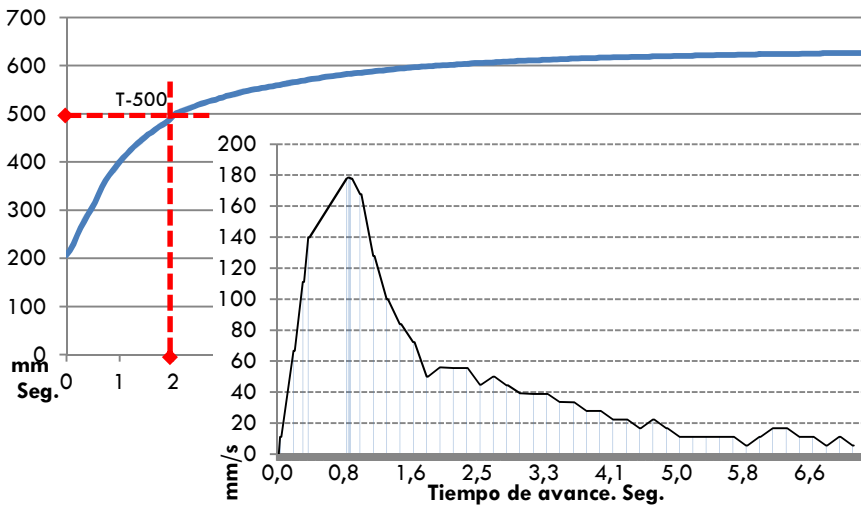


Figura A5.7. Amasada 1 del H-30. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

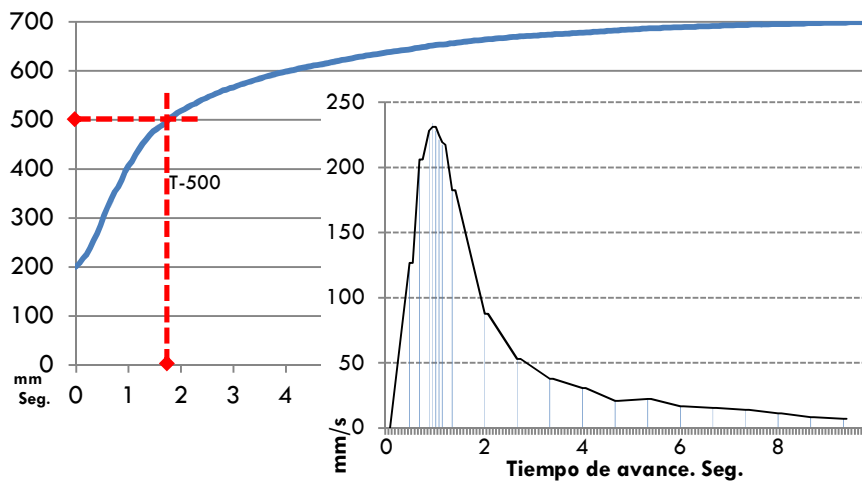


Figura A5.8. Amasada 2 del H-30. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

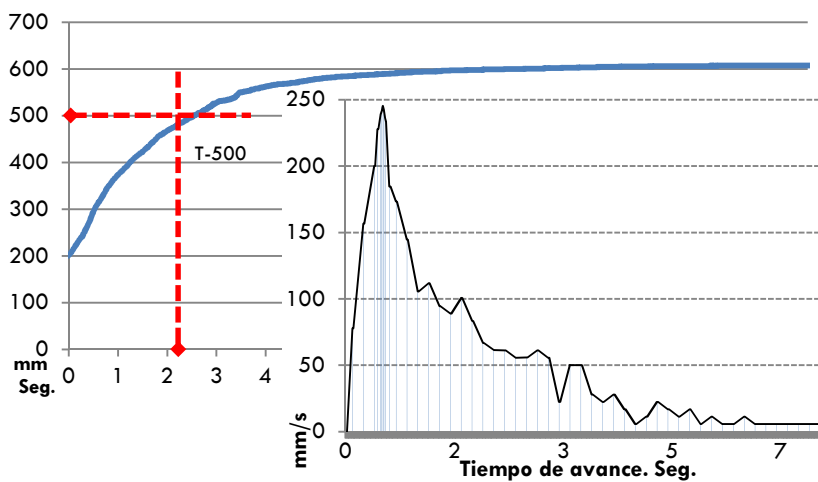


Figura A5.9. Amasada 3 del H-30. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

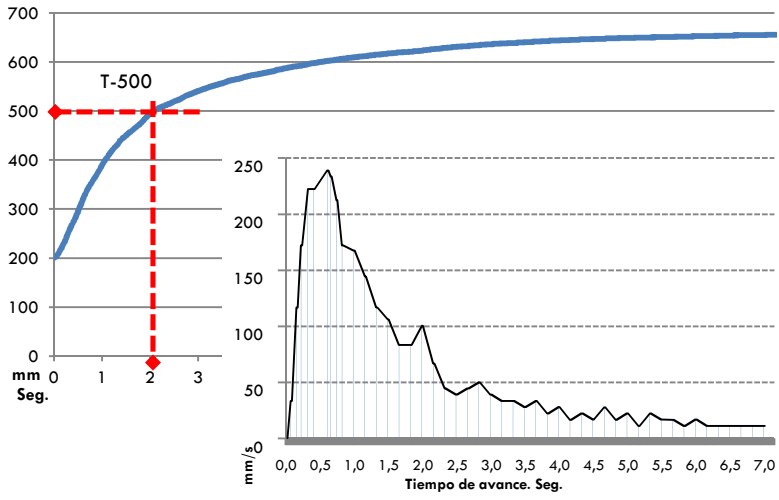


Figura A5.10. Amasada 1 del H-40. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

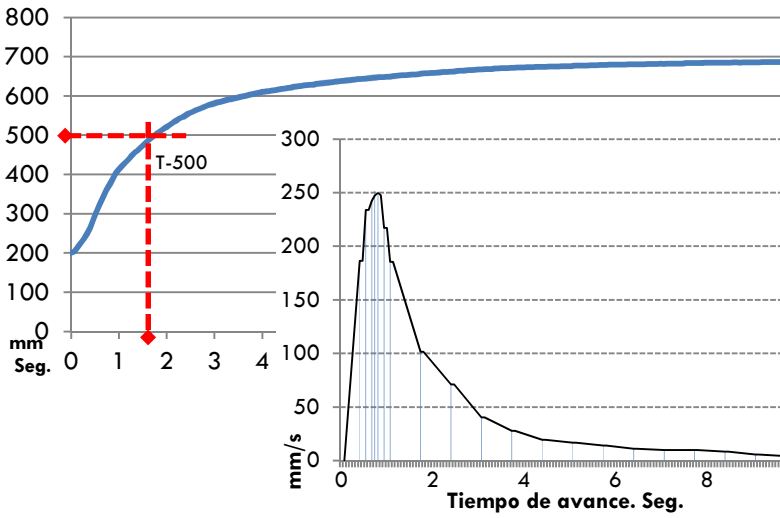


Figura A5.11. Amasada 2 del H-40. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

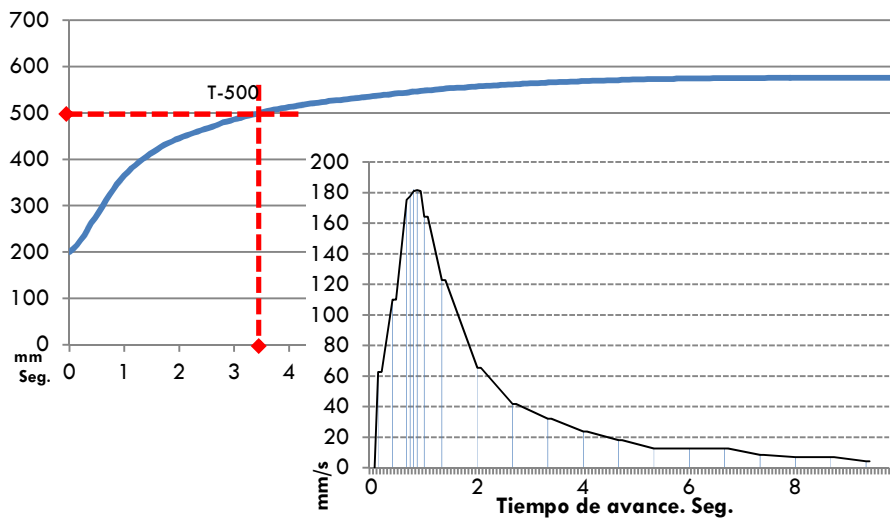


Figura A5.12. Amasada 3 del H-40. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

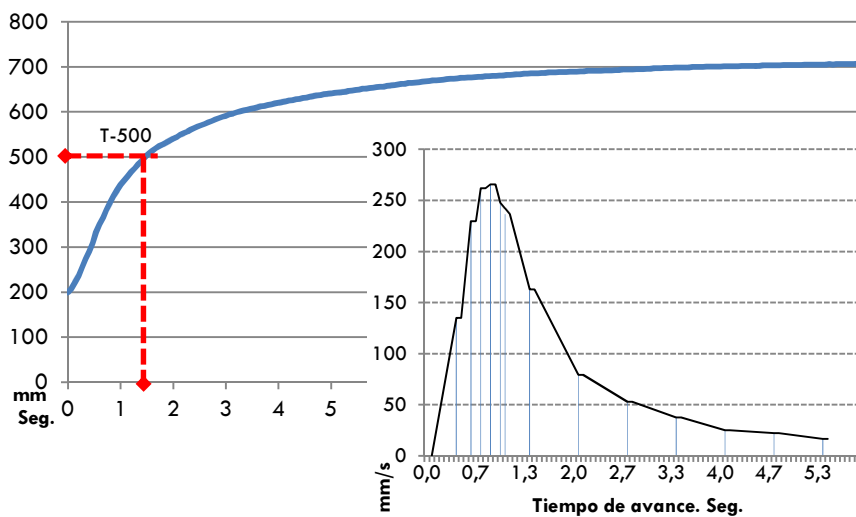


Figura A5.13. Amasada 1 del H-50. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

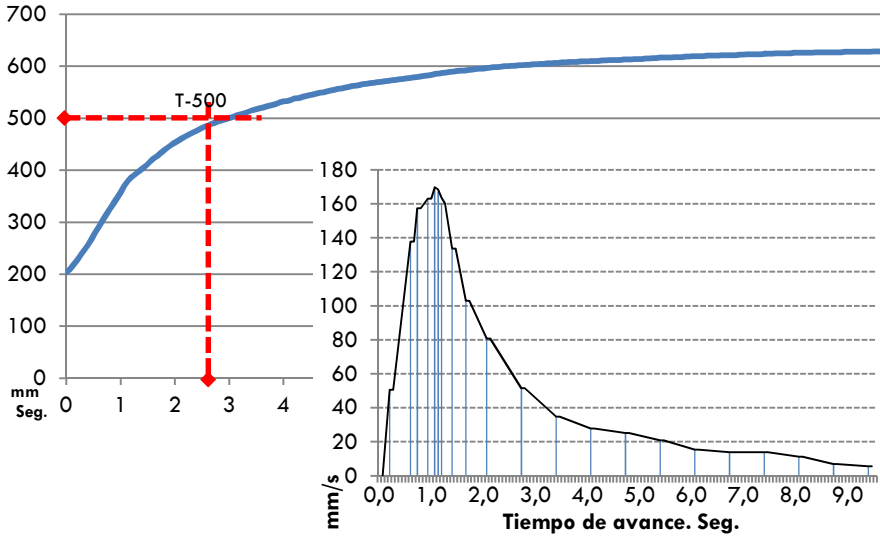


Figura A5.14. Amasada 2 del H-50. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

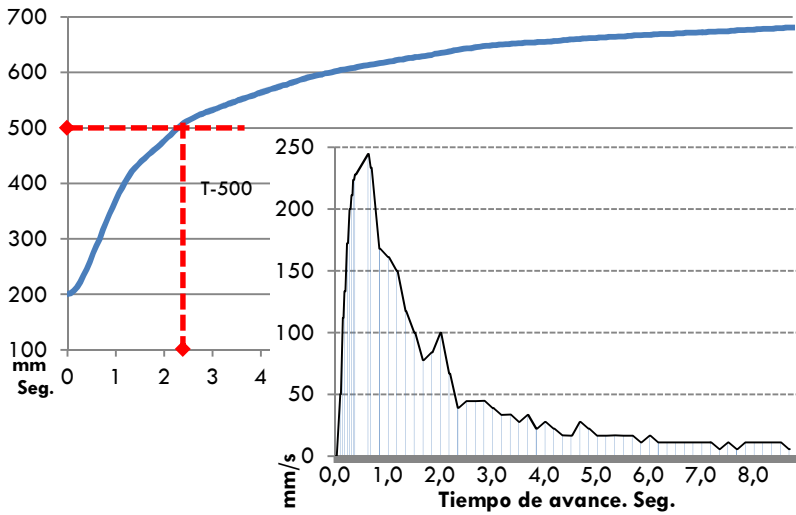


Figura A5.15. Amasada 3 del H-50. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

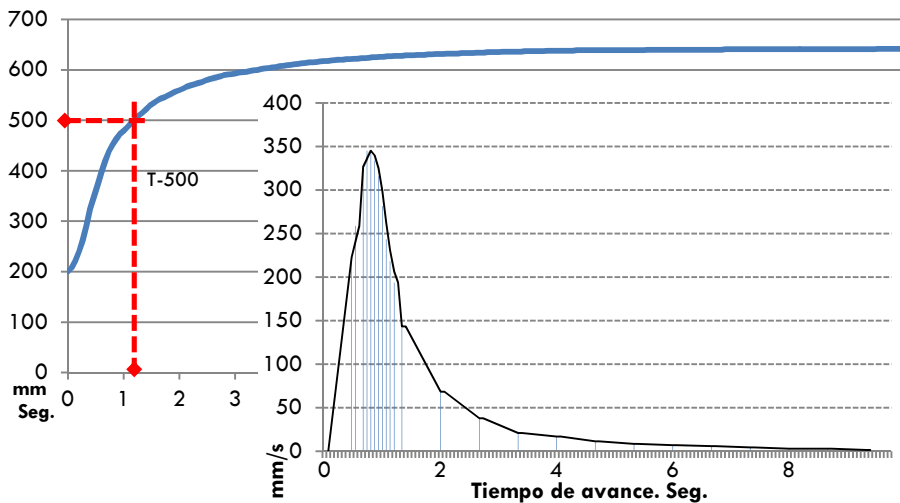


Figura A5.16. Amasada 1 del H-60. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

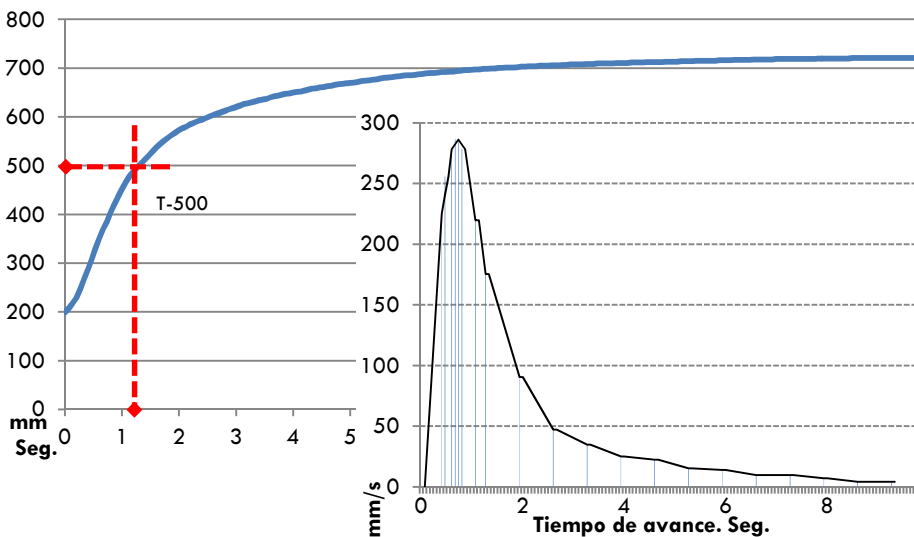


Figura A5.17. Amasada 2 del H-60. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

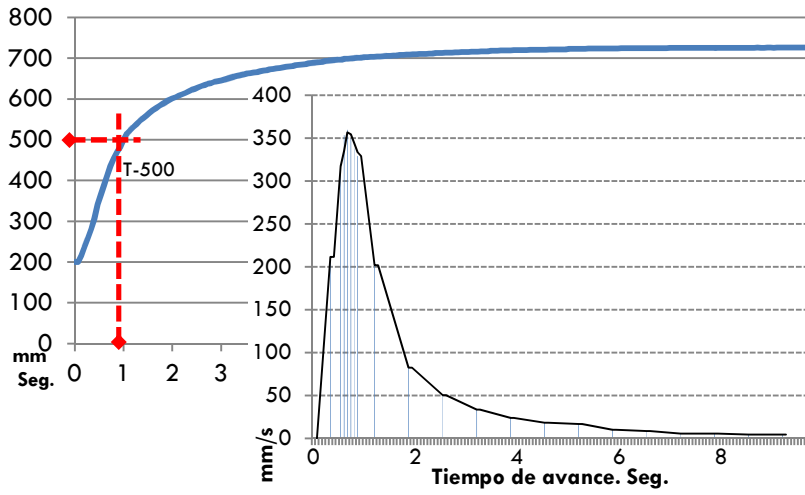


Figura A5.18. Amasada 3 del H-60. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Anexo 6

Digitalización y conversión de la plantilla del CIB N°24 al método ICB

Se ha estudiado con el método desarrollado ICB (apartado 5.5.4.) la plantilla propuestas por CIB N°24 W29. Para ello, sobre dicha plantilla se ha seguido el mismo procedimiento desarrollado y descrito en el apartado 5.5.4 para las probetas. De esta forma se cuantifica la calidad superficial de los hormigones utilizados como referencia por el CIB N°24 W29 (figura A6.1, arriba). Estos son utilizados en su plantilla con una escala de valores del 1 a 7 (de menor a mayor cantidad de daños superficiales).

Dada la singularidad de las plantillas (figura A6.1, arriba), se ha añadido a los desarrollado en el método ICB un daño superficial mayor a $\text{Ø}10\text{mm}^2$. Además, los poros o burbujas de 2mm no se han tenido en cuenta por la dificultad que conlleva realizar la inspección con las plantillas de baja resolución. En la figura A6.1 (arriba) se muestra solapado la plantilla del CIB N°24 W29 y la inspección realizada según el método ICB. En la parte inferior se muestra únicamente las siluetas de las zonas dañadas según lo desarrollado por el método ICB. Se utiliza un

² Para estos desperfectos mayores se ha sacado su contorno real, representado con línea amarilla en la figura A6.1.

código de colores según el diámetro de los poros o daños analizado. En la tabla A6.1 se muestran los valores numéricos obtenidos en la inspección para cada tamaño de desperfecto, así como la superficie dañada resultante, los valores CIB para cada plantilla y sus valores equivalentes obtenidos con el método propuesto ICB.

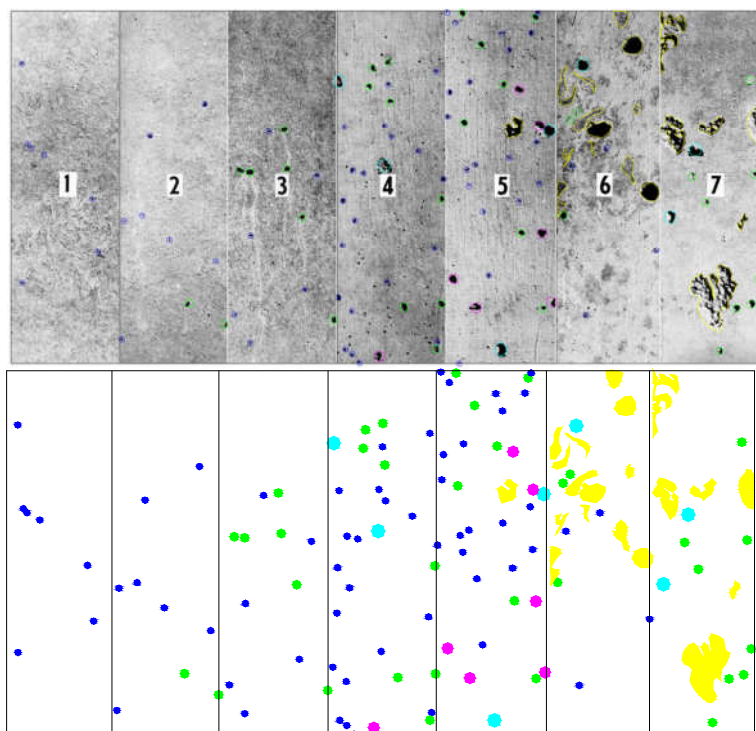


Figura A6.1. Digitalización del patrón del código CIB n° 24 W29

Tabla A6.1. Resultados de digitalización patrón código CIB n° 24

Cod.CIB	Sup.>Ø10mm	N° Ø10mm	N° Ø8mm	N° Ø6mm	N° Ø4mm	Sup.total	ICB
1	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	135,2	0,5%
2	0,0	0,0	0,0	2,0	7,0	222,1	0,8%
3	0,0	0,0	0,0	6,0	6,0	376,6	1,4%
4	0,0	2,0	1,0	8,0	19,0	1033,3	3,8%
5	161,9	2,0	6,0	8,0	19,0	1668,4	6,2%
6	1287,5	1,0	0,0	3,0	4,0	2307,2	8,5%
7	2180,1	2,0	0,0	8,0	0,0	3939,8	14,6%

Con los datos obtenidos (tabla A6.1) se plantea una conversión o equivalencia de los valores catalogados por el CIB n° 24 W29 (de 1 a 7) y los obtenidos con por método ICB sobre las mismas plantillas. Se realiza una correlacionan entre ambas series de datos y se obtiene la expresión $y = 1,6902\ln(x) + 9,9884$ que se ajusta un 98% a los datos utilizados (figura A6.2).

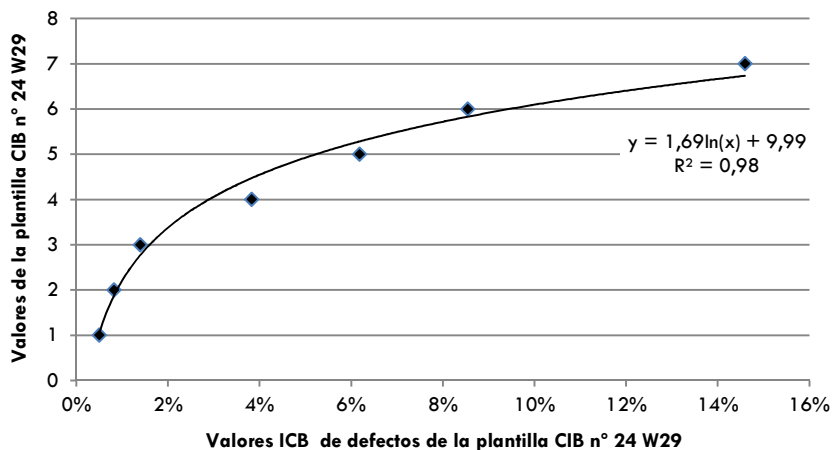


Figura A6.2. Correlacionan de las plantillas del código CIB n° 24 y los valores ICB

La expresión obtenida ($y = 1,6902 \ln(x) + 9,9884$) permite convertir los valores obtenidos por el método ICB a la escala reconocida internacionalmente con valores de 1 a 7. Además, esta expresión permite validar el método propuesto en esta investigación (ICB), tal y como se muestra en el apartado 6.4.4, con 10 probetas de la fase experimental.

Anexo 7

Tablas de resultados.

Compresión y densidades

En este anexo se muestran los valores obtenidos en varios ensayos realizados en los que se mostraron únicamente sus valores medios por dosificación en el capítulo n° 6.

a) Resultados de ensayo de compresión

En la tabla A7.1 se transcriben los valores obtenidos en cada ensayo con dos probetas cilíndricas por dosificación para obtener la resistencia a compresión a 7 días y seis probetas para los 28 días. En la tabla A7.2 se muestra la misma información para las edades de 90 y 365 días, con dos probetas para cada dosificación. Finalmente, en la tabla A7.3 se muestran los valores medios de todas ellas a las diferentes edades.

Tabla A7.1. Resultados del ensayo a compresión a 7 y 28 días

	Amasada	Tensión de Rotura MPa	Tensión de Rotura MPa
		7 días	28 días
H-0	1		40,9
	1		39,9
	1	32,7	
	1	33,3	
	2		38,3
	2		39,2
	3		37,4
	3		39,7
H-10	1		39,9

	1		38,7
	1	30,4	
	1	31,7	
	2		39,5
	2		38,9
	3		37,5
	3		39,0
H-20	1		38,9
	1		38,0
	1	33,9	
	1	34,1	
	2		39,5
	2		38,5
	3		38,3
	3		39,2
H-30	1		39,7
	1		41,3
	2	32,1	
	2	33,4	
	2		37,4
	2		37,9
	3		39,2
	3		39,7
H-40	1		39,2
	1		38,0
	2	30,9	
	2	31,5	
	2		39,3
	2		39,5
	3		37,0
	3		40,3
H-50	1	31,3	
	1	31,4	
	1		38,7
	1		38,4
	2		38,0
	2		38,7
	3		37,8
	3		37,4
H-60	1	29,8	
	1	30,1	
	1		39,6
	1		39,3
	2		37,4
	2		38,6
	3		38,4
	3		38,8

Tabla A7.2. Resultados a 90 y 365 días

	Tensión de rotura a 90 días(Mpa)	Tensión de rotura a 365 días(Mpa)
H-0a	46,8	50,0
H-0b	46,5	49,3
H-10a	46,7	49,1
H-10b	46,3	49,3
H-20a	46,2	50,4
H-20b	47,2	49,1
H-30a	45,9	50,7
H-30b	49,2	50,1
H-40a	46,0	49,9
H-40b	43,9	51,4
H-50a	49,4	51,2
H-50b	48,0	52,4
H-60a	47,8	52,5
H-60b	47,4	52,1

Tabla A7.3. Valores de resistencias a compresión a 7, 28, 90 y 365 días

	Resistencia media a compresión (MPa)			
	7 días	28 días	90 días	365 días
H-0	33,0	39,2	46,7	49,6
H-10	31,0	38,9	46,5	49,2
H-20	34,0	38,7	46,7	49,7
H-30	32,8	39,2	47,5	50,4
H-40	31,2	38,9	45,0	50,7
H-50	31,3	38,2	48,7	51,8
H-60	29,9	38,7	47,6	52,3

b) Dimensiones y densidad de las probetas

En la tabla A7.4 se muestra la altura, diámetro, volumen y densidad de 81 probetas analizadas de las 7 dosificaciones. En la tabla A7.5 se muestra el estudio estadístico realizado sobre la densidad de las 81 probetas y en la figura A7.1 se muestran estos datos en grafica de cajas y bigotes.

Tabla A7.4. Pesada, dimensiones y densidades de las probetas de HAC

	Pesada g	Altura mm	Diámetro mm	Volumen litros	Densidad kg/m ³
H-0	12.133	296	150,0	5,231	2.319,55
H-0	12.047	296	150,0	5,231	2.303,11
H-0	12.234	298	150,0	5,266	2.323,16
H-0	12.238	296	150,0	5,231	2.339,63
H-0	12.137	296	150,0	5,231	2.320,32
H-0	12.119	295	149,5	5,178	2.340,31
H-0	12.290	298	149,5	5,231	2.349,43
H-0	12.120	295	150,0	5,213	2.324,92
H-0	12.403	300	150,0	5,301	2.339,55
H-0	12.230	299	149,5	5,249	2.330,15
H-0	12.122	296	149,0	5,161	2.348,66
H-0	12.132	295	150,0	5,213	2.327,22
H-10	11.959	295	150,0	5,213	2.294,04
H-10	12.188	297	150,0	5,248	2.322,22
H-10	12.134	298	150,0	5,266	2.304,17
H-10	12.123	295	150,0	5,213	2.325,50
H-10	12.167	297	149,5	5,213	2.333,75
H-10	12.162	295	150,0	5,213	2.332,98
H-10	12.142	298	150,0	5,266	2.305,69
H-10	12.188	298	150,0	5,266	2.314,43
H-10	12.237	299	150,0	5,284	2.315,96
H-10	12.166	298	150,0	5,266	2.310,25
H-10	12.237	299	150,0	5,284	2.315,96
H-10	12.165	297	150,0	5,248	2.317,84
H-20	12195	297	149,7	5,227	2.332,88
H-20	12220	298	149,7	5,245	2.329,82
H-20	12.031	295	150,0	5,213	2.307,85
H-20	12.151	297	149,8	5,234	2.321,36
H-20	12.241	298	150,0	5,266	2.324,49
H-20	12.139	297	149,5	5,213	2.328,38
H-20	12169	297	150,0	5,248	2.318,60
H-20	12082	297	150,0	5,248	2.302,02
H-20	12.157	298	149,7	5,245	2.317,80
H-20	11.984	295	149,8	5,199	2.304,98

H-20	12054	295	149,8	5,199	2.318,44
H-20	12062	298	149,8	5,252	2.296,62
H-30	11.997	297	149,7	5,227	2.295,00
H-30	12.102	298	150,0	5,266	2.298,10
H-30	12.055	299	149,5	5,249	2.296,80
H-30	12.134	298	150,0	5,266	2.304,17
H-30	12.160	300	150,0	5,299	2.294,64
H-30	11.954	295	150,0	5,213	2.293,08
H-30	12.094	298	149,7	5,245	2.305,79
H-30	12.144	298	150,0	5,266	2.306,07
H-30	12.105	297	150,0	5,248	2.306,41
H-30	12.076	298	150,0	5,266	2.293,16
H-30	12.167	298	150,0	5,266	2.310,44
H-40	11.933	295	149,7	5,192	2.298,23
H-40	12.052	299	149,8	5,27	2.287,04
H-40	12.079	298	149,5	5,231	2.309,10
H-40	12.049	298	149,2	5,21	2.312,64
H-40	12.101	300	149,5	5,266	2.297,88
H-40	12.065	298	149,7	5,245	2.300,26
H-40	12.027	299	149,0	5,214	2.306,87
H-40	11.938	295	149,5	5,178	2.305,35
H-40	11.892	298	149,5	5,231	2.273,35
H-40	12.011	299	149,5	5,249	2.288,42
H-50	12.108	298	150,0	5,266	2.299,24
H-50	12.146	298	150,2	5,28	2.300,31
H-50	11.984	297	150,0	5,248	2.283,35
H-50	12.047	298	149,5	5,231	2.302,98
H-50	12.004	299	149,7	5,263	2.280,98
H-50	12.035	299	149,5	5,249	2.292,99
H-50	11.994	300	149,2	5,245	2.286,73
H-50	12.014	300	149,1	5,238	2.293,62
H-50	11.854	295	149,5	5,178	2.289,13
H-50	11.905	297	149,0	5,179	2.298,85
H-50	11.967	297	149,2	5,193	2.304,63
H-50	12.210	302	149,7	5,315	2.297,08
H-60	11.956	298	150,0	5,266	2.270,37
H-60	11.993	298	149,7	5,245	2.286,54
H-60	12.002	297	150,0	5,248	2.286,78
H-60	12.140	300	150,0	5,301	2.289,94
H-60	12.073	298	150,0	5,266	2.292,59
H-60	12.061	297	150,0	5,248	2.298,02
H-60	12.147	299	150,0	5,284	2.298,93
H-60	12.085	299	149,5	5,249	2.302,52
H-60	12.136	299	150,0	5,284	2.296,85
H-60	12.123	299	150,0	5,284	2.294,39
H-60	11.997	297	150,0	5,248	2.285,83
H-60	12.150	299	149,8	5,27	2.305,64

Tabla A7.5. Resumen estadístico de densidades de los HAC

HAC	Nº	Promedio kg/m ³	Desviación Estándar	Coefficiente Variación	Min.	Máx.	Rango	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
H-0	12	2330,5	13,55	0,58%	2303,1	2349,4	46,3	-0,52	-0,03
H-10	12	2316,1	11,68	0,50%	2294,0	2333,8	39,7	-0,22	-0,11
H-20	12	2316,9	11,66	0,50%	2296,6	2332,9	36,3	-0,58	-0,68
H-30	11	2300,3	6,32	0,27%	2293,1	2310,4	17,4	0,34	-1,15
H-40	10	2297,9	11,99	0,52%	2273,4	2312,6	39,3	-1,17	0,32
H-50	12	2294,2	7,71	0,34%	2281,0	2304,6	23,7	-0,59	-0,70
H-60	12	2292,4	9,42	0,41%	2270,4	2305,6	35,3	-1,36	1,15
Total	81	2307,2	16,95	0,73%	2270,4	2349,4	79,1	1,63	-0,34

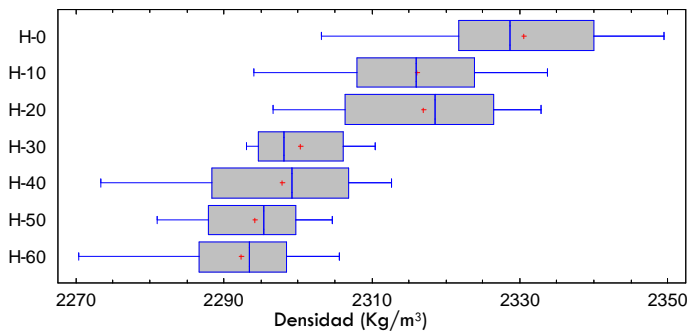


Figura A7.1. Gráfica de cajas y bigotes de densidades de los HAC

Anexo 8

Estudio de la interfaz árido-pasta

8.1. Introducción

Lo reflejado en este anexo es una ampliación de lo mostrado en el apartado 6.2.1 y 6.2.2. Para el estudio de la interfaz árido-pasta se han utilizado técnicas de microscopía electrónica de barrido y de microscopía de fuerza atómica. Los ensayos se realizan a diferentes edades (7, 60 y 120 días).

8.2. Microscopía electrónica de barrido

El análisis realizado es sólo a nivel elemental (EDX), dando información acerca de los átomos que hay en una muestra, pero no de sus posibles combinaciones. El haz de electrones del microscopio electrónico de barrido arranca electrones de los orbitales más cercanos al núcleo de un átomo. Un orbital queda vacío y es ocupado de inmediato por un electrón de una capa superior y esto produce un fotón en el rango de los Rayos X. La energía de cada fotón depende únicamente del tipo de átomo que lo emite, posibilitando identificarlos debido a que deja varios picos de energías e intensidades concretas.

A continuación se muestran una serie de imágenes tomadas por el microscopio electrónico de barrido a diferentes aumentos y todas ellas de la zona interfaz árido-pasta. Se han utilizado 3 áridos diferentes para un mayor y mejor análisis de lo acontecido por el uso de la EGAH. Como se indicó en el capítulo 5, para las muestras realizadas en este ensayo se utilizó granulometrías de árido muy acotado, entre 0,063 y 0,085 μm ., para una mejor identificación de los áridos.

Además, para todas las muestras inspeccionadas, se realizó espectroscopia por dispersión de energía (EDX), permitiendo la realización del microanálisis cualitativo de ellas, con todos los elementos químicos que la componen (análisis mineralógico). Indicar que la presencia de oro (Au) se trata únicamente por la preparación de la muestra, al hacerlas conductoras. En los diferentes espectros se muestra básicamente la presencia de magnesio, calcio, silicio y aluminio, además de potasio, carbono y oxígeno. En algunos espectros aparecen otros elementos con muy poca cantidad como para tenerlos en cuenta como el plomo. El carbono puede provenir de la calcita, dolomita y/o otros compuestos primarios del cemento. El calcio puede provenir de la calcita y de silicatos o aluminatos de calcio. El silicio y aluminio provienen igualmente de varias fuentes (cuarzo, silicatos, alúmina, aluminatos) y de la presencia de la EGAH. El magnesio viene principalmente de la EGAH.

En la figura A8.1 se muestra los resultados de la difracción de rayos X de la EGAH, lo que da una información de los elementos que esta aporta a las mezclas analizadas.

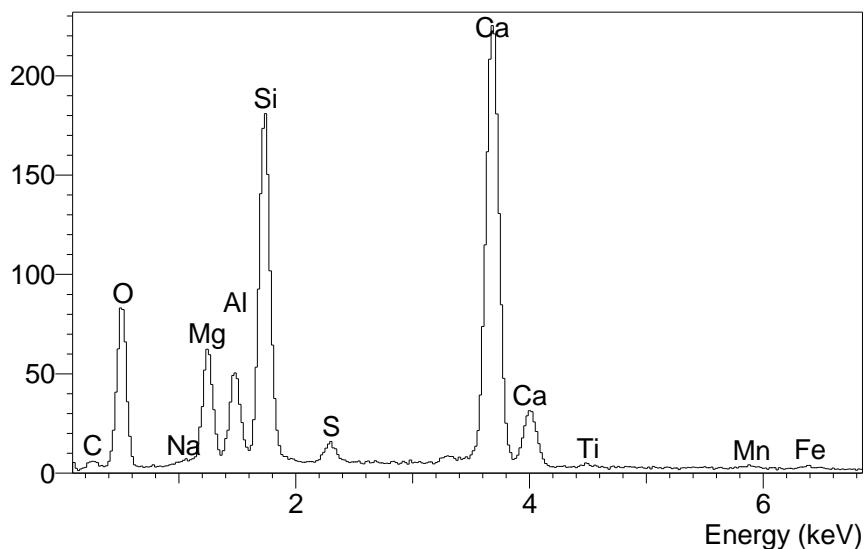


Figura A8.1. Difracción de rayos X de EGAH

A continuación se muestran diferentes análisis obtenidos por la técnica de microscopía electrónica de barrido.

a) Interfaz árido silicio-pasta

En esta primera muestra a 500 aumentos con arena de sílice y a los 7 días (figura A8.2, arriba) se observa como el gel CSH se ha formado junto árido silíceo. En el difractograma (abajo) se muestran los elementos químicos presentes en la muestra. La misma muestra se representa en la figura A8.3 a 1.000 aumentos y a 3.500 en la figura A8.4.

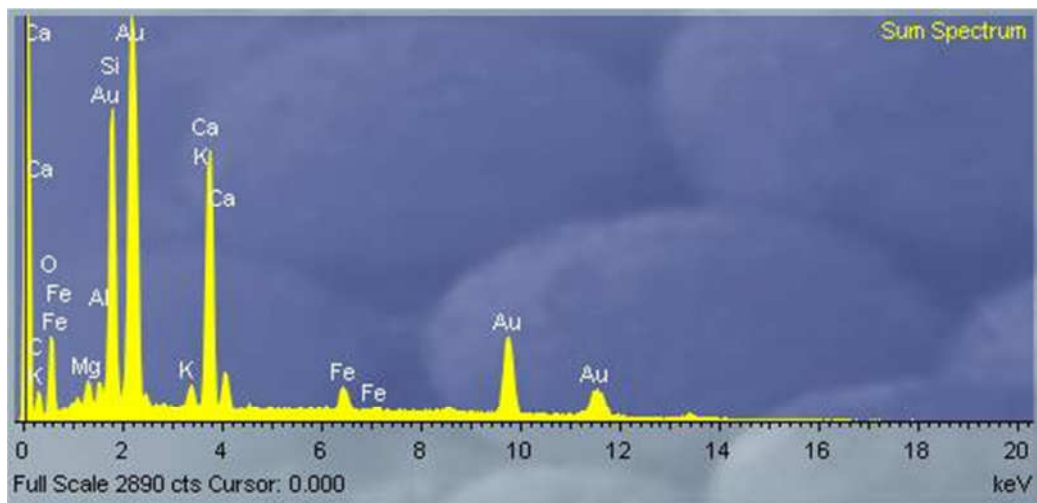
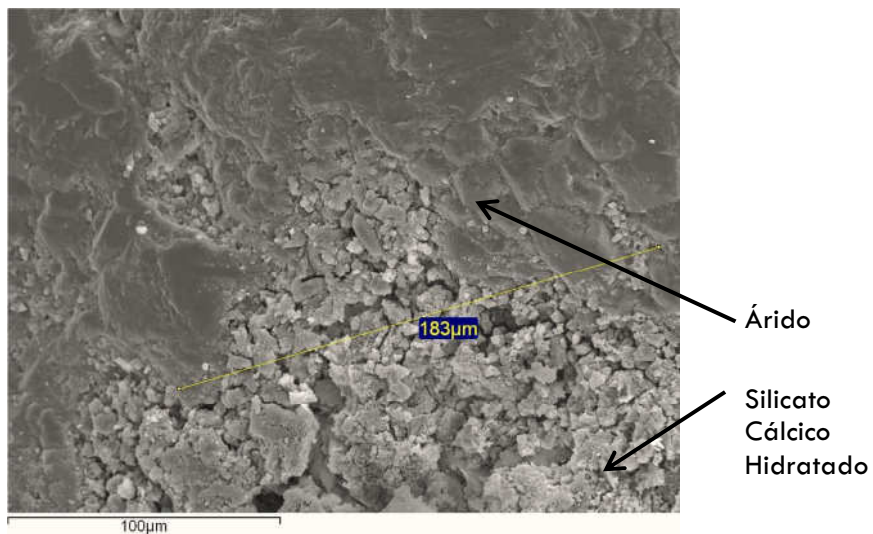


Figura A8.2. Imagen SEM arriba y micro análisis EDX abajo, del mortero con arena de sílice a los 7 días

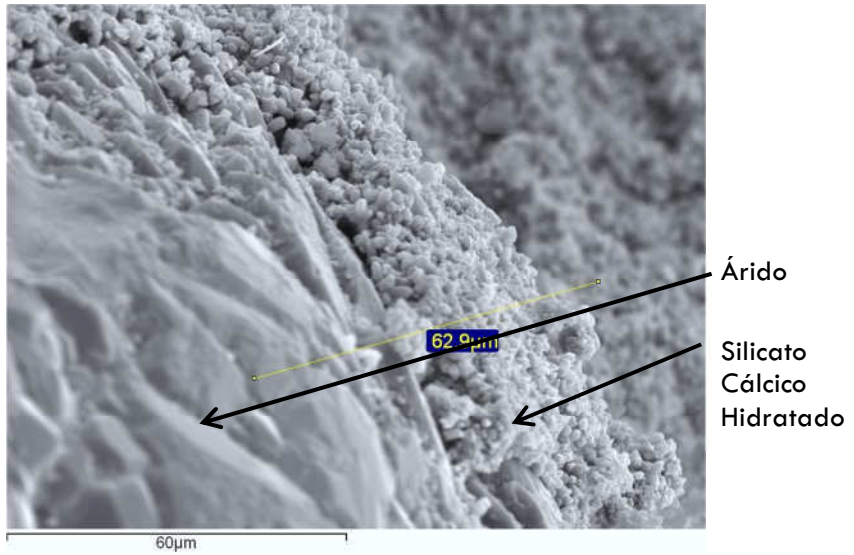


Figura A8.3. Imagen SEM del mortero con arena de sílice a los 7 días y a 1.000 aumentos

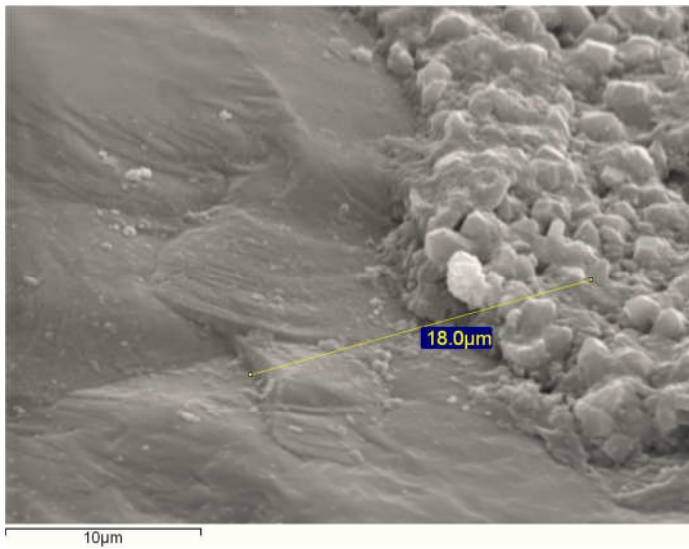


Figura A8.4. Imagen SEM del mortero con arena de sílice a los 7 días a 3.500 aumentos

En la figura A8.5 se muestra la imagen SEM del mortero con arena de sílice a los 60 días a 5.000 aumentos y en la figura A8.6 similar muestra a 20.000 aumentos.

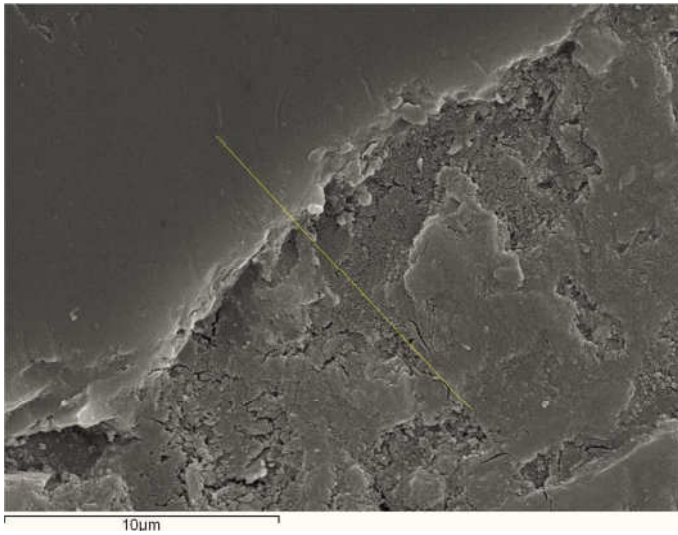


Figura A8.5. Imagen SEM del mortero con arena de sílice a los 60 días a 5.000 aumentos

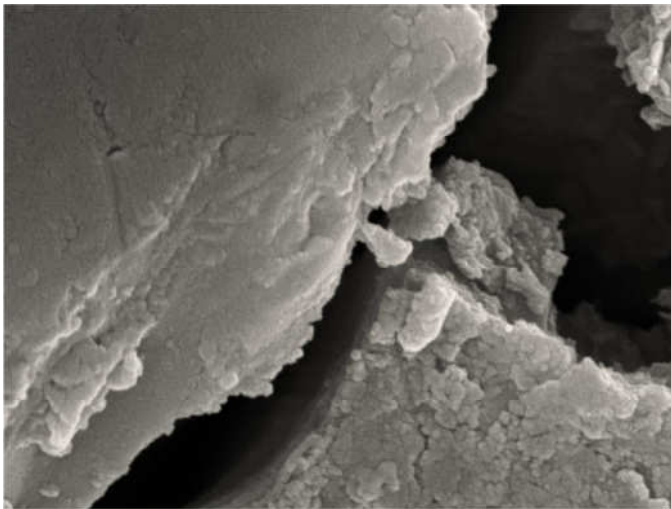


Figura A8.6. Imagen SEM del mortero con arena de sílice a los 60 días a 20.000 aumentos

b) Interfaz árido calizo-pasta

La figura A8.7 muestra una visión global de la muestra a 7 días con árido calizo a 150 aumentos, observándose claramente las formas irregulares de los áridos. La figura A8.8 muestra en detalle un árido calizo a 1.000 aumentos y sobre ella se marca la zona de análisis químico realizado (spectrum1), reflejándose los resultados en el difractograma de la figura A8.9 donde se muestran los elementos químicos presentes en la muestra, destacando la gran cantidad de Ca, atribuible a la composición de los áridos calizos de la muestra.

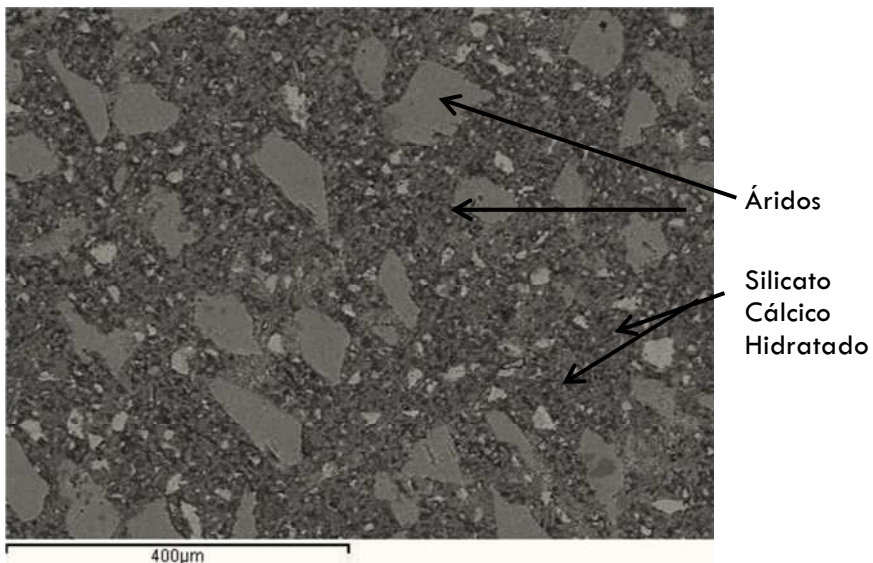


Figura A8.7. Imagen SEM a 150 aumentos del mortero con arena caliza, a los 7 días

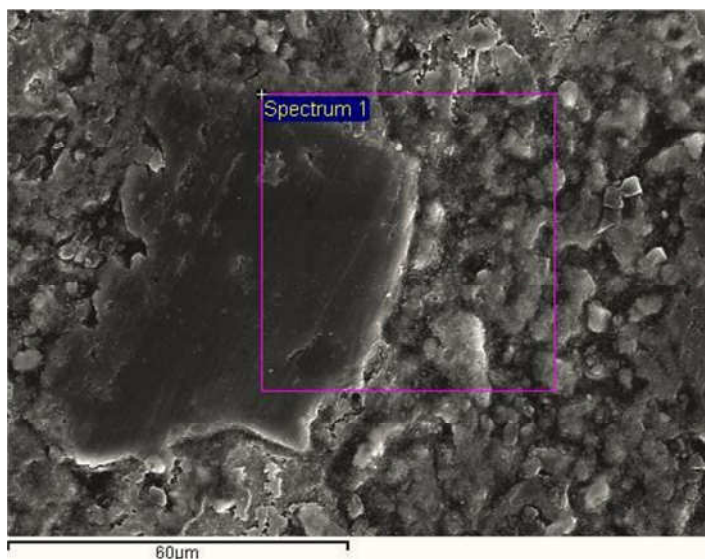


Figura A8.8. Imagen SEM a 1.000 aumentos del mortero con arena caliza, a los 7 días

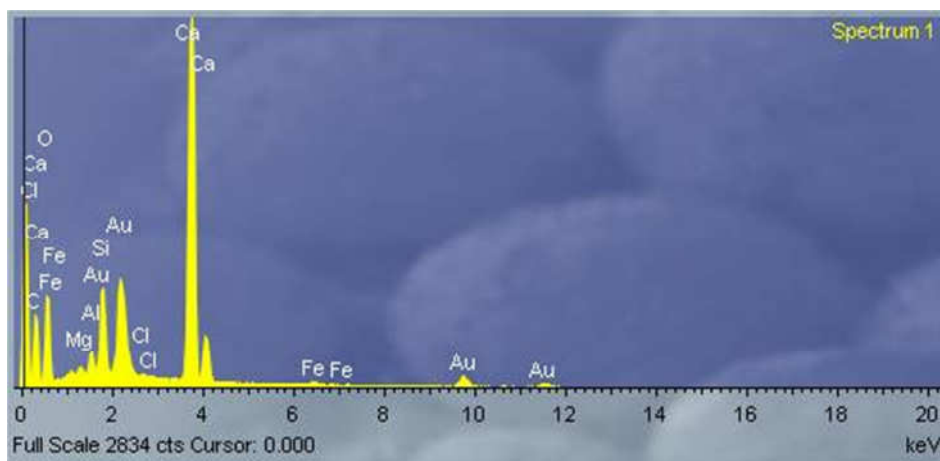


Figura A8.9. Análisis EDX del mortero con arena caliza a los 7 días (zona spectrum 1)

c) Interfaz EGAH-pasta

El análisis de las muestras con EGAH a los 7 días desde su fabricación son las mostradas en la figura A8.10 a 1.000 aumentos. En el difractograma de la figura A8.12, donde se muestran los elementos químicos presentes en la muestra, destacar la existencia de Mg y Al presentes en la EGAH. Esto es confirmado en el mapping de la figura A8.12, donde se puede observar la presencia de Aluminio y Magnesio en la zona del árido. En este caso, a diferencia de lo obtenido a 28 y 120 días (apartado 6.2.1), no se obtienen significativamente estos compuestos en la pasta a los 7 días, por la casi nula participación de la EGAH a esta edad.

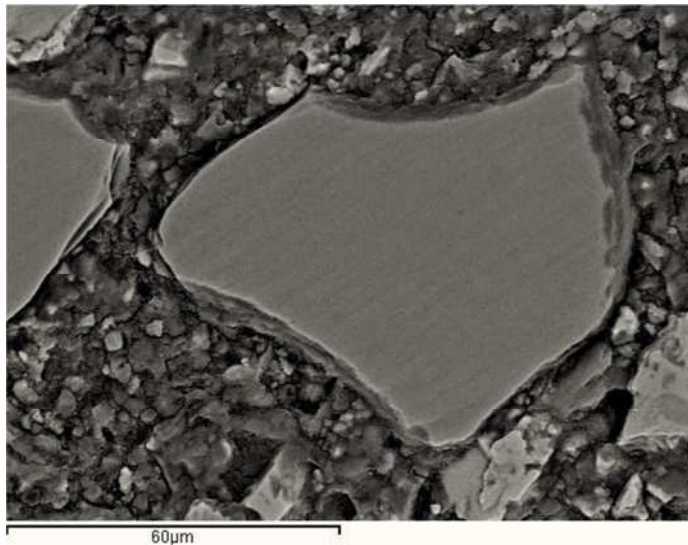


Figura A8.10. Imagen SEM a 1.000 aumentos del mortero con EGAH a los 7 días

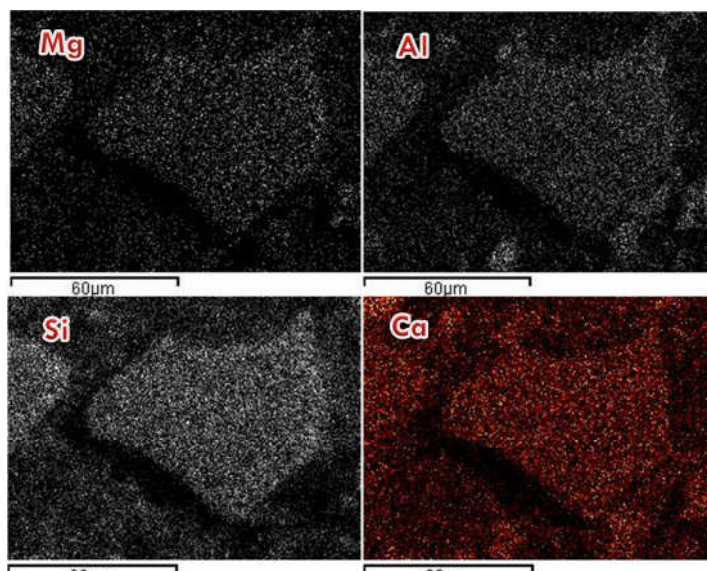


Figura A8.11. Mapping de los principales átomos de la EGAH (Mg, Al, Si y Ca)

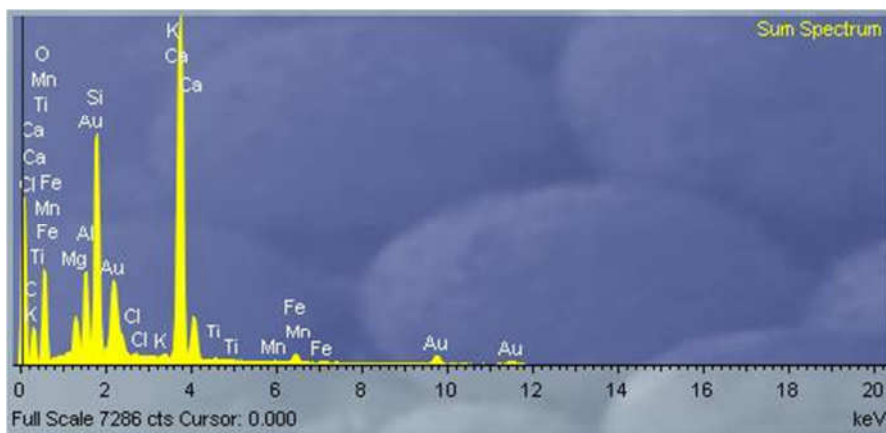


Figura A8.12. Análisis EDX del mortero con arena de EGAH, a los 7 días

8.3. Microscopio de fuerza atómica

En el presente apartado se muestra, junto a los incluidos en el capítulo 6, los resultados del análisis de microscopía de fuerza atómica.

A continuación, se muestran seis de los resultados de los análisis realizados. En las figuras 8.13 y 8.14 se muestran dos inspecciones de mortero con árido calizo a los 7 días. En las figuras 8.15 y 8.16 se exponen los resultados para un mortero similar y a la misma edad pero con áridos de EGAH. Finalmente, en la figura 8.17 y 8.18 se muestran los resultados de los mismos morteros de EGAH, pero a la edad de 60 días.

Cada una de las tres series de figuras indicadas cuentan con una representación en 3 dimensiones de la muestra, a su derecha los resultados de la inspección en planta y en la página siguiente se muestra un estudio topográfico de cada muestras. En este estudio se incluye una imagen de la muestra donde se señalan los 3 perfiles topográficos (en azul, rojo y verde) realizados y mostrados a su derecha (ejes de referencia en μm , tanto el vertical como horizontal). Bajo cada uno de los perfiles se muestra diferentes parámetros geométricos de la inspección topográfica para las secciones señaladas.

a) Mortero con arena caliza a los 7 días

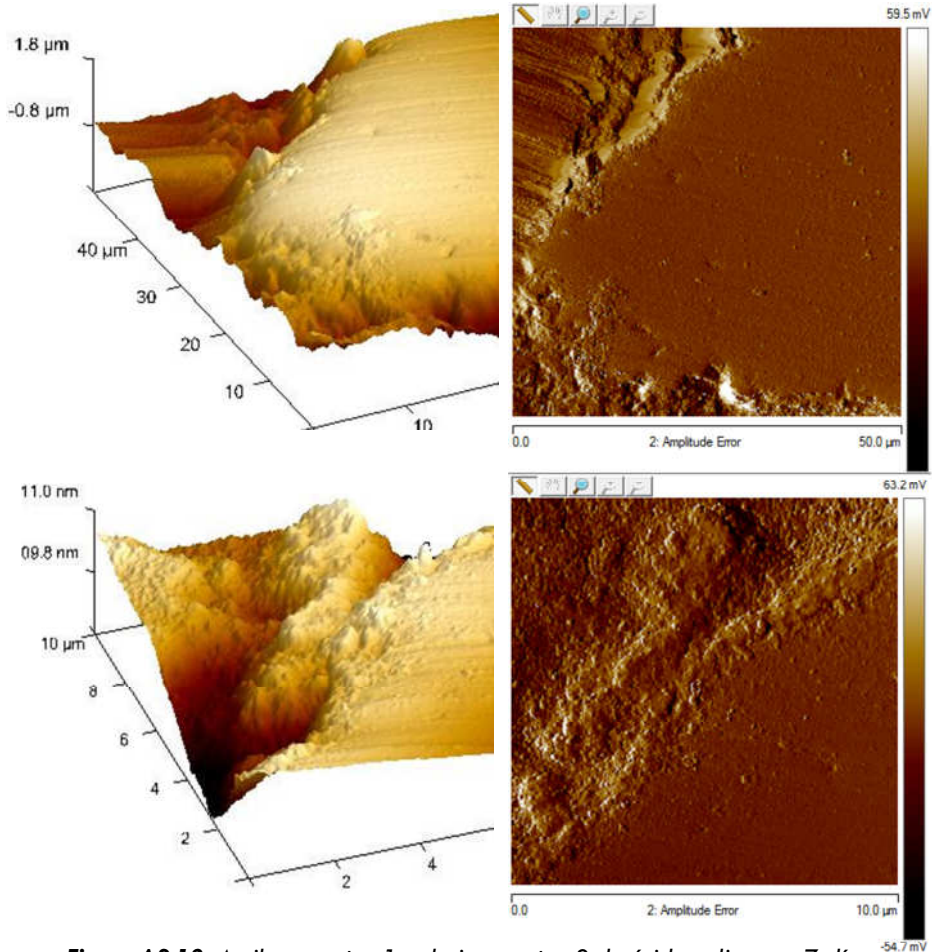


Figura A8.13. Arriba muestra 1 y abajo muestra 2 de árido calizo y a 7 días (Izquierda en 3 dimensiones y a la derecha en planta)

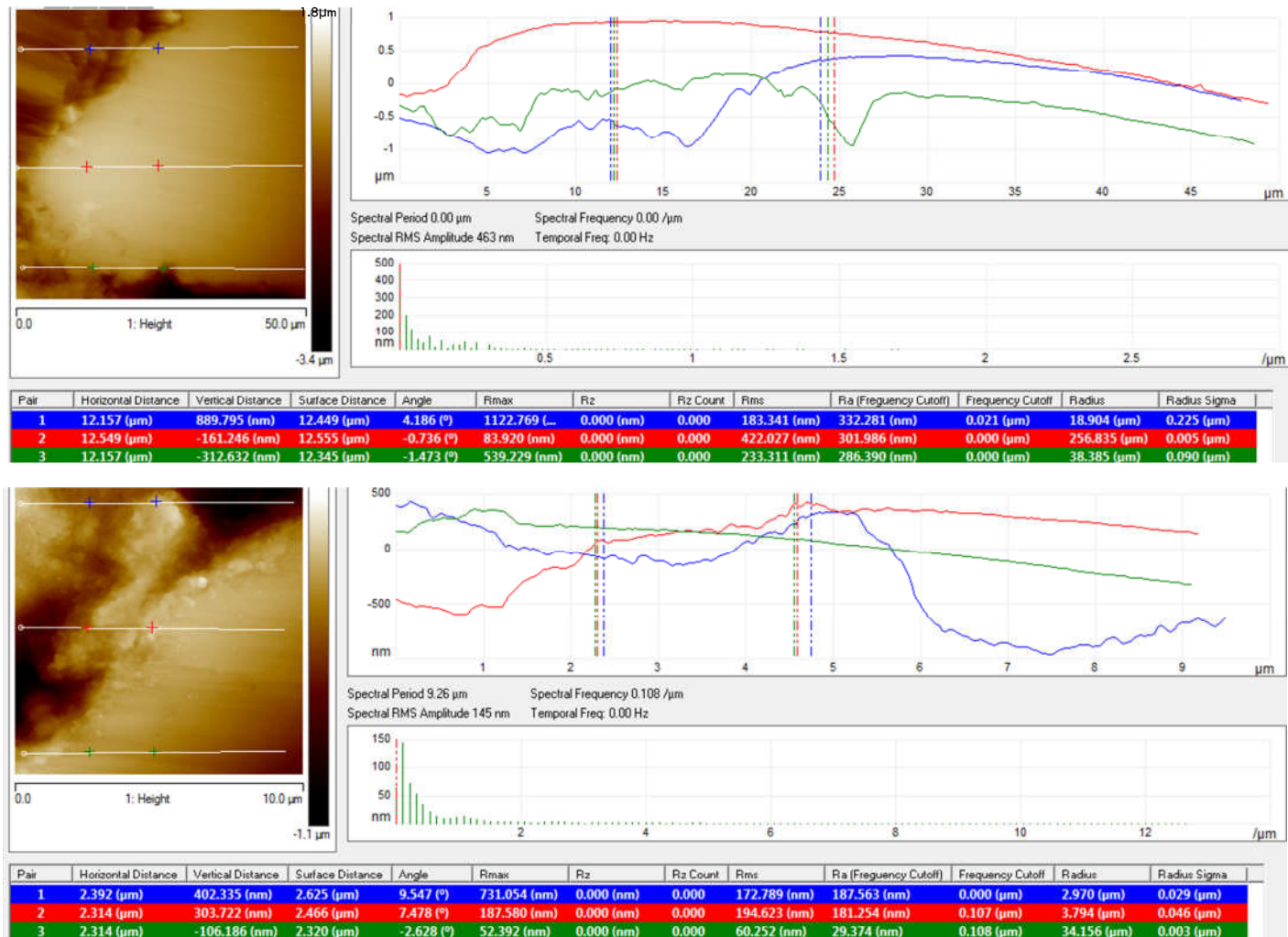


Figura A8.14. Perfiles nanométricos de las muestras analizadas. Arriba muestra 1 y abajo muestra 2 de árido calizo a 7 días

b) Mortero con arena de EGAH a los 7 días

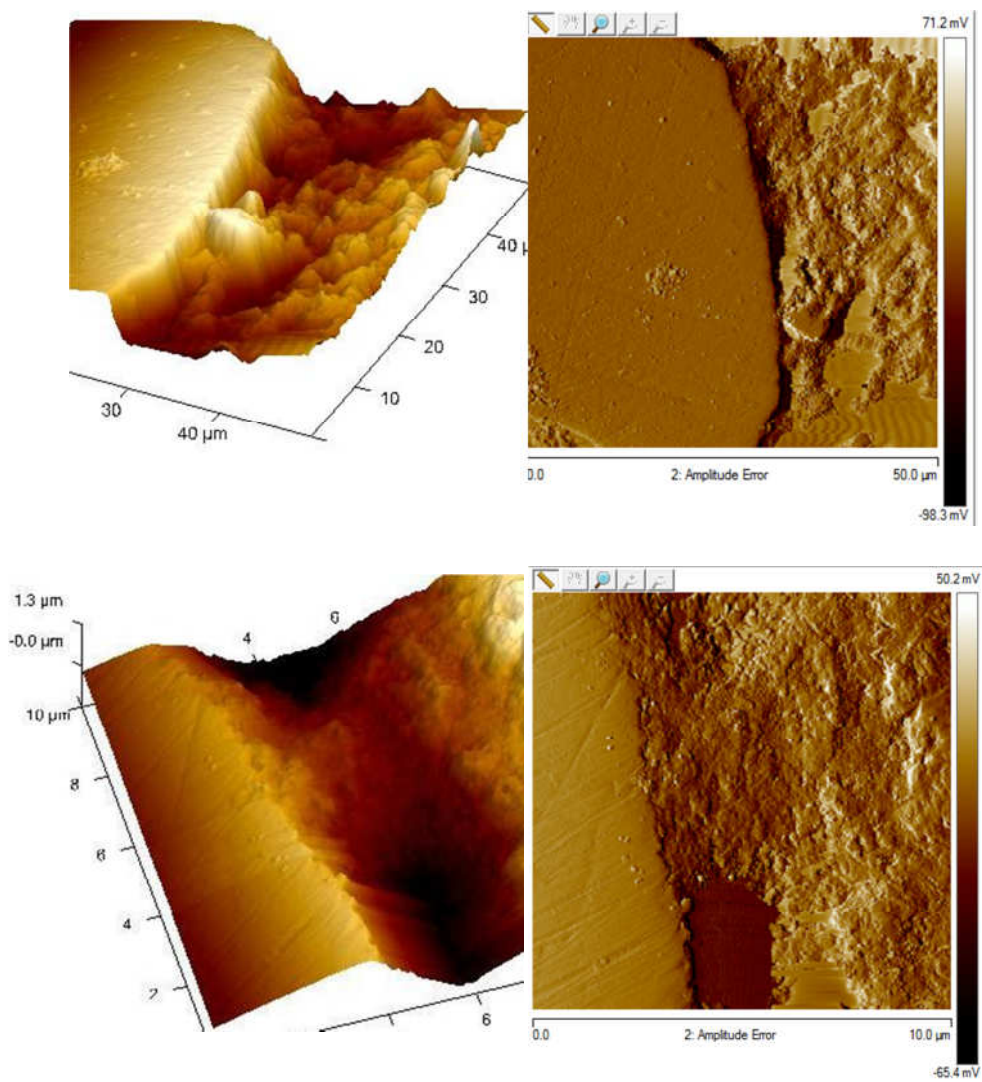


Figura A8.15. Arriba muestra 1 y abajo muestra 2 de árido de EGAH a 7 días (Izquierda en 3 dimensiones y a la derecha en planta)

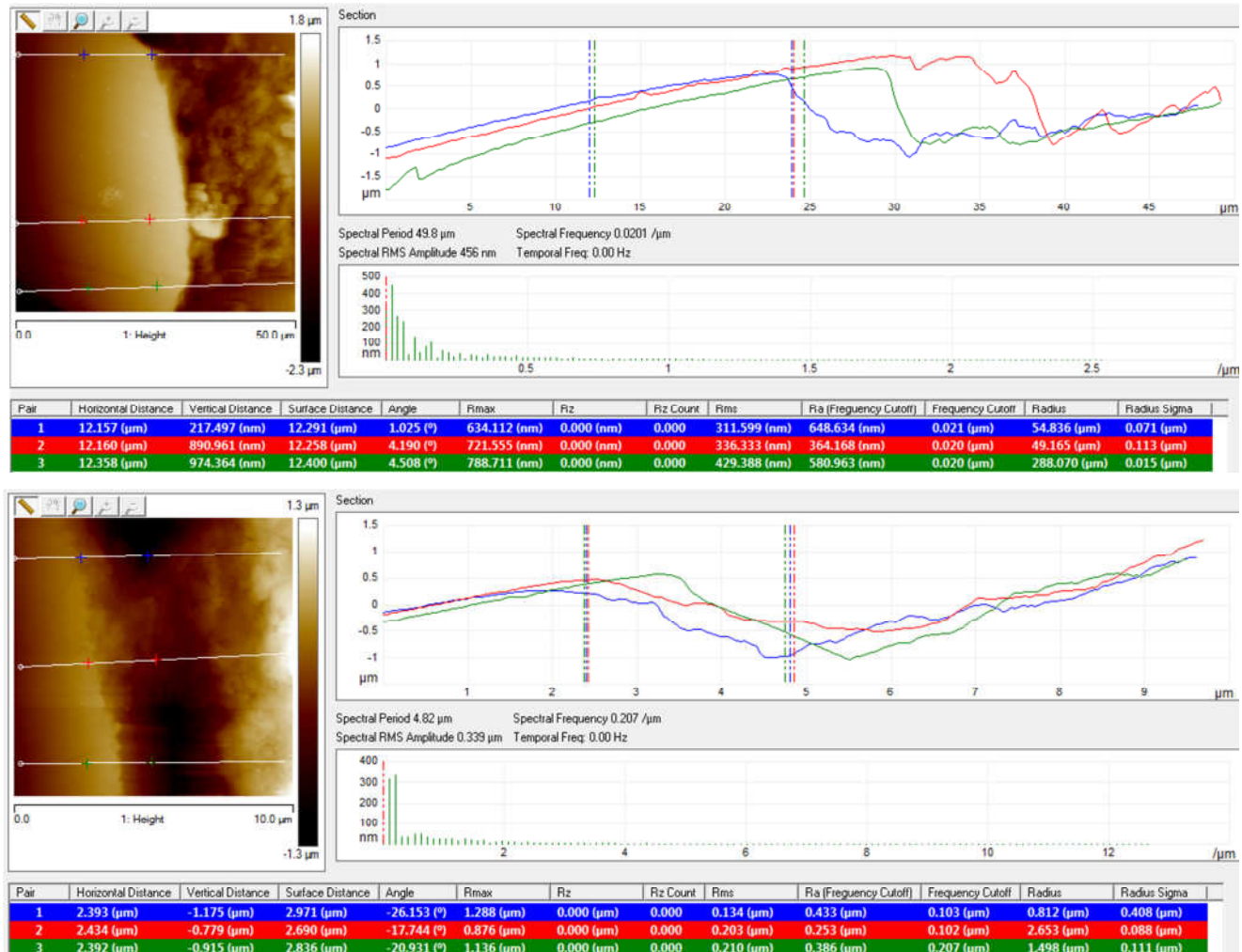


Figura A8.16. Perfiles nanométricos de las muestras analizadas. Arriba muestra 1 y abajo muestra 2 de árido EGAH a 7 días

c) Mortero con arena de EGAH, a los 60 días

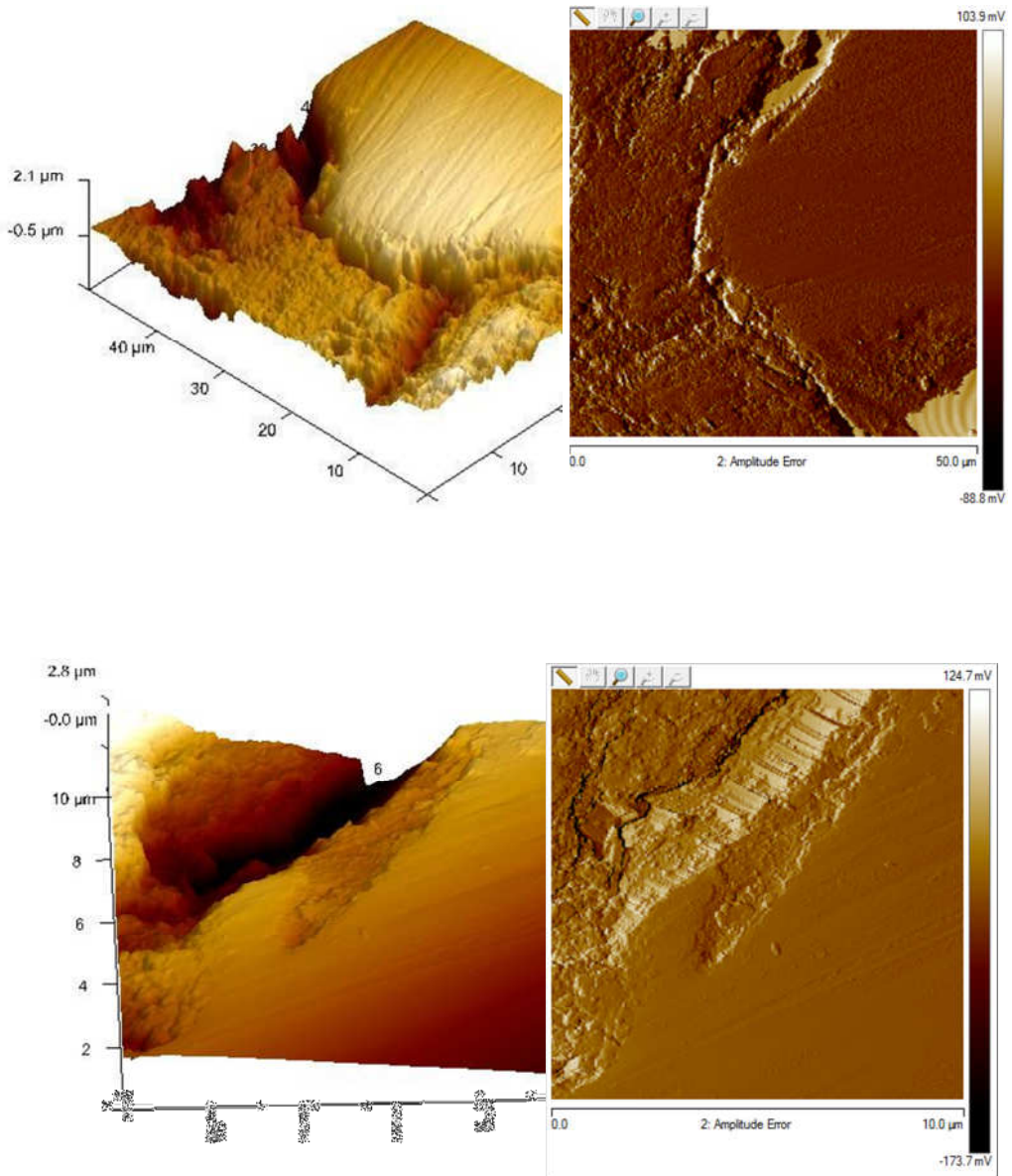


Figura A8.17. Arriba muestra 1 y abajo muestra 2 de árido de EGAH a los 60 días (Izquierda en 3 dimensiones y a la derecha en planta)

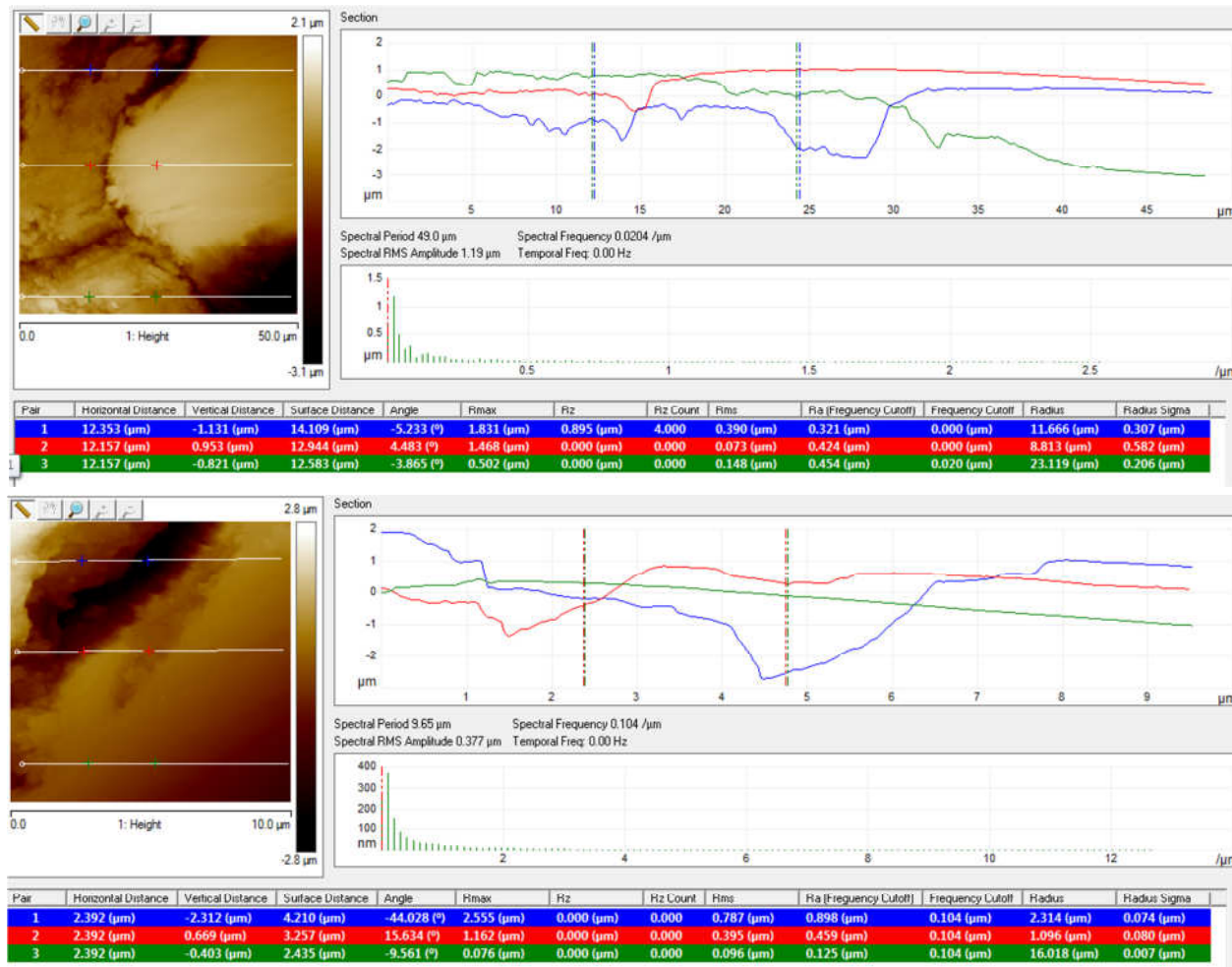


Figura A8.18. Perfiles nanométricos de las muestras analizadas. Arriba muestra 1 y abajo muestra 2 de árido EGHA a 60 días

Índice de figuras y tablas

- Figura 2.1. Hormigonado del arco del viaducto sobre los ríos Anleo y Navia. Izquierda comienzo hormigonado, derecha culminación del arco (Navarro, 2009)
- Figura 2.2. Comparación de proporciones entre HT y HAC (Okamura y Ouchi, 2003)
- Figura 2.3. Evolución de la retracción de un hormigón variado la relación del árido fino sobre la total ($\gamma\Psi$), con HR 50% y según ACI 209R-92
- Figura 2.4. Representación de las fases de distribución, adsorción y orientación de un grano de cemento y un aditivo superplastificante de nueva generación basado en polímeros carboxílicos (Borralleras, 2009)
- Figura 2.5. Evolución del calor de hidratación del cemento Pórtland (Adap. de Puertas, 1989)
- Figura 2.6. Relación entre la HR y la retracción de secado a 28 días según EC-2 y CM-2010 para un hormigón de $f_{cm} = 60$ MPa con diferentes tipos de cemento
- Figura 2.7. Relación entre el espesor de pasta óptimo y la relación volumen de agua/ volumen de finos (Midorikawa, 2001 en Walraven, 2008).
- Figura 2.8. Granulometría discontinua
- Figura 2.9. Granulometría continua
- Figura 2.10. Izquierda, relación entre τ y γ de varios fluidos (Adaptado de Rodrigo, 2011). Derecha, relación entre τ , μ , y γ del HAC (Modelo de Bingham)
- Figura 2.11. Comportamiento tixotrópico y efecto de histéresis de un material
- Figura 2.12. Factores en la autocompactación

- Figura 2.13. Izquierda, ventana de autocompactabilidad (Zegarra y Rodríguez, 2011, en Shah et al., 2007). Derecha, zona del HAC (Wallevik y Nielsson, 2003)
- Figura 2.14. Izquierda, propiedades reológicas por tipos de hormigón. Derecha, efecto de los componentes del HAC sobre la reología de la mezcla (Newman y Choo, 2003)
- Figura 2.15. Tensión de corte para HAC, HT y HAR
- Figura 2.16. Curvas de flujo de hormigones
- Figura 2.17. Comportamiento de los HAC
- Figura 2.18. Izquierda, relación de reología y presión lateral. Derecha, evolución de presión
- Figura 2.19. Mecanismo de bloqueo (Adaptado de Gomes y Barros, 2009)
- Figura 2.20. Generación de esfuerzos debido a desplazamiento relativo entre partículas de áridos gruesos. Mecanismo para la autocompactabilidad (Okamura y Ouchi, 2003)
- Figura 2.21. Esquema del Slump Flow (Parra, 2005)
- Figura 2.22. Izquierda, buen reparto de árido en el avance del fluido. Derecha ensayo de escurrimiento con síntomas de exudación.
- Figura 2.23. Izquierda, indicios de exudación en el llenado del cono. Derecha ensayo de escurrimiento con síntomas de exudación
- Figura 2.24. Ensayo de embudo en V
- Figura 2.25. Ensayo de caja en L
- Figura 2.26. Ensayo de escurrimiento con anillo japonés
- Figura 2.27. Ensayos del HAC en estado fresco, (a) caja en U, (b) tubo en U y (c) orimet, (d) orimet con anillo J. (Dimensiones en mm)
- Figura 2.28. Dispositivo 4C-Rheometer del DCA de la UPV
- Figura 2.29. Izquierda y derecha HAC con VSI = 0 en el ensayo de escurrimiento

Figura 2.30. HAC con VSI = 1 en el ensayo de escurrimiento

Figura 2.31. Izquierda y derecha HAC con VSI = 2 en el ensayo de escurrimiento, apreciando halo de exudación y acumulación de áridos en la parte central

Figura 2.32. Izquierda y derecha HAC con VSI = 3.

Figura 2.33. Sonda de penetración (Adaptado de Shen, et al 2008)

Figura 2.34. Columna para evaluar la segregación de un HAC

Figura 2.35. Ensayo GTM (Bartos, 2005)

Figura 2.36. Relación entre la resistencia a compresión y la relación a/c en HAC y HT (Agranati, 2008)

Figura 2.38. Relación tensión-deformación de la pasta de cemento, mortero, árido y hormigón (Adaptado de Neville, 1995)

Figura 3.1. Izquierda, energía demandada por tonelada de cemento producido (Kwh) con diferentes cantidades de EGAH. A la derecha, las emisiones de CO₂ por tonelada de cemento producido (Adaptado de Ehrenberg y Geiseler, 2000)

Figura 3.2. Escoria granulada arriba, cristalizada abajo (www.cedexmateriales.vsf.es)

Figura 3.3. Representación esquemática de las escorias con estructura cristalina (Adaptado de Magalhães, 2002)

Figura 3.4. Enfriado rápido de la EGAH (Magalhães, 2002)

Figura 3.5. Representación esquemática de las escorias con estructura vítrea (Magalhães, 2002)

Figura 3.6. Imagen ampliada (x20) de EGAH

Figura 3.7. Diagrama SiO₂-Al₂O₃-CaO (Alonso, 2011)

Figura 3.8. Esquema de gelenita y akermanita (Adaptado de Magalhães, 2002)

Figura 3.9. Reactividad de la EGAH (Miñano y Benito, 2012)

- Figura 3.10. Ataque de álcalis en sílice bien cristalizada (arriba) y en sílice amorfa (Adaptado de Dent Glasser et al. (1980), publicado por Segarra, 2005)
- Figura 3.11. Resistencias de las escorias (Castells, 2000)
- Figura 3.12. Izquierda, representación esquemática de la hidratación de la escoria (Puertas 1993). Derecha, evolución de resistencias de cementos con EGAH (Magalhães, 2002)
- Figura 3.13. Distribución de partículas en la pasta cementicia (Mehta y Monteiro, 2008)
- Figura 3.14. Interfaz árido – pasta de cemento (Parra et al., 2013)
- Figura 3.15. Arriba, resultado a compresión. Centro, microestructura del hormigón con 100 % de cemento Portland. Abajo con un 50 % sustituido por EGAH (Escalante y Espinoza, 2008)
- Figura 3.16. Resultados a compresión (Escalante y Espinoza, 2008)
- Figura 3.17. Microestructura del hormigón con 100 % EGAH, con 4% de Na₂O (derecha) y con 8% de Na₂O (izquierda) (Escalante y Espinoza, 2008)
- Figura 3.18. Resistencias de hormigones con EGAH como áridos (Berredi, 2008)
- Figura 3.19. Interfase (Lauber, 2009)
- Figura 4.1. Evolución de la retracción de secado de un hormigón según EHE-08, en función de la resistencia media, f_{cm} , para probeta prismática de 100×100×400 cm, HR 50% y diferentes periodos de secado (t-ts)
- Figura 4.2. Evolución de la retracción de un hormigón variado la cantidad de árido según la expresión 4.2 y el ACI 209R-92
- Figura 4.3. Relación entre la retracción última del hormigón y el módulo elástico de los áridos (Neville, 1970)
- Figura 4.4. Influencia del tipo de árido en la evolución de la retracción de secado (Adaptado de Mehta y Monteiro, 2008)
- Figura 4.5. Relación a/c y el volumen de árido sobre la retracción (Adaptado de Neville 1996 de Newman y Choo, 2003)

- Figura 4.6. Deformaciones en hormigones con árido reciclado en función de la porosidad. (Adaptado de Gómez, 2003)
- Figura 4.7. Evolución de la retracción de un hormigón variado la cantidad de cemento (γ_c), con HR 50% y según ACI 209R-92
- Figura 4.8. Esquema de la retracción del hormigón con la pérdida de humedad
- Figura 4.9. Fluencia y retracción con HR variable y constante (Neville 1970)
- Figura 4.10. Relación entre la retracción del hormigón a 465 días y el contenido de agua, el contenido de cemento y la relación a/c (Neville, 1995)
- Figura 4.11. Influencia en la permeabilidad en función de la relación a/c y el tiempo de curado. (Moron, 2009)
- Figura 4.12. Evolución de la retracción de un hormigón variado la cantidad de aire ocluido (γ_a), con HR 50% y según ACI 209R-92
- Figura 4.13. Distintos tipos de agua en el cemento hidratado (Metha y Monteiro, 2008)
- Figura 4.14. Tipos de retracción e importancia (Adaptado de Gettu, 2000)
- Figura 4.15. Fisura por asentamiento con restricción (por refuerzo y encofrado o moldura)
- Figura 4.16. Retracción plástica elevada en losas de hormigón (Peterson, 2008)
- Figura 4.17. Fisuración por asentamiento en función del tamaño de la barra, del asentamiento del hormigón y del recubrimiento (Dakhil et al., 1975)
- Figura 4.18. Influencia de la parte solida (1-Porosidad) en las resistencias a compresión y permeabilidad de la pasta (Mehta et al., 2006)
- Figura 4.19. Hidratación del C₃A sin yeso. Secuencia y curva calorimétrica
- Figura 4.20. Cinética de las reacciones de hidratación del C₃A con yeso
- Figura 4.21. Micrografías de los productos de hidratación. C₃A en presencia de yeso
- Figura 4.22. Evolución del calor de hidratación del cemento portland

- Figura 4.23. Evolución de los productos de hidratación y consumo del agua interna
- Figura 4.24. Evolución de retracción con respecto a la hidratación del cemento
- Figura 4.25. Esquema de la retracción del hormigón con la pérdida de humedad
- Figura 4.26. Evolución de la retracción de un hormigón variado la relación del árido fino sobre la total (γ_{ψ}) según ACI 209R-92
- Figura 4.27. Evolución de las diferencias entre los modelos del EC-2 y CM-2010 para la retracción autógena y de secado
- Figura 4.28. Evolución de la retracción total, con el paso del tiempo y según EHE-08, ACI-92, EC-2 y CM-2010, para un hormigón de características similares
- Figura 4.29. Evolución de la retracción total según la EHE-08, ACI-92, EC-2 y CM-2010, para diferentes HR
- Figura 4.30. Evolución de la proporcionalidad entre EHE-08, ACI-92, EC-2 y CM-2010 (2 a 2), para la retracción total a diferentes edades
- Figura 5.1. Micrografías de unas muestras de escoria granulada de alto horno
- Figura 5.2. Resultados de microscopía electrónica de barrido de la EGAH
- Figura 5.3. Resultados de microscopía electrónica de barrido de la ceniza volante
- Figura 5.4. Difractograma de Rayos X de la EGAH
- Figura 5.5. Granulometría seleccionada de escoria y arena fina para morteros
- Figura 5.6. Material seleccionado entre 1 y 2 mm. Izq. árido calizo, derecha EGAH
- Figura 5.7. Diferentes probetas para módulo de deformación de los áridos
- Figura 5.8. Relación tensión-deformación en el hormigón según EHE-08 (Parra et al., 2013)
- Figura 5.9. Diferentes probetas para módulo de deformación de los áridos

- Figura 5.10. Montaje de sensor de deformación, para ensayo en probetas cúbicas
- Figura 5.11. Muestras embutidas en resinas y metalizadas con oro para su análisis
- Figura 5.12. Equipo de microscopia electrónica de barrido (Servicio de microscopia electrónica de la UPV)
- Figura 5.13. Izquierda granulometría utilizada. Derecha escoria y arena fina tamizada
- Figura 5.14. Morteros con áridos de escoria, caliza y silíceo.
- Figura 5.15. Izquierda, fabricación de los 3 morteros. Derecha, envasado de los mismos
- Figura 5.16. Detalle y esquema de la sonda de rastreo del microscopio de fuerza atómica
- Figura 5.17. Izquierda y derecha esquema de funcionamiento del QNM.
<http://blog.brukerafmprobes.com>
- Figura 5.18. Granulometría seleccionada izquierda. Derecha escoria retenida en $0,063\mu\text{m}$
- Figura 5.19. Arriba, pesada de los 3 áridos silíceos. Abajo, totalidad de elementos
- Figura 5.20. Histograma de dosificación de los morteros realizados
- Figura 5.21. Amasado del mortero y relleno del molde por tongadas
- Figura 5.22. Arriba muestras a estudiar arriba (izquierda EGAH y derecha arena caliza), abajo dispositivo para coeficiente de Micro-Deval
- Figura 5.23. Equipamiento para la determinación del coeficiente de Micro-Deval. Material abrasivo a la izquierda, derecha llenado de agua con los áridos
- Figura 5.24. Tambor del dispositivo y retirada de la muestra tras 1.500 vueltas
- Figura 5.25. Escoria granulada durante la realización del ensayo de absorción
- Figura 5.26. Dispositivo de cuarteo

- Figura 5.27. Determinación de la densidad de las escorias
- Figura 5.28. Tamices y dispositivo
- Figura 5.29. Curvas granulométricas de todos los áridos
- Figura 5.30. Granulometría de los finos de la arena caliza y del filler calizo adicionado
- Figura 5.31. Cantidad de finos calizos (de las arenas y adicionados) por m³ de cada HAC
- Figura 5.32. Ejemplo de curva teórica Bolomey
- Figura 5.33. Secuencia de imágenes con diferentes pasos del ensayo de escurrimiento. Preparación del cono(a). Llenado del cono (b). Izado del cono y avance del hormigón (c y d). Se concluye con la medida del diámetro final al detenerse el HAC (e)
- Figura 5.34. Vista frontal y latera del dispositivo reométrico 4C-Rheometer
- Figura 5.35. Comportamiento de HAC según D.T. Institute (2010) a la izquierda. Según Nielsson y Wallevik, (2003) y Zerbino et al.(2006) a la derecha
- Figura 5.36 (a, b, c, d, e y f). Proceso automatizado del ensayo de escurrimiento
- Figura 5.37. Ensayo de escurrimiento del H-0-2
- Figura 5.38. Ensayo de escurrimiento del H-0-3
- Figura 5.39. Diferentes grados de calidad en el acabado superficial de los HAC
- Figura 5.40. Esquema de inspección
- Figura 5.41. Procedimiento de inspección de daños superficiales por poros
- Figura 5.42. Izquierda, propuesta de plantilla. Derecha, \varnothing interior a taladrar
- Figura 5.43. Replanteo sobre la probeta
- Figura 5.44. Esquema de reproducción plana de desperfectos en probeta
- Figura 5.45. Dispositivos y detalle de las agujas

Figura 5.46. Probeta sin refrentar a la izquierda y refrentada a la derecha (Apuntes de materiales de construcción II. UPV)

Figura 5.47. Dispositivo de refrentado a la izq. Cara refrentada a la derecha

Figura 5.48. Izquierda dispositivo de ensayos mecánicos, derecha rotura de probeta

Figura 5.49. Dispositivo de ensayos para probetas cilíndricas. (1) Pieza de acero de carga. (2) Bandas de apoyo. UNE-EN 12390-6

Figura 5.50. Izq. dispositivo del ensayo. Derecha, rotura de probetas

Figura 5.51. Dispositivo de carga de probetas (dos puntos de carga).(1)Rodillo de carga. (2)Rodillo soporte. (3)Rodillo soporte. UNE EN 12390-5

Figura 5.52. Izquierda y derecha, prensa con dispositivo metálico del ensayo.

Figura 5.53. Dispositivo de medida

Figura 5.54. Representación esquemática del ángulo de contacto de los líquidos

Figura 5.55. Porosímetro Autopore IV

Figura 5.56. Arriba preparado de probetas, abajo corte de las mismas

Figura 5.57. Procedimiento (León N. 2012)

Figura 5.58. Extracción de los cilindros de HAC, del interior de las probetas

Figura 5.59. Izquierda, cámara climática modelo CTS. Derecha, balanza de pesaje.

Figura 5.60. Izquierda, instalación en cámara climática. Derecha, termómetro digital

Figura 5.61. Derecha, montaje de las probetas con los sensores, unidad central y de amplificación. Izquierda, detalle de la unidad de control modelo midi LOGGR GL220 de la marca GRAPHTEC

Figura 5.62. (a, b, c, d y e). Preparación de probetas para retracción

Figura 5.63. Gráfica de temperatura y humedad con el paso del tiempo de la cámara climática

- Figura 6.1. Distribución dimensional de los poros de las muestras de HAC
- Figura 6.2. Distribución dimensional acumulativa de los poros de las muestras de HAC
- Figura 6.3. Gráfica de cajas y bigotes de densidades de los HAC
- Figura 6.4. Relación entre densidad aparente obtenida en ensayos de porosimetría y densidad calculada en los HAC previos a la realización de ensayos a compresión
- Figura 6.5. Porosidad acumulada de los diferentes HAC, por diámetros de poro
- Figura 6.6. Volumen de poros $<0,01 \mu\text{m}$ de los diferentes HAC
- Figura 6.7. Izquierda y derecha, imagen SEM de la interfaz de un árido silicio a 1.000 y 3.500 aumentos respectivamente
- Figura 6.8. Difractograma con los elementos químicos que componen las muestra analizada
- Figura 6.9. Imagen SEM a 1.000 aumentos de árido calizo y EGAH (izquierda y derecha respectivamente)
- Figura 6.10. Difractograma con los elementos químicos que compone la muestra con EGAH
- Figura 6.11. Arriba y abajo, imagen SEM de la interfaz de un árido de EGAH a 1.300 aumentos y su análisis comparativo de la composición elemental de Ca, Mg, Al y Si
- Figura 6.12. Arriba, imagen SEM a 1.300 aumentos del mortero con EGAH a los 28 días. Abajo, mapping de los principales átomos de la EGAH (Mg, Al, Si y Ca)
- Figura 6.13. Arriba, imagen SEM a 5.000 aumentos del mortero con EGAH a los 28 días. Abajo, mapping de los principales átomos de la EGAH (Mg, Al, Si y Ca)
- Figura 6.14. Arriba y abajo, imagen SEM de la interfaz de un árido de EGAH a 120 días a 1.300 aumentos y su análisis comparativo de la composición elemental de Ca, Mg, Al y Si
- Figura 6.15. Arriba imagen SEM con 1.300 aumentos del mortero con EGAH a los 120 días. Abajo, mapping de los principales átomos de la EGAH (Mg, Al, Si y Ca)

Figura 6.16. Arriba y abajo, imagen SEM de la interfaz de un árido de sílice a 120 días a 1.300 aumentos, su análisis comparativo de la composición elemental de Ca, Mg, Al y Si y mapping con los elementos de Ca y Si

Figura 6.17. Vistas del microscopio de fuerza atómica y de una de las muestras utilizadas

Figura 6.18. Arriba y abajo, resultados medios del módulo de deformación

Figura 6.19. Arriba, muestra de árido calizo (izquierda en 3 dimensiones y a la derecha en planta). Abajo, de igual forma se muestra con EGAH como árido

Figura 6.20. Perfiles nanométricos de las muestras analizadas. Arriba, la muestra de árido calizo y abajo la EGAH

Figura 6.21. Rotura de probetas de mortero

Figura 6.22. Gráfica evolución de resistencias a compresión

Figura 6.23. Interface del 4C-Rheometer

Figura 6.24. Avance del HAC con el paso del tiempo en el ensayo de escurrimiento a la izquierda y velocidad de avance del HAC con el paso del tiempo a la derecha

Figura 6.25. Momento que el cono queda vacío y se frena el fluido

Figura 6.26. Comportamiento de HAC con EGAH según D.T. Institute (2010), Nielsson y Wallevik, (2003) y Zerbino et al.(2006)

Figura 6.27. Propuesta de ampliación sobre la zona idónea de Zerbino et al. (2006)

Figura 6.28. Correlación entre ϕ y velocidad máxima de avance de los HAC

Figura 6.29. Cajas y Bigotes de los 97 valores ICB agrupados por amasado

Figura 6.30. Datos reológicos de las 21 amasadas analizadas

Figura 6.31. Comportamiento de la amasada n° 6, H-40, según el D.T. Institute (2010)

Figura 6.32. Cajas y Bigotes de los 97 ICB agrupados por % de EGAH

- Figura 6.33. Cajas y Bigotes de los 97 valores ICB agrupados por Viscosidad (Pa.s)
- Figura 6.34. Cajas y Bigotes de los 97 valores ICB, por Tensión de corte (Pa)
- Figura 6.35. Relación entre Viscosidad y valores ICB de cada amasada
- Figura 6.36. Relación entre T500 y valores ICB de cada amasada
- Figura 6.37. Digitalización del patrón del código CIB n° 24 W29
- Figura 6.38. Izquierda H-0-1 con CIB=2,52%. Derecha H-0-1b con CIB=3,29%
- Figura 6.39. Izquierda H-10-3h con CIB=2,92%. Derecha H-10-3g con CIB=4,19%
- Figura 6.40. Izquierda H-20-1a con CIB=3,35%. Derecha H-20-3e con CIB=4,85%
- Figura 6.41. Izquierda H-30-1a con CIB=3,80%. Derecha H-30-3d con CIB=4,00%
- Figura 6.42. Izquierda H-40-2h con CIB=4,31%. Derecha H-50-2g con CIB=4,45%
- Figura 6.43. Izquierda H-60-2a con CIB=2,65%. Derecha H-60-3d con CIB=4,11%
- Figura 6.44. Histogramas de resistencias a compresión con dispersiones de resultados
- Figura 6.45. Gráfica de cajas y bigotes de resultados a compresión a 7 días
- Figura 6.46. Gráfica de cajas y bigotes de los resultados a compresión a 28 días
- Figura 6.47. Gráfica de cajas y bigotes de resultados a compresión a 90 días
- Figura 6.48. Gráfica de cajas y bigotes de los resultados a compresión a 365 días
- Figura 6.49. Relación entre % de EGAH y resistencia a compresión a 365 días
- Figura 6.50. Evolución de la resistencia a compresión a los 7, 28, 90 y 365 días

Figura 6.51. Evolución de la resistencia a compresión en función del contenido de EGAH

Figura 6.52. Ratios de la resistencia a compresión a los 7, 28, 90 y 365 días

Figura 6.53. Gráfica de cajas y bigotes de resultados a tracción indirecta a 28 días

Figura 6.54. Gráfica de cajas y bigotes de resultados a tracción indirecta a 90 días

Figura 6.55. Histograma de resistencias a tracción indirecta a 28 y 90 días

Figura 6.56. Gráfica de cajas y bigotes de resultados a flexotracción a 28 días

Figura 6.57. Gráfica de cajas y bigotes de los resultados a flexotracción a 90 días

Figura 6.58. Histogramas de las resistencias a flexotracción a 28 y 90 días

Figura 6.59. Resultados comparativos entre la diferentes normativas a 28 días

Figura 6.60. Resultados comparativos entre la diferentes normativas a 90 días

Figura 6.61. Resultados medios del módulo de deformación de los morteros

Figura 6.62. Gráfica de cajas y bigotes de los resultados del módulo de deformación

Figura 6.63. Relación entre densidad (Kg/m³) y módulo de deformación (MPa)

Figura 6.64. Relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión

Figura 6.65. Resultados comparativos entre las diferentes normativas

Figura 6.66. Izquierda, dispositivos realizando ensayo. Derecha, vista de las 7 muestras en la cámara de curado, en iguales condiciones de curado que las probetas utilizadas

Figura 6.67. Evolución de la resistencia a la penetración. Determinación del inicio y final de fraguado para cada HAC

Figura 6.68. Probetas a controlar su pérdida de peso en el interior de la cámara climática

- Figura 6.69. Evolución de pérdida de peso en probetas prismáticas para cada dosificación
- Figura 6.70. Vistas de probetas con sondas térmicas instaladas
- Figura 6.71. Evolución de la temperatura de fraguado (°C) para cada dosificación
- Figura 6.72. Izquierda, probeta desmoldada tras acabar el fraguado. Derecha, instalación en el dispositivo de control digital midi LOGGR GL220 (μm)
- Figura 6.73. Evolución de la retracción a edad temprana
- Figura 6.74. Evolución de la relación entre la retracción autógena y la total
- Figura 6.75. Evolución del desfase entre la retracción autógena y la retracción total
- Figura 6.76. Evolución de las retracciones autógenas para cada dosificación
- Figura 6.77. Evolución de la relación: Retracción de secado/Pérdida de peso
- Figura 6.78. Evolución de las retracciones de secado para cada dosificación
- Figura 6.79. Evolución de las retracciones totales para cada dosificación
- Figura 6.80. Evolución de la retracción autógenas reales y teóricas según diferentes códigos
- Figura 6.81. Evolución de las retracciones de secado reales y teóricas según diferentes códigos
- Figura 6.82. Evolución de las retracciones totales reales y teóricas según diferentes códigos (CM-2010, EC-2, EHE-08 y ACI-98)
- Figura 6.83. Evolución de la retracción total del H-0 y H-60 y las propuestas por CM-2010 y EC-2 con la retracción autógena real
- Figura 6.37. Interface del 4C-Rheometer
- Figura A1.1. Tamices y dispositivo
- Figura A1.2. Escorias granuladas en recipiente a la izq. A la derecha vista ampliada

Figura A1.3. Curva granulométrica de la EGAH

Figura A1.4. Izquierda, tamiz de 1mm. Derecha, árido por diámetros

Figura A1.5. Curva granulométrica de la arena fina

Figura A1.6. Granulometría de la arena gruesa

Figura A1.7. Arena gruesa separa tras tamizarla

Figura A1.8. Granulométrica de la grava

Figura A1.9. Muestra de grava en los diferentes tamices

Figura A2.1. Amasadora de 20 litros a la izq. y de 60l a la derecha

Figura A2.2. Amasadora de morteros (izquierda y derecha)

Figura A2.3. Izquierda, llenado de moldes. Derecha, probetas terminadas

Figura A2.4. Proceso molido y tamizado de la escoria

Figura A2.5. Izquierda, dispositivo de molienda. Derecha, la EGAH sin moler

Figura A2.6. Izquierda, molienda de la escoria. Derecha, escoria molida

Figura A3.1. Curvas teórica Bolomey para $\alpha=20$

Figura A3.2. Amasado del HAC

Figura A3.3. Ensayo de escurrimiento

Figura A3.4. \varnothing_f de 580 mm

Figura A3.5. \varnothing_f de 640 mm

Figura A3.6. Ensayo de escurrimiento

Figura A3.7. \varnothing_f de 600 mm

Figura A3.8. \varnothing_f de 680 mm

Figura A3.9. \varnothing_f de 660 mm

Figura A3.10. \varnothing_f de 670 mm

Figura A3.11. Øf de 560 mm

Figura A3.12. Øf de 590 mm

Figura A3.13. Øf de 610 mm

Figura A4.1. Amasada 0 del H-0

Figura A4.2. Amasada 1 del H-0

Figura A4.3. Amasada 2 del H-0

Figura A4.4. Amasada 3 del H-0

Figura A4.5. Amasada 0 del H-10.

Figura A4.6. Amasada 1 del H-10

Figura A4.7. Amasada 2 del H-10

Figura A4.8. Amasada 3 del H-10

Figura A4.9. Amasada 0 del H-20

Figura A4.10. Amasada 1 del H-20

Figura A4.11. Amasada 2 del H-20

Figura A4.12. Amasada 3 del H-20

Figura A4.13. Amasada 0 del H-30

Figura A4.14. Amasada 1 del H-30

Figura A4.15. Amasada 2 del H-30

Figura A4.16. Amasada 3 del H-30

Figura A4.17. Amasada 0 del H-40

Figura A4.18. Amasada 1 del H-40

Figura A4.19. Amasada 2 del H-40

Figura A4.20. Amasada 3 del H-40

Figura A4.21. Amasada 1 del H-50

Figura A4.22. Amasada 2 del H-50

Figura A4.23. Amasada 3 del H-50

Figura A4.24. Amasada 1 del H-60

Figura A4.25. Amasada 2 del H-60

Figura A4.26. Amasada 3 del H-60

Figura A5.1. Amasada 1 del H-0. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.2. Amasada 2 del H-0. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.3. Amasada 1 del H-10. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.4. Amasada 2 del H-10. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.5. Amasada 3 del H-10. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.6. Amasada 3 del H-20. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.7. Amasada 1 del H-30. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.8. Amasada 2 del H-30. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.9. Amasada 3 del H-30. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.10. Amasada 1 del H-40. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.11. Amasada 2 del H-40. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.12. Amasada 3 del H-40. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.13. Amasada 1 del H-50. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.14. Amasada 2 del H-50. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.15. Amasada 3 del H-50. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.16. Amasada 1 del H-60. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.17. Amasada 2 del H-60. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A5.18. Amasada 3 del H-60. Avance y velocidad del fluido con el paso del tiempo

Figura A6.1. Digitalización del patrón del código CIB n° 24 W29

Figura A6.2. Correlacionan de las plantillas del código CIB n° 24 y los valores ICB

Figura A7.1. Gráfica de cajas y bigotes de densidades de los HAC

Figura A8.1. Difracción de rayos X de EGAH

Figura A8.2. Imagen SEM arriba y micro análisis EDX abajo del mortero con arena de sílice a los 7 días

Figura A8.3. Imagen SEM del mortero con arena de sílice a los 7 días y a 1.000 aumentos

Figura A8.4. Imagen SEM del mortero con arena de sílice a los 7 días a 3.500 aumentos

Figura A8.5. Imagen SEM del mortero con arena de sílice a los 60 días a 5.000 aumentos

Figura A8.6. Imagen SEM del mortero con arena de sílice a los 60 días a 20.000 aumentos

Figura A8.7. Imagen SEM a 150 aumentos del mortero con arena caliza, a los 7 días

Figura A8.8. Imagen SEM a 1.000 aumentos del mortero con arena caliza, a los 7 días

Figura A8.9. Análisis EDX del mortero con arena caliza a los 7 días (zona spectrum1)

Figura A8.10. Imagen SEM a 1.000 aumentos del mortero con EGAH a los 7 días

Figura A8.11. Mapping de los principales átomos de la EGAH (Mg, Al, Si y Ca)

Figura A8.12. Análisis EDX del mortero con arena de EGAH, a los 7 días

Figura A8.13. Arriba muestra 1 y abajo muestra 2 de árido calizo y a 7 días (Izquierda en 3 dimensiones y a la derecha en planta)

Figura A8.14. Perfiles nanométricos de las muestras analizadas. Arriba muestra 1 y abajo muestra 2 de árido calizo a 7 días

Figura A8.15. Arriba muestra 1 y abajo muestra 2 de árido de EGAH a 7 días (Izquierda en 3 dimensiones y a la derecha en planta)

Figura A8.16. Perfiles nanométricos de las muestras analizadas. Arriba muestra 1 y abajo muestra 2 de árido EGAH a 7 días

Figura A8.17. Arriba muestra 1 y abajo muestra 2 de árido de EGAH a los 60 días (Izquierda en 3 dimensiones y a la derecha en planta)

Figura A8.18. Perfiles nanométricos de las muestras analizadas. Arriba muestra 1 y abajo muestra 2 de árido EGAH a 60 días

Tabla 2.1. Valores de la retracción, con HR 50% y según ACI 209R-92, de un hormigón variado la relación del árido fino sobre la total (γ_{ψ})

Tabla 2.2. Factor corrector para el contenido de cemento, γ_c (ACI-92)

Tabla 2.3. Dosificación de un HAC según EHE-08

Tabla 2.4. Rango de valores de diferentes variables según IECA

Tabla 2.5. Dosificaciones de HAC propuestas por distintos autores. (Gomes, 2002; Pacios, 2003 y Valcuende et al., 2008)

Tabla 2.6. Las cuatro características principales que definen el estado fresco de los HAC y métodos de ensayos que los analiza

Tabla 2.7. Métodos utilizados para evaluar las propiedades en fresco del HAC

Tabla 2.8. Clasificación de autocompactabilidad (Instrucción EHE-08)

Tabla 2.9. Tipo de viscosidad y rango (EHE-08)

Tabla 2.10. Clases de resistencia al bloqueo. (Anejo 17 EHE-08, 2008)

Tabla 2.11. Ensayos del HAC según característica a estudiar

Tabla 2.12. Índice estabilidad visual "IEV" (Cuenca, 2008, según EHE-08)

Tabla 2.13. HVSI de las muestras endurecidas (Fang y Labi, 2006)

Tabla 2.14. Clasificación según penetración

Tabla 3.1. Fórmulas de actividad hidráulica de la EGAH (Pal et al., 2005)

Tabla 4.1. Clasificación de las deformaciones

Tabla 4.2. Valores de los α para los diferentes velocidades del cemento

Tabla 4.3. Valores de los α para los diferentes velocidades del cemento

Tabla 4.4. Similitud entre las expresiones indicadas por CM-2010, EC-2 y EHE-2008

Tabla 4.5. Valores de la retracción de secado según EC-2 y CM-2010, para hormigones a 28 días con diferente f_{cm} , con cemento tipo N, con un espesor medio de 50mm y HR variable

Tabla 4.6. Valores de la retracción autógena y de secado según EC-2 y CM-2010, para hormigones con $f_{cm}=50\text{MPa}$, con cemento tipo N, con un espesor medio de 50mm y HR 50%, a diferentes edades

Tabla 4.7. Valores de retracción total, con el paso del tiempo de los cuatro modelos analizados, para un hormigón de características similares

Tabla 4.8. Valores de la proporcionalidad entre EHE-08, ACI-92, EC-2 y CM-2010(2 a 2), para la retracción total a diferentes edades

Tabla 5.1. Ensayos realizados en el trabajo de investigación

Tabla 5.2. Composición de la escoria granulada de alto horno

Tabla 5.3. Dosificación de los morteros realizados

Tabla 5.4. Valores de la resistencia al desgaste-coeficiente de Micro-Deval

Tabla 5.5. Características ensayadas para conocer la densidad

Tabla 5.6. Masa y densidad de la escoria secada en horno

Tabla 5.7. Coeficiente de absorción de cada muestra

Tabla 5.8. Dosificación de los HAC

Tabla 5.9. Caracterización del cemento

Tabla 5.10. Granulometría Bolomey para grava, arena gruesa, arena fina y EGAH

Tabla 5.11. Interfaz de aplicación informática DCA

Tabla 5.12. Ampliación de la hoja de cálculo para el 60% de EGAH

Tabla 5.13. Dosificación teórica con árido grueso y fino a sustituir

Tabla 5.14. Diferencias significativas en granulometrías de los áridos utilizados

Tabla 5.15. Dosificación con EGAH y fino calizo

Tabla 5.16. Resumen de los ensayos realizados

Tabla 5.17. VSI para 21 amasadas

Tabla 5.18. Dimensiones de las agujas

Tabla 6.1. Volumen de intrusión $((\text{cc/g}) \cdot 10^{-3})$, por grupos de poros

Tabla 6.2. Características de la porosidad de las mezclas de HAC

Tabla 6.3. Valores de densidad aparente (MIP) y densidad calculada en las probetas

Tabla 6.4. Resistencias a compresión (MPa) a 2, 7, 28, 90 y 365 días

Tabla 6.5. Datos reológicos

- Tabla 6.6. Resultados de inspección. N° de poros, superficie y valor ICB
- Tabla 6.7. Resultados medios por amasada
- Tabla 6.8. Resumen Estadístico para ICB por % de EGAH de HAC
- Tabla 6.9. ANOVA para valores ICB por % de EGAH de HAC
- Tabla 6.10. Resultados medios por amasada según digitalización de la plantilla CIB
- Tabla 6.11. Resultados de las 97 probetas de HAC según plantilla del CIB
- Tabla 6.12. Valores de resistencias a compresión a 7, 28, 90 y 365 días
- Tabla 6.13. Resumen estadístico para compresión a 7 días
- Tabla 6.14. Tabla ANOVA para compresión a 7 días por dosificación
- Tabla 6.15. Prueba de múltiple rangos para compresión a 7 días
- Tabla 6.16. Grupos homogéneos
- Tabla 6.17. Resumen estadístico de valores a compresión a 28 días
- Tabla 6.18. ANOVA para compresión a 28 días por dosificación
- Tabla 6.19. Prueba de múltiple rangos para compresión a 28 días. Método LSD
- Tabla 6.20. Incrementos de resistencia a compresión entre 7 y 28 días
- Tabla 6.21. Resumen estadístico de valores a compresión a 90 días
- Tabla 6.22. ANOVA para compresión a 90 días por dosificación
- Tabla 6.23. Incrementos de resistencia a compresión entre los 28 y 90 días
- Tabla 6.24. Resumen estadístico para compresión a 365 días
- Tabla 6.25. ANOVA para compresión a 365 días por dosificación
- Tabla 6.26. Ratio de la resistencia a compresión a los 7, 28, 90 y 365 días
- Tabla 6.27. Ratios de la resistencia a compresión a 7, 90 y 365 días de cada hormigón con respecto a la resistencia a compresión a 28 días

- Tabla 6.28 Resultado de los ensayos a tracción indirecta a los 28 días
- Tabla 6.29. Resumen estadístico de los resultados a tracción indirecta a 28 días
- Tabla 6.30. ANOVA para los resultados a tracción indirecta a 28 días
- Tabla 6.31. Resultado de los ensayos a tracción indirecta a 90 días
- Tabla 6.32. Resumen estadístico de los resultados a tracción indirecta a 90 días
- Tabla 6.33. ANOVA para los resultados a tracción indirecta a 90 días
- Tabla 6.34 Resultado de los ensayos a tracción indirecta a 28 y 90 días
- Tabla 6.35. Resumen estadístico de los resultados de tracción ind. a 28 y 90 días
- Tabla 6.36. ANOVA para resultados a tracción indirecta a 28 y 90 días
- Tabla 6.37. Resultado de los ensayos a flexotracción a 28 días
- Tabla 6.38. Resumen estadístico para los resultados a flexotracción a 28 días
- Tabla 6.39. ANOVA para los resultados a flexotracción a 28 días
- Tabla 6.40. Resultado de los ensayos a flexotracción a 90 días
- Tabla 6.41. Resumen estadístico para resultados a flexotracción a 90 días
- Tabla 6.42. ANOVA para resultados a flexotracción a 90 días
- Tabla 6.43. Resumen estadístico de los resultados a flexotracción a 90 días
- Tabla 6.44. ANOVA para resultados a flexotracción a 90 días
- Tabla 6.45. Fórmulas para determinar la resistencia a tracción según diferentes normativas
- Tabla 6.46. Comparación de la resistencia a tracción experimental y la calculada teóricamente según diferentes normativas, a la edad de 28 días
- Tabla 6.47. Cociente entre los valores experimentales y según normativas a 28 días

- Tabla 6.48. Comparación de la resistencia a tracción experimental y la calculada teóricamente según diferentes normativas, a la edad de 90 días
- Tabla 6.49. Cociente entre los valores experimentales y según normativas a 90 días
- Tabla 6.50. Valores de E_c resultantes para ambos morteros
- Tabla 6.51. Resultados del módulo de deformación a 28 días
- Tabla 6.52. Resumen estadístico de los resultados del módulo de deformación
- Tabla 6.53. ANOVA para los resultados del módulo de deformación
- Tabla 6.54. Relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión a 28 días
- Tabla 6.55. Fórmulas para determinar el módulo de la deformación según diferentes normativas
- Tabla 6.56. Comparación del módulo de deformación experimental y el calculada teóricamente según diferentes normativas a la edad de 28 días
- Tabla 6.57. Cociente entre los valores experimentales y según normativas a 28 días
- Tabla 6.58. Ratios de la evolución de la retracción en relación al H-0
- Tabla 6.59. Evolución relación retracción autógena/total para los diferentes HAC
- Tabla 6.60. Ratios de la evolución de la retracción autógena en relación al hormigón H-0
- Tabla 6.61. Ratios de evolución de la retracción secado en relación al hormigón H-0
- Tabla 6.62. Ratios de evolución de la retracción total en relación al hormigón H-0
- Tabla A1.1. Retenido-acumulado para cada tamiz
- Tabla A1.2. Retenido-acumulado para cada tamiz
- Tabla A1.3. Retenido-acumulado para cada tamiz

Tabla A1.4. Retenido-acumulado para cada tamiz

Tabla A3.1. Pesadas ajustadas, parciales y acumuladas de la 1ª amasada

Tabla A3.2. Pesadas ajustadas, parciales y acumuladas, de la 3ª amasada

Tabla A3.3. Pesadas acumuladas

Tabla A3.4. Pesadas acumuladas

Tabla A3.5. Pesadas acumuladas

Tabla A3.6. Ajustes previos en la dosificación

Tabla A4.1. Valores VSI para las diferentes amasadas

Tabla A6.1. Resultados de digitalización patrón código CIB nº 24

Tabla A7.1. Resultados del ensayo a compresión a 7 y 28 días

Tabla A7.2. Resultados a 90 y 365 días

Tabla A7.3. Valores de resistencias a compresión a 7, 28, 90 y 365 días

Tabla A7.4. Pesada, dimensiones y densidades de las probetas de HAC

Tabla A7.5. Resumen estadístico de densidades de los HAC